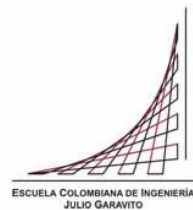


Maestría en Ingeniería Civil

**Correlaciones entre el CBR de la Subrasante y Deflexiones
Medidas con FWD en Colombia**

Ingrid Adriana Rodríguez Torres

Bogotá, D.C., 08 de Julio de 2020

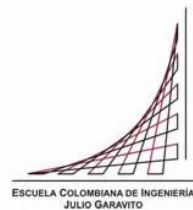


**Correlaciones entre el CBR de la Subrasante y Deflexiones
Medidas con FWD en Colombia**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con
énfasis en geotecnia**

**Fernando Estrada Sánchez
Director**

Bogotá, D.C., 08 de Julio de 2020



La tesis de maestría titulada “Correlaciones entre el CBR de la Subrasante y Deflexiones Medidas con FWD en Colombia”, presentada por Ingrid Adriana Rodríguez Torres, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia.

Fernando Estrada Sánchez

Director de la tesis

Sandra Ximena. Campagnoli Martínez

Jurado

Oscar Javier Reyes Ortiz

Jurado

Bogotá, D.C., 8 de julio de 2020

Dedicatoria

A Dios y la Virgen María. A mi familia, mi hija por su paciencia y el estar ahí siempre conmigo con sus palabras mágicas, a mi esposo por sus consejos y motivación y a mis padres, familia y amigos, por su amor, apoyo y aliento para lograr esta meta que hoy se ve reflejada en estas líneas.

Agradecimientos

Primero que todo, a Dios Todopoderoso y la Virgen María, por estar siempre ahí bendiciéndome y guiándome en todo este proceso de superación profesional. A mi esposo, por sus enseñanzas académicas de un investigador, a mi director de tesis, Ing. Fernando, quiero agradecer por su orientación a lo largo de la investigación, así como toda la información proporcionada para el logro de los objetivos de esta. Al Ing. Carol Bockelmann, por el espacio permitido para llegar a cabo los estudios de la maestría, así como a las empresas de Consultoría Vial que me proporcionaron la información base para la investigación con fines académicos.

Resumen

Las metodologías actuales para el diseño y rehabilitación de pavimentos flexibles, como la -American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO, 1993) y Guide For Mechanistic – Empirical Pavement Design (MEPDG), involucran dentro de sus parámetros de diseño el módulo resiliente de la subrasante, M_R . La complejidad de los procedimientos de las pruebas de laboratorio (tiempo, costo, disponibilidad), ha incitado a las agencias de carreteras a nivel internacional a explorar otros métodos de prueba, principalmente pruebas de campo (in situ), como mediciones de deflectometría (FWD) para determinar el módulo de la subrasante por retrocálculo y mediante fórmulas empíricas relacionada con otros ensayos básicos de capacidad de Soporte, como el CBR (California Bearing Ratio).

El presente estudio tiene como propósito buscar correlaciones entre el CBR de la subrasante y las deflexiones medidas con FWD, para diferentes tipos de suelo (finos, arenas y gravas). Para ello, se contó con información simultánea de datos de CBR sobre muestras inalteradas y muestras compactadas en laboratorio, propiedades del suelo y medidas de deflexiones en diferentes proyectos viales desarrollados en Colombia, información que fue proporcionada por dos empresas de consultoría vial con fines académicos y de investigación.

Para el análisis de la información disponible, se emplearon gráficas de dispersión simple con el fin de observar la tendencia de los datos de las propiedades del suelo y deflexiones ubicadas a una distancia r del centro de aplicación de carga, con los datos de CBR de muestras inalteradas y compactadas en laboratorio. Las propiedades analizadas del suelo fueron límites de Atterberg, granulometría, humedad natural del suelo y módulo determinado mediante las metodologías AASHTO y método directo.

Una vez analizadas las variables que mejor correlacionaron con el CBR para cada tipo de suelo, se aplicó un modelo lineal MLG para determinar el valor de CBR a partir de mediciones de deflectometría y parámetros índices del suelo.

A partir de los modelos desarrollados, se puede indicar que para los suelos finos, existe una buena correlación entre el CBR en condiciones de humedad natural y la deflexión d_r , medida en el sensor ubicado a una distancia r y la humedad natural. Para el caso de los suelos arenosos, el CBR de muestras compactadas en laboratorio se correlaciona bien con la deflexión d_r y la distancia r . Por último, para los suelos tipo grava, con una correlación más baja, el CBR de muestras compactadas en laboratorio se relaciona mejor con la deflexión d_r , la distancia r y el porcentaje de finos. Adicionalmente, se obtiene que la relación del CBR con los parámetros físicos como LL, LP, IP, % gravas, % arenas y % finos, presenta una gran dispersión. Esta baja homogeneidad indica que no existe una correlación directa de cada parámetro con el CBR y puede requerirse un análisis multivariantes o correlaciones múltiples para llegar a una buena correlación.

Índice general

| | |
|--|----|
| Introducción | 19 |
| Capítulo 1 Estado del Arte..... | 24 |
| 1.1 Módulo Resiliente de la Subrasante..... | 24 |
| 1.1.1 Determinación del módulo resiliente del suelo de subrasante, a partir de ensayos de laboratorio | 24 |
| 1.1.2 Determinación del módulo resiliente del suelo de subrasante a partir del estudio de deflectometría | 32 |
| 1.1.2.1 Ventajas y desventajas de los equipos de carga por impulso: | 34 |
| 1.1.2.2 Determinación del módulo por el método AASHTO | 34 |
| 1.1.2.3 Análisis de los resultados de la deflectometría (retrocálculo de módulos) | 35 |
| 1.1.3 Relaciones entre el módulo resiliente de laboratorio y el determinado por proceso de retrocálculo | 41 |
| 1.1.4 Estimación del módulo resiliente de la subrasante a partir del ensayo de CBR | 49 |
| 1.2 Correlaciones CBR y FWD..... | 56 |
| Capítulo 2 Metodología de Investigación | 61 |
| 2.1 Recopilación, análisis y validación de la información..... | 61 |
| 2.1.1 Espesores de la estructura de pavimento..... | 63 |
| 2.1.2 Resultados de ensayos de laboratorio..... | 64 |
| 2.1.2.1 Granulometría | 64 |
| 2.1.2.2 Límites de Atterberg..... | 66 |
| 2.1.2.3 Datos de CBR | 69 |
| 2.2 Determinación del módulo de la subrasante a partir de la deflectometría | 70 |
| 2.2.1 Datos de mediciones de deflectometría..... | 70 |
| 2.2.1.1 Normalización de deflexiones por carga..... | 72 |
| 2.2.2 Determinación del módulo resiliente de la subrasante a partir de las mediciones de FWD | 73 |
| 2.2.2.1 Método AASHTO 1993 | 73 |
| 2.2.2.2 Método directo | 75 |
| 2.2.2.3 Resultados obtenidos de módulo..... | 78 |

| | |
|--|-----|
| Capítulo 3 Comportamiento entre el CBR y Parámetros del Suelo..... | 81 |
| 3.1 Relación entre el CBR y granulometría..... | 81 |
| 3.1.1 CBR y porcentaje de gravas | 81 |
| 3.1.2 CBR y porcentaje de arenas | 82 |
| 3.1.3 CBR y porcentaje de finos | 83 |
| 3.2 Relación entre el CBR y límites de Atterberg..... | 84 |
| 3.2.1 CBR y límite líquido..... | 84 |
| 3.2.2 CBR y límite plástico | 85 |
| 3.2.3 CBR e Índice de Plasticidad..... | 86 |
| 3.3 CBR vs Plasticidad y contenido de finos para suelos finos..... | 87 |
| Capítulo 4 Comparación de los datos del Estudio con Correlaciones Internacionales entre FWD - CBR..... | 88 |
| 4.1 Suelos finos..... | 88 |
| 4.2 Suelos arenosos..... | 90 |
| 4.3 Suelos tipo grava..... | 92 |
| Capítulo 5 Análisis de Regresión y Correlaciones entre CBR y FWD..... | 95 |
| 5.1 Datos empleados para el análisis | 95 |
| 5.2 Análisis de regresión con modelos clásicos..... | 96 |
| 5.2.1 Suelos finos..... | 97 |
| 5.2.1.1 CBR muestra inalterada humedad natural vs dr, MR y dr*r (metodología AASHTO) 97 | |
| 5.2.1.2 CBR muestra inalterada humedad natural vs dr, MR y dr*r ₅₀ (M. Directo) 98 | |
| 5.2.2 Suelos arenosos | 98 |
| 5.2.2.1 CBR muestra inalterada humedad natural vs MR, dr*r y dr (metodología AASHTO) 98 | |
| 5.2.2.2 CBR muestra inalterada humedad natural vs MR, dr*r ₅₀ y dr, (M. Directo) 99 | |
| 5.2.2.3 CBR muestra compactada en laboratorio vs MR, dr*r y dr (metodología AASHTO) 100 | |
| 5.2.2.4 CBR muestra compactada en laboratorio vs dr, MR, dr*r ₅₀ , dr*r ₅₀ *HN y dr*r ₅₀ *%finos (M. Directo)..... | 102 |
| 5.2.3 Suelos tipo grava | 102 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 5.2.3.1 | CBR muestra compactada en laboratorio vs MR, dr, dr*r, dr*r* % gravas y dr*r* % finos (metodología AASHTO) | 102 |
| 5.2.3.2 | CBR muestra compactada en laboratorio vs dr, dr*r ₅₀ , MR, dr*r ₅₀ * % gravas y dr*r ₅₀ * % finos (M. Directo) | 103 |
| 5.2.4 | Resumen de los análisis de regresión | 104 |
| 5.3 | Análisis estadísticos para la determinación de correlaciones entre CBR y FWD | 109 |
| 5.3.1 | Análisis de residuales | 114 |
| 5.3.2 | Residuales en función de los valores ajustados | 117 |
| 5.4 | Modelo de análisis de regresión lineal generalizado..... | 118 |
| 5.4.1 | Empleando los parámetros obtenidos por la metodología AASHTO - 93...119 | |
| 5.4.1.1 | Modelos de regresión para suelos finos, CBR muestra inalterada humedad natural..... | 119 |
| 5.4.1.2 | Modelos de regresión para suelos arenosos | 127 |
| 5.4.1.3 | Modelos de regresión para suelos tipo grava, CBR muestra compactada en laboratorio, en inmersión | 138 |
| 5.4.1.4 | Modelos de regresión adicionales para suelos tipo grava y arenas, CBR muestra compactada en laboratorio en inmersión..... | 143 |
| 5.4.2 | Empleando los parámetros obtenidos por el método directo..... | 147 |
| 5.4.2.1 | Modelos de regresión para suelos finos, CBR muestra inalterada humedad natural..... | 147 |
| 5.4.2.2 | Modelos de regresión para suelos arenosos | 150 |
| 5.4.2.3 | Modelos de regresión para suelos tipo grava, CBR muestra compactada en laboratorio en inmersión | 155 |
| 5.5 | Discusión de resultados de correlación..... | 157 |
| 5.6 | Comparación entre los modelos propuestos y otras correlaciones..... | 167 |
| 5.6.1 | Suelo finos | 167 |
| 5.6.2 | Suelos arenosos | 168 |
| 5.6.3 | Suelos tipo grava | 169 |
| 5.7 | Modelos propuestos | 170 |
| 5.7.1 | Suelo: finos (arcillas y limos), CBR muestra inalterada humedad natural .. | 170 |
| 5.7.2 | Suelos: arenas, CBR muestra compactada en laboratorio, en inmersión .. | 172 |
| 5.7.3 | Suelos: gravas, CBR muestras compactadas en laboratorio, en inmersión | 173 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 6 | Conclusiones y Recomendaciones | 175 |
| 6.1 | Suelo fino (arcillas y limos): CBR muestra inalterada, humedad natural: | 176 |
| 6.2 | Suelo arenoso: CBR muestras compactadas en laboratorio, en inmersión: | 177 |
| 6.3 | Suelo tipo grava: CBR muestras compactadas en laboratorio, en inmersión: ... | 177 |
| 7 | Bibliografía..... | 180 |

Índice de tablas

| | |
|---|-----|
| Tabla 1. Tipo de onda utilizada y frecuencia de carga en los protocolos AASHTO (suelos finos) | 28 |
| Tabla 2. Estado de esfuerzos aplicados en los protocolos AASHTO | 28 |
| Tabla 3. Factor de ajuste empleado por diferentes Agencias de Transporte en Estados Unidos..... | 47 |
| Tabla 4. Factor de ajuste para suelos de subrasante de acuerdo con el tipo de suelo..... | 48 |
| Tabla 5. Correlaciones M_R Vs CBR | 52 |
| Tabla 6. Modelos que relacionan el índice del material y propiedades mecánicas a M_R | 55 |
| Tabla 7. Consistencia del suelo a partir del I_L | 67 |
| Tabla 8. Estado del suelo partir del I_c | 68 |
| Tabla 9. Coeficientes del modelo Hogg..... | 78 |
| Tabla 10. Resumen regresiones CBR vs variables – coeficiente de determinación | 104 |
| Tabla 11. Resultados análisis ANOVA, RStudio | 107 |
| Tabla 12. Resumen valores P-value..... | 107 |
| Tabla 13. Intervalo de clasificación del coeficiente de correlación | 110 |
| Tabla 14. Criterio de bondad de ajuste..... | 110 |
| Tabla 15. Comparativo entre el modelo ML y MLG | 112 |
| Tabla 16. Histograma de residuos..... | 116 |
| Tabla 17. Test Durbin – Watson, suelos finos CBR W_n | 123 |
| Tabla 18. Resultados del análisis del modelo, Suelos finos CBR humedad natural (CBR W_n) | 126 |
| Tabla 19. Test Durbin – Watson, suelos arenosos CBR W_n | 129 |
| Tabla 20. Resultados del análisis del modelo, Suelos arenosos CBR humedad natural (CBR W_n) | 131 |
| Tabla 21. Test Durbin – Watson, suelos arenosos CBR Lab | 135 |
| Tabla 22. Resultados del análisis del modelo, Suelos arenosos CBR muestra compactada en laboratorio (CBR Lab)..... | 137 |
| Tabla 23. Test Durbin – Watson, suelos tipo grava CBR Lab | 140 |
| Tabla 24. Resultados del análisis del modelo, Suelos tipo grava CBR muestra compactada en laboratorio (CBR Lab)..... | 142 |
| Tabla 25. Test Durbin – Watson, suelos tipo grava y arenas, CBR Lab | 145 |
| Tabla 26. Resultados del análisis del modelo, Suelos tipo grava y arenas, CBR muestra compactada en laboratorio (CBR Lab) | 146 |
| Tabla 27. Resultados del análisis del modelo, Suelos finos CBR humedad natural (CBR W_n) | 149 |
| Tabla 28. Resultados del análisis del modelo, Suelos arenosos CBR humedad natural (CBR W_n) | 151 |
| Tabla 29. Resultados del análisis del modelo, Suelos arenosos CBR muestra compactada en laboratorio (CBR Lab)..... | 154 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 30. Resultados del análisis del modelo, Suelos tipo grava CBR muestra compactada en laboratorio (CBR Lab)..... | 156 |
| Tabla 31. Resultados diagrama de cajas y bigotes modelos MLG..... | 166 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Esquema de esfuerzos en una muestra en pruebas triaxiales. Fuente: Rahim & George (2003) | 26 |
| Figura 2 Estado de esfuerzos provocados en la subrasante por el paso de un vehículo en movimiento. Fuente: Limaymanta & Gutiérrez (2003) | 26 |
| Figura 3. Deformación bajo carga repetida. Fuente: Limaymanta & Gutiérrez (2003) | 27 |
| Figura 4. Prueba de módulo de resiliencia para la subrasante del tramo de prueba AASHO, reportadas por Seed et al. (1962). Fuente: Publicación Técnica N. 142, MT (2001) | 31 |
| Figura 5 Módulos de resiliencia del tramo prueba AASHO reportados por Thompson y Robnett (1 ksi = 1000 psi). Fuente: Publicación Técnica N. 142, MT (2001) | 32 |
| Figura 6 Diagrama típico de cuenco de deflexión. Fuente: (FHWA, 2017) | 33 |
| Figura 7 Diagrama esquema de prueba FWD. Fuente: (FHWA, 2017)..... | 33 |
| Figura 8 Cuenco de deflexión teórico y real. Fuente: (FHWA, 2017) | 36 |
| Figura 9 Diagrama de flujo de un proceso de retrocálculo. (FHWA, 2017) | 37 |
| Figura 10 Esquema del pavimento para el proceso de retrocálculo. Fuente: (INVIAS, 2008)..... | 39 |
| Figura 11 Esquema de la zona de esfuerzos en el pavimento bajo la carga de un equipo dinámico. Fuente: (FHWA, 2017) | 40 |
| Figura 12 CBR Versus Módulo de Elasticidad. Fuente: Eka et al. (2012) | 50 |
| Figura 13 CBR Versus E obtenidos a partir de diferentes relaciones de Poisson. Fuente: Eka et al. (2012) | 51 |
| Figura 14 Comparativo resultados correlaciones M_R vs CBR | 53 |
| Figura 15 Grafica de Correlación M_R vs CBR. Fuente: Shell (1978) | 54 |
| Figura 16 Correlación CBR vs plasticidad de los materiales. Fuente: NCHRP (2001) | 55 |
| Figura 17 Módulo de la superficie Versus Localización Sensor. Fuente: Chai et al. (2013) | 58 |
| Figura 18 Gráficos de módulos de superficie típicos para estructuras de pavimento (Ullidtz, 1897). Fuente: Horak (2017) | 59 |
| Figura 19 Espesores carpeta asfáltica | 63 |
| Figura 20 Espesores material granular (BG/SBG) | 64 |
| Figura 21 Granulometría base de datos | 64 |
| Figura 22 Clasificación para suelos finos | 65 |
| Figura 23 Clasificación para suelos arenosos | 65 |
| Figura 24 Clasificación para suelos tipo grava | 65 |
| Figura 25 Gráfica de límites líquidos, suelos finos | 66 |
| Figura 26 Gráfica límites plásticos, suelos finos..... | 66 |
| Figura 27 Gráfica índice de plasticidad, suelos finos | 66 |
| Figura 28 Gráfica índice de liquidez | 68 |
| Figura 29 Gráfica índice de consistencia..... | 69 |
| Figura 30 CBR suelos finos, muestras inalteradas..... | 70 |

| | |
|---|----|
| Figura 31 CBR suelos arenosos muestras inalteradas y compactadas | 70 |
| Figura 32 CBR suelos tipo grava, muestras compactadas..... | 70 |
| Figura 33 Fotografías equipo deflectómetro. Fuente: Empresa de consultoría..... | 71 |
| Figura 34 Medida y registro de deflexiones con un deflectómetro de impacto..... | 72 |
| Figura 35 Módulos de la subrasante | 78 |
| Figura 36 Sensor empleado en AASHTO..... | 79 |
| Figura 37 Sensor empleado en método directo..... | 79 |
| Figura 38 Comportamiento del módulo en función de la deflexión, puntos aleatorios | 80 |
| Figura 39 Gráfica de dispersión CBR vs % Gravas..... | 82 |
| Figura 40 Gráfica de dispersión CBR vs % Arenas..... | 83 |
| Figura 41 Gráfica de dispersión CBR vs % Finos | 84 |
| Figura 42 Gráfica de dispersión CBR vs % Límite líquido, suelos finos | 85 |
| Figura 43 Gráfica de dispersión CBR vs % Límite líquido, suelos arenosos y gravas | 85 |
| Figura 44 Gráfica de dispersión CBR vs Límite plástico, suelos finos | 86 |
| Figura 45 Gráfica de dispersión CBR vs Límite plástico, suelos arenosos y gravas..... | 86 |
| Figura 46 Gráfica de dispersión CBR vs Índice de plasticidad, suelos finos | 86 |
| Figura 47 Gráfica de dispersión CBR vs Índice de plasticidad, suelos arenosos y gravas | 86 |
| Figura 48 Gráfica de dispersión CBR vs wPI y correlación NCHRP | 87 |
| Figura 49 Gráfica de dispersión CBR (humedad natural) vs Deflexión a 900 mm vs ecuación 1, suelos finos | 89 |
| Figura 50 Gráfica de dispersión CBR (humedad natural) vs Deflexión a 900 mm vs ecuación 2, suelos finos | 89 |
| Figura 51 Gráfica de dispersión CBR (humedad natural) vs Deflexión a 900 mm vs ecuación 3, suelos finos | 90 |
| Figura 52 Gráfica de dispersión CBR vs Deflexión a 900 mm vs ecuación 1, suelos arenosos..... | 91 |
| Figura 53 Gráfica de dispersión CBR vs Deflexión a 900 mm vs ecuación 2, suelos arenosos..... | 91 |
| Figura 54 Gráfica de dispersión CBR vs Deflexión a 900 mm vs ecuación 3, suelos arenosos..... | 92 |
| Figura 55 Gráfica de dispersión CBR (Lab) vs Deflexión a 900 mm vs ecuación 1, suelos tipo grava..... | 92 |
| Figura 56 Gráfica de dispersión CBR (Lab) vs Deflexión a 900 mm vs ecuación 2, suelos tipo grava..... | 93 |
| Figura 57 Gráfica de dispersión CBR (Lab) vs Deflexión a 900 mm vs ecuación 3, suelos tipo grava..... | 93 |
| Figura 58 Número de datos de CBR por tipo de suelo..... | 96 |
| Figura 59 Gráfica de dispersión CBR M.inalterada humedad natural vs MR, dr*r y dr, suelos finos..... | 97 |
| Figura 60 Gráfica de dispersión CBR M. inalterada humedad natural vs MR, dr y dr*r ₅₀ , (M. Directo), suelos finos | 98 |

| | |
|--|-----|
| Figura 61 Gráfica de dispersión CBR M. inalterada humedad natural vs MR, dr^*r y dr), suelos arenosos..... | 99 |
| Figura 62 Gráfica de dispersión CBR M. inalterada humedad natural vs MR, dr^*r_{50} y dr (M. Directo), suelos arenosos | 100 |
| Figura 63 Gráfica de dispersión CBR laboratorio vs MR, dr^*r y dr (AASHTO), suelos arenosos..... | 101 |
| Figura 64 Gráfica de dispersión CBR laboratorio vs MR, dr^*r y dr (M. Directo), suelos arenosos..... | 102 |
| Figura 65 Gráfica de dispersión CBR laboratorio vs MR, dr^*r , y dr (AASHTO), suelos tipo grava..... | 103 |
| Figura 66 Gráfica de dispersión CBR laboratorio vs MR, dr^*r_{50} y dr, suelos tipo grava ... | 104 |
| Figura 67 Gráfica valores P vs nivel de significancia, análisis ANOVA..... | 108 |
| Figura 68 Casos en los que no se rechaza la hipótesis $H_0:\beta_1 = 0$. Fuente: (Montgomery, Peck, & Vining, 2002) | 114 |
| Figura 69 Casos en los que si se rechaza la hipótesis $H_0:\beta_1 = 0$. Fuente: (Montgomery et al., 2002)..... | 114 |
| Figura 70 Gráficas de probabilidad normal: a) ideal; b) distribución con colas gruesas; c) distribución con colas delgadas; d) Asimetría positiva; e) asimetría negativa. Fuente: (Montgomery et al., 2002)..... | 116 |
| Figura 71 Patrones en las gráficas residuales: a) satisfactorio; b) en embudo; c) en doble arco; d) no lineal. Fuente: (Montgomery et al., 2002)..... | 117 |
| Figura 72 Gráfica de normalidad de residuos, suelos finos, CBR W_n | 121 |
| Figura 73 Graficas análisis de residuos estandarizados vs valores ajustados, suelos finos CBR W_n | 122 |
| Figura 74 Graficas análisis de residuos vs orden de observación, suelos finos CBR W_n | 122 |
| Figura 75 Graficas de autocorrelación, suelos finos CBR W_n | 124 |
| Figura 76 Graficas distancia de Cook, suelos finos CBR W_n | 125 |
| Figura 77 Gráfica de normalidad de residuos, suelos arenosos, CBR W_n | 128 |
| Figura 78 Graficas análisis de residuos estandarizados vs valores ajustados, suelos arenosos CBR W_n | 129 |
| Figura 79 Graficas análisis de residuos vs orden de observación, suelos arenosos CBR W_n | 129 |
| Figura 80 Graficas de autocorrelación, suelos arenosos CBR W_n | 130 |
| Figura 81 Graficas distancia de Cook, suelos arenosos CBR W_n | 130 |
| Figura 82 Gráfica de normalidad de residuos, suelos arenosos, CBR Lab..... | 133 |
| Figura 83 Graficas análisis de residuos estandarizados vs valores ajustados, suelos arenosos CBR Lab | 134 |
| Figura 84 Graficas análisis de residuos vs orden de observación, suelos arenosos CBR Lab..... | 134 |
| Figura 85 Graficas de autocorrelación, suelos arenosos CBR Lab..... | 135 |
| Figura 86 Graficas distancia de Cook, suelos arenosos CBR Lab..... | 136 |
| Figura 87 Gráfica de normalidad de residuos, suelos tipo grava, CBR Lab..... | 139 |

| | |
|--|-----|
| Figura 88 Graficas análisis de residuos estandarizados vs valores ajustados, suelos tipo grava CBR Lab | 140 |
| Figura 89 Graficas análisis de residuos vs orden de observación, suelos tipo grava CBR Lab..... | 140 |
| Figura 90 Graficas de autocorrelación, suelos tipo grava CBR Lab | 141 |
| Figura 91 Graficas distancia de Cook, suelos tipo grava CBR Lab | 141 |
| Figura 92 Gráfica de normalidad de residuos, suelos tipo grava y arenas, CBR Lab. | 144 |
| Figura 93 Graficas análisis de residuos estandarizados vs valores ajustados, suelos tipo grava y arenas, CBR Lab | 144 |
| Figura 94 Graficas análisis de residuos vs orden de observación, suelos tipo grava y arenas, CBR Lab | 145 |
| Figura 95 Graficas de autocorrelación, suelos tipo grava y arenas, CBR Lab | 145 |
| Figura 96 Comparación entre el valor de CBR Wn observado y el CBR wn predicho, suelos finos..... | 158 |
| Figura 97 Comparación entre el valor de CBR LAB observado y el CBR LAB predicho, suelo arenoso | 159 |
| Figura 98 Comparación entre el valor de CBR LAB observado y el CBR LAB predicho, suelo tipo grava | 160 |
| Figura 99 Comparación entre el valor de CBR LAB observado y el CBR LAB predicho, suelo tipo grava y arenoso..... | 161 |
| Figura 100 Interpretación diagrama de cajas y bigotes..... | 162 |
| Figura 101 Comparación de los diagramas de cajas y bigotes de los modelos para suelos finos, con CBR Wn | 163 |
| Figura 102 Comparación de los diagramas de cajas y bigotes de los modelos para suelos arenosos, con CBR Lab..... | 163 |
| Figura 103 Comparación de los diagramas de cajas y bigotes de los modelos para suelos tipo grava, con CBR Lab..... | 164 |
| Figura 104 Comparación de los diagramas de cajas y bigotes del modelo para suelos tipo grava-arenas, con CBR Lab | 165 |
| Figura 105 Comparación de los diagramas de cajas y bigotes modelos gravas y grava-arenas, con CBR Lab | 165 |
| Figura 106 Comparativo modelos propuestos con otras correlaciones, suelos finos..... | 167 |
| Figura 107 Comparativo modelos propuestos con otras correlaciones, suelos arenosos | 168 |
| Figura 108 Comparativo modelos propuestos con otras correlaciones, suelos tipo grava | 169 |
| Figura 109 Modelo MLG, CBR Wn versus dr^*r^*HN | 171 |
| Figura 110 Modelo potencial, CBR Wn versus dr^*r^*HN | 171 |
| Figura 111 Modelo MLG, CBR Lab versus dr^*r | 172 |
| Figura 112 Modelo potencial, CBR Lab versus dr^*r | 173 |
| Figura 113 Modelo potencial, CBR Lab versus $dr^*r^*\%$ finos | 174 |

Índice de anexos

Anexo 1 Base de datos, deflectometría y geotecnia

Anexo 2 Certificados de calibración deflectómetro de impacto

Anexo 3 Módulos de la subrasante determinados a partir de la deflectometría

Anexo 4. Correlaciones CBR, deflexiones versus parámetros del suelo

Anexo 5. Análisis estadístico, modelo MLG parámetros método directo

Introducción

Las metodologías actuales para el diseño y rehabilitación de pavimentos flexibles, como la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO, 1993) y Guide For Mechanistic – Empirical Pavement Design (MEPDG), involucran dentro de sus parámetros de diseño el módulo resiliente de la subrasante, M_R , siendo el parámetro universalmente más aceptado para calificar la respuesta de la subrasante, el cual varía con el estado de tensiones (esfuerzo de confinamiento y esfuerzo desviador), tipo de suelo y estado físico del suelo (humedad y densidad). Ensayos de laboratorio de módulo resiliente fueron propuestos en 1992 por la AASHTO T294-92I, método que originalmente fue desarrollado por S.H.R.P (Strategic Highway Research Program), conocido como “protocolo 846”, y que es una modificación del ensayo AASHTO T274. La complejidad de los procedimientos de las pruebas de laboratorio (tiempo, costo, disponibilidad), ha incitado a las agencias de carreteras a nivel internacional a explorar otros métodos de prueba, principalmente pruebas de campo (in situ), como mediciones de deflectometría (FWD) para determinar el módulo de la subrasante por retrocálculo y mediante fórmulas empíricas relacionada con otros ensayos básicos de capacidad de Soporte, como el CBR (California Bearing Ratio).

Los estudios de deflectometría con equipos de medida dinámica (carga vibratoria sinusoidal o impacto) se pueden emplear para determinar los módulos de las capas del pavimento y de la subrasante a partir de las mediciones de deflexión. Los procedimientos más utilizados para predecirlos son el retrocálculo, cálculo directo y ecuaciones de regresión.

La relación entre el ensayo de relación de soporte de California (CBR) y el módulo resiliente, para suelos de subrasante, se ha estudiado extensamente en el pasado (Heukelom & Klomp, 1962 , Green and Hall 1975, Lister 1987); el CBR es el ensayo para determinar la capacidad de soporte de la subrasante más usado en Colombia. Tanto en Colombia, como en otras partes del mundo, es aceptado estimar el módulo resiliente de diseño a partir de los ensayos de CBR.

El ensayo de Penetrómetro dinámico de cono (PDC), un dispositivo introducido en la década de 1960 para la evaluación del pavimento, es otro método que se ha empleado para caracterizar el suelo de subrasante (Hassan 1996; Burnham y Johnson 1993; Chai y Roslie 1998), como prueba in situ.

La guía AASHTO permite el uso tanto de ensayos de laboratorio como el módulo retrocalculado a partir de pruebas in situ, pero reconoce que los módulos determinados en ambos procedimientos no son iguales.

Hay muchos factores que pueden llevar a la discrepancia entre el módulo del laboratorio y módulos retrocalculados; una de las razones es la dificultad de obtener muestras representativas de campo debido a la variabilidad o heterogeneidad inherente de los materiales de la capa de subrasante.

En Colombia, las normativas vigentes permiten emplear correlaciones a partir de la relación de soporte de California (CBR) para la determinación del módulo resiliente de la subrasante a través de ecuaciones empíricas como la descrita por Heukelom & Klomp (1962).

Cuando se emplean ecuaciones de correlación, surgen múltiples incertidumbres. Una de ellas, es que el ensayo de CBR es una medida empírica indirecta de la resistencia al corte y de la rigidez del material en condiciones no drenadas que se mide bajo una carga monotónica, y en un pavimento, la carga es cíclica. Además, los niveles de esfuerzo en un pavimento son muchos más bajos que aquellos que se generan en la muestra cuando se realiza el ensayo de CBR.

Por lo tanto, para el caso colombiano, donde existe variedad de composición y tipos de suelos, escoger arbitrariamente una ecuación empírica puede conducir a diseños de estructuras sub o sobredimensionadas (Rondón & Reyes, 2007).

El ensayo de CBR se realiza normalmente sobre suelo preparado en el laboratorio en condiciones determinadas de humedad y densidad. Este índice se utiliza para evaluar la capacidad de soporte de los suelos de subrasante y se rige por la norma ASTM 1883 o INVÍAS INV-E-148-13. Este ensayo permite obtener un número de relación de soporte, que

no es constante para un suelo dado, sino que se aplica solo al estado en el cual se encontraba el suelo durante el ensayo. El CBR se obtiene como un porcentaje del esfuerzo requerido para que el pistón penetre 2.54 o 5.08 mm (0.1 o 0.2 ") en una muestra de suelo y el esfuerzo requerido para hacer penetrar el mismo pistón, a las mismas profundidades, en una muestra patrón de grava bien gradada.

En cuanto al módulo resiliente de laboratorio, su determinación se realiza mediante ensayos triaxiales dinámicos de cargas repetidas en probetas cilíndricas que simulan un elemento de suelo. Estas probetas de suelo, confeccionadas o talladas de muestras inalteradas, son ensayadas luego de proporcionales condiciones representativas que se esperan tener en campo; las probetas se someten a una presión de confinamiento σ_3 y a un esfuerzo desviador σ_d ; este estado de esfuerzos pretende reproducir la condición del suelo cuando es sometido a las cargas sucesivas del tráfico. A partir de este ensayo se puede definir el módulo resiliente del material. (Limaymanta & Gutiérrez, 2003).

Una alternativa, que puede proporcionar datos de módulos determinados con información medida in situ, es a través de mediciones de deflexiones empleando el equipo deflectómetro de impacto (FWD), cuya relación con el valor de CBR no ha sido ampliamente estudiada en Colombia; sin embargo, a nivel mundial se ha tratado de correlacionar el CBR con la respuesta a las cargas (deflectometría), obteniéndose resultados variables. La deflectometría (respuesta del pavimento a las cargas) es, teóricamente, la mejor forma de determinar las propiedades mecánicas de los materiales de las capas que conforman la estructura del pavimento.

En Colombia, existe una gran cantidad de información de proyectos viales en los cuales hay información simultánea de deflectometría y de CBR. Se considera de la mayor utilidad para la ingeniería de pavimentos en el país aprovechar esa información para tratar de encontrar correlaciones propias entre CBR y deflectometría.

Basados en la Guía MEPDG (NCHRP, 2014), se tienen tres métodos básicos para obtener el MR de la subrasante: pruebas de módulo de resiliencia a carga repetida en laboratorio, análisis o retrocálculo mediante deflectómetro de impacto, FWD, y correlaciones con otras propiedades físicas de los materiales. Hoy en día, las pruebas de FWD son un método de

evaluación de pavimento de rutina, y los resultados de las pruebas desempeñan un papel integral en la determinación de las propiedades estructurales de las capas in situ (FHWA, 2017). Basados en lo indicado en MEPDG, existe una necesidad apremiante de una revisión exhaustiva del estado actual de la técnica y estado de la práctica de pruebas de FWD, retrocálculo y la interpretación, y de esta manera, proporcionar una guía de mejores prácticas sobre cómo evaluar de manera efectiva estructuras de pavimento existentes y llevar a cabo un análisis mecanicista en el proceso de evaluación y rehabilitación de pavimentos (FHWA, 2017). Adicionalmente, estos métodos han sido altamente sistematizados y se pueden realizar de forma rápida y económica.

El trabajo propuesto se enmarca en el grupo de investigación de geotecnia, línea de investigación pavimentos, reconocida en desarrollar proyectos en materiales para carreteras, pavimentos, vías de bajos volúmenes de tránsito, y fundaciones. El trabajo de investigación busca contribuir al análisis de resultados de ensayos in situ y ensayos de laboratorio y determinar una correlación para caracterizar los materiales de subrasante, basados en datos medidos en proyectos viales a nivel de Colombia.

Objetivo general:

Determinar la correlación entre el CBR de la subrasante y deflexiones medidas con FWD en Colombia.

Objetivos específicos:

1. Determinar el módulo resiliente de la subrasante de un pavimento en servicio, a partir de mediciones de deflexiones con deflectómetro de impacto (FWD) disponibles de proyectos viales realizados en Colombia, mediante la metodología AASHTO 1993 y cálculo directo.
2. Analizar los perfiles estratigráficos de las estructuras de pavimento existente, donde se cuenta con valores simultáneos de CBR de laboratorio y mediciones de deflectometría con FWD, en proyectos realizados en Colombia.

3. Conocer y evaluar la caracterización del tipo de material de subrasante en los puntos donde se cuenta con valores de CBR y deflectometría de manera simultánea.
4. Analizar resultados del índice de resistencia del suelo de subrasante denominado CBR (California Bearing Ratio) en suelos compactados en laboratorio y sobre muestras inalteradas de la información recopilada.
5. Establecer correlaciones entre el módulo del material de subrasante, obtenido mediante el estudio de deflectometría, y los resultados de CBR de laboratorio, para diferentes tipos de suelo de subrasante.

Capítulo 1

Estado del Arte

Desde la década de 1960 hasta la Guía de 1986, todas las versiones de la Guía de diseño de pavimentos flexibles se basaron en ecuaciones empíricas limitadas; estas ecuaciones de desempeño fueron desarrolladas por la AASHO Road Test, cerca de Ottawa, Illinois, a finales de los años cincuenta. Desde el momento de la prueba de carretera AASHO, se ha presentado muchos cambios importantes en los volúmenes de tráfico, materiales de construcción, clima, en los métodos de rehabilitación y diseño.

El ahuellamiento de un pavimento asfáltico puede comenzar en cualquier capa de la estructura por deficiencias en su calidad o en su comportamiento, lo que hace que la predicción de este fenómeno sea más difícil que la del fisuramiento por fatiga. Dos procedimientos han sido usados para limitar el ahuellamiento: el primero, limita la deformación vertical de compresión sobre la subrasante y el otro limita la deformación total permanente acumulada en la superficie del pavimento, con base en las propiedades de deformación permanente de cada una de las capas. Los métodos mecánicos clásicos de diseño de pavimentos utilizan el primer procedimiento y asumen que la falla por ahuellamiento se genera en la subrasante y que las diferentes capas de la estructura poseen la resistencia al corte suficiente para soportar adecuadamente la acción de las cargas del tránsito (SHELL International Petroleum Company, 1978) (“THE ASPHALT INSTITUTE,” 1991). Esta recomendación se basa en el análisis de los pavimentos del ensayo vial AASHO y de secciones diseñadas a partir de la prueba CBR.

1.1 Módulo Resiliente de la Subrasante

1.1.1 Determinación del módulo resiliente del suelo de subrasante, a partir de ensayos de laboratorio

Los procedimientos mecanicistas de diseño de pavimentos, basados en la teoría de capas elásticas, requieren la determinación o estimación de módulos elásticos para cada capa de la estructura de pavimento.

Según (Drumm, Pierce, & Members, 1990), los módulos de los materiales de base y subbase granular y el suelo de subrasante son determinados mediante pruebas triaxiales de carga repetida. En las pruebas de carga repetidas, se observa que a medida que el número de ciclos de carga aumentan la energía disipada durante un ciclo de carga dado disminuye. Esto se evidencia por una disminución en la histéresis de tensión-deformación, y es acompañado por un aumento de los módulos secantes. Después de una serie de cargas cíclicas, el módulo se vuelve casi constante, y la respuesta puede ser asumida como un comportamiento elástico. Este valor constante de módulo se define como el módulo elástico, E_r y se supone que ocurre después de unos 200 ciclos de carga (Barksdale et al. 1976; AASHTO: "Methods" 1982, citado en (Drumm, Pierce, & Members, 1990). El módulo resistente se calcula como:

$$E_r = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\epsilon_{axial}} = \frac{\sigma_d}{\epsilon_{axial}}$$

Ecuación 1

Donde:

- σ_1 : Esfuerzo principal mayor
- σ_3 : Esfuerzo principal menor
- σ_d : Esfuerzo desviador
- ϵ_{axial} : Deformación axial elástica o recuperable

Dado lo mencionado por Drumm, Pierce, & Members (1990), el procedimiento del ensayo consiste esencialmente en la aplicación de un esfuerzo desviador cíclico, $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$, con una presión de celda constante y la medición de la deformación axial. Aunque esta es la prueba más común, se ha analizado que los módulos bajo otras consideraciones de esfuerzo y de carga pueden ser importantes (Brown y Pappin 1981; McVay y Taesiri 1985; Stewart 1986; Leshchinsky y Rawlings 1988) (citado en Drumm et al., 1990). El módulo elástico, E_r , depende en gran medida de la magnitud de σ_d o el nivel de esfuerzo medio. Para materiales granulares, E_r aumenta con el incremento del esfuerzo de confinamiento.

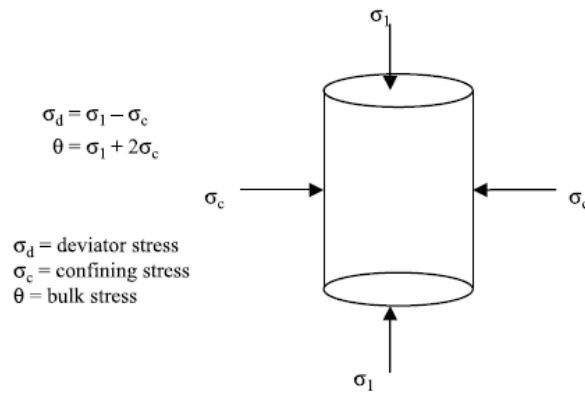


Figura 1. Esquema de esfuerzos en una muestra en pruebas triaxiales. Fuente: Rahim & George (2003)

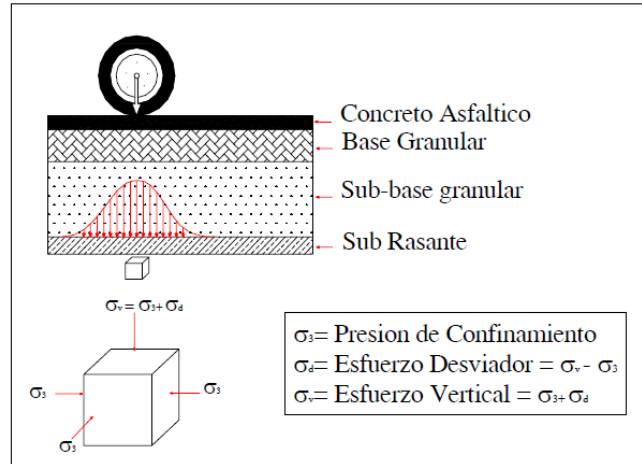


Figura 2 Estado de esfuerzos provocados en la subrasante por el paso de un vehículo en movimiento. Fuente: Limaymanta & Gutiérrez (2003)

Como lo menciona Limaymanta & Gutiérrez, 2003 , si se considera el material de subrasante con un comportamiento elástico, isótropo y homogéneo, hipótesis básica de la mecánica de suelos, los esfuerzos y las deformaciones se relacionarán con el módulo de elasticidad y la relación de Poisson, propios del material. Pero la respuesta real está en función de las características propias de los materiales que conforman el pavimento y donde las cargas impuestas por el tránsito tienen un carácter dinámico con muy cortos tiempos de aplicación. Luego de cesar la carga aplicada, la deformación total inducida se recupera.

Esto indica que los materiales no presentan un comportamiento elástico, y por ello se introduce el término de módulo resiliente, que corresponde a un “módulo elástico supuesto”, el cual relaciona las sollicitaciones de carga aplicadas con las deformaciones recuperables. La determinación del módulo resiliente en los suelos se realiza mediante ensayos triaxiales dinámicos de cargas repetidas en probetas cilíndricas que simulan un elemento del suelo. La respuesta típica esperada de este ensayo se puede observar en la Figura 3 y a partir de este ensayo se puede definir el módulo resiliente del material.

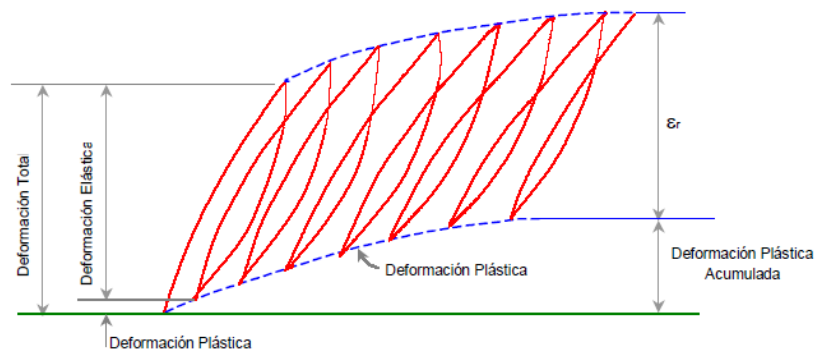


Figura 3. Deformación bajo carga repetida. Fuente: Limaymanta & Gutiérrez (2003)

El módulo de resiliencia no es una propiedad constante del suelo, sino que depende de muchos factores. Los principales se enuncian a continuación:

Materiales finos:

- Condiciones de carga o estado de esfuerzos
- Tipo de suelo y su estructura
- Estado físico del suelo
- Método de compactación
- Grado de compactación y contenido de agua

Materiales granulares:

- Tipo de material
- Tamaño del espécimen, tipo de compactación, peso específico y granulometría
- Contenido de agua

Según FHWA NJ 2000-01, en 1982 la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transporte (AASHTO) establece el método estándar de prueba para el módulo elástico del suelo de subrasante, designado AASHTO T 274-82 (Especificaciones AASHTO 1986).

Hasta la fecha, AASHTO ha adoptado el procedimiento para determinar el módulo elástico de subsuelo, descrito en el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (SHRP). La prueba AASHTO T-307 Método de prueba estándar para determinar el módulo elástico de suelos y materiales granulares, ha sido adoptada como la prueba de laboratorio universal, para determinar el módulo de resiliencia de los suelos de subrasante.

En general, los procedimientos de laboratorio para la determinación del módulo elástico son basados esencialmente en los métodos triaxiales cíclicos (propiedades bajo cargas repetidas). Algunos de los cambios más reconocidos de la prueba AASHTO son:

- a Las secuencias de carga y el número de ciclos de carga

Tabla 1. Tipo de onda utilizada y frecuencia de carga en los protocolos AASHTO (suelos finos)

| | T-274-82 | T-292-91 | T-294-94 | T-307-99 |
|--------------------------|---|--------------------------|-----------|-----------|
| Señal aplicada | Seno, haversine, rectangular y triangular | Rectangular y triangular | Haversine | Haversine |
| Duración de la carga (s) | 0.1 | 0.1 a 1.0 | 0.1 | 0.1 |
| Duración del ciclo (s) | 1.0 a 3.0 | 1.0 a 3.0 | 1.0 | 1.0 a 3.0 |

Fuente: Publicación Técnica No. 475 IMT, (2016)

Tabla 2. Estado de esfuerzos aplicados en los protocolos AASHTO

| | T-274-82 | T-292-91 | T-294-94 | T-307-99 |
|--------------------------|---|--------------------------|-----------|-----------|
| Señal aplicada | Seno, haversine, rectangular y triangular | Rectangular y triangular | Haversine | Haversine |
| Duración de la carga (s) | 0.1 | 0.1 a 1.0 | 0.1 | 0.1 |
| Duración del ciclo (s) | 1.0 a 3.0 | 1.0 a 3.0 | 1.0 | 1.0 a 3.0 |

Fuente: Publicación Técnica No. 475, IMT (2016)

- b Metodología de clasificación de los tipos de suelo y métodos de compactación.
- c Diferentes secuencias de prueba para suelos de base y subrasante independientes del tipo de suelo.
- d Cambio de la tensión de confinamiento en la secuencia de prueba de subbase.
- e Implementación de una presión de contacto del 10% de la tensión desviadora aplicada a la muestra. La presión de contacto proporciona una pequeña tensión axial en la muestra durante el período de descanso de la secuencia de carga cíclica para asegurar el contacto completo del espécimen y muestra.
- f Los suelos tipo I, de naturaleza granular, no plástica, se analizan a un tamaño de muestra de 6.0 Pulgadas de diámetro, con una altura de 12.0 pulgadas. Suelos tipo II, de grano fino, suelos cohesivos, se prueban a un tamaño de muestra de 2.8 pulgadas de diámetro, con una altura de 5,6 pulgadas.

De acuerdo con lo mencionado en la FHWA NJ 2000-01, el procedimiento revisado en la AASHTO TP46-94 es más preciso en la simulación de la carga debido al tráfico vehicular y en la representación real de las tensiones en la prueba de laboratorio, comparada con la que se pueden experimentar en campo. Además, en una serie de estudios recientes incluyendo a Maher et al. (1996), Pezo et al. (1991) y Nazarian y Feliberti (1993) citados en (Maher, Bennert, Gucunski, & Papp, 2000), se han abordado varios temas que requieren más investigación, los cuales incluyen el efecto de precondicionamiento de la muestra, contacto de las placas de la muestra y del extremo, viabilidad de las secuencias de carga existentes, y la colocación de LVDT en la muestra dentro de la cámara o fuera de la cámara en la carga del pistón.

Varias son las metodologías para diseño de pavimentos, tanto rígidos como flexibles que consideran al parámetro módulo de resiliencia como la base para la caracterización del comportamiento de suelos y materiales granulares. Es por ello, que la selección apropiada del módulo de resiliencia de un material se debe de realizar con sumo cuidado, teniendo en cuenta los factores que en él influyen.

Según el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), Publicación Técnica No. 478 (Pérez, Garnica, & Mestas, 2016) muchas de las discusiones respecto al módulo de resiliencia han estado centradas en métodos de prueba, equipo, repetitividad de resultados, etc. Sin

embargo, hay otras preguntas fundamentales que necesitan discutirse, preguntas que seguramente fueron consideradas al desarrollarse la Guía AASHTO de 1986, pero que hasta ahora no han sido entendidas. Estas preguntas están relacionadas con la selección del valor “correcto” del módulo de resiliencia para ser usado en el diseño de pavimentos. Por lo tanto, el valor apropiado de módulo de resiliencia debe ser determinado para las condiciones que corresponden a la condición final del suelo y de acuerdo con el nivel de esfuerzo aplicado por un vehículo, idealmente, este sería el caso.

El tramo de prueba AASHTO fue construido cerca de Ottawa, Illinois, entre los años 1956 y 1958; las pruebas empezaron en octubre de 1958 y se terminaron a finales de 1960.

Con base en los estudios realizados en este tramo de prueba, se desarrolló el procedimiento de diseño de pavimentos de la guía AASHTO. Al adoptar las ecuaciones para diseño, la guía AASHTO simplemente utiliza una escala de soporte del suelo para representar los cambios de condiciones, sin definir completamente la escala o qué prueba debería ser utilizada con ésta.

De acuerdo con lo descrito en IMT (2001), con la guía de 1986, esa escala es abandonada y reemplazada por una relación basada en el módulo de resiliencia. Se utilizó un valor de 3000 psi para caracterizar a la subrasante del tramo de prueba ya mencionado. Por lo tanto, para que esta guía sea usada correctamente, el módulo de resiliencia de la subrasante debe de ser consistente con 3000 psi. En los apéndices de la guía AASHTO no se indica cómo fue obtenido ese valor, tal vez los primeros que sugirieron este valor fueron Skok y Finn (1962), que derivaron dicho valor a partir de los datos de deflexiones obtenidos con Viga Benkelman.

En 1962, en la primera conferencia internacional sobre diseño de pavimentos (llevada a cabo en Michigan), Seed et al (1962) (citado en (Drumm et al., 1990)) presentaron datos de pruebas de laboratorio sobre módulo de resiliencia de materiales empleados en la subrasante del tramo correspondiente a la prueba AASHTO. Dentro de los datos presentados se destacan los factores que influyen en la determinación de las características resilientes de una muestra de suelo, en los que juegan un papel muy importante la tixotropía, las condiciones de compactación y el nivel de esfuerzos aplicado.

Un ejemplo es la Figura 4, en la cual se puede observar la influencia del tipo de compactación en la determinación del módulo de resiliencia. Los datos mostraron el valor de 3000 psi como un valor razonable, si el esfuerzo desviador es mayor a 12 psi (82.8 kPa), cuando se compacta por amasado, o 25 psi cuando se utiliza compactación estática.

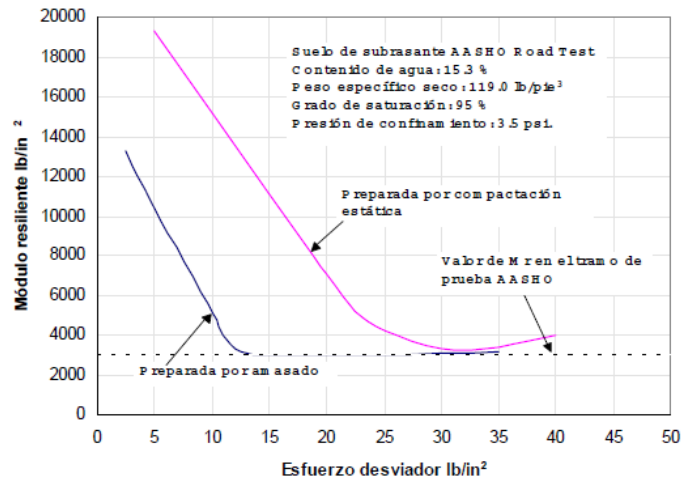


Figura 4. Prueba de módulo de resiliencia para la subrasante del tramo de prueba AASHO, reportadas por Seed et al. (1962). Fuente: Publicación Técnica N. 142, MT (2001)

Thompson y Robnett (Citado en IMT, 2001) reportaron un estudio más completo sobre el comportamiento resiliente de la subrasante del tramo de prueba AASHO. Ellos desarrollaron pruebas de módulo de resiliencia en suelos de Illinois (Figura 5). De los datos se puede concluir que 3000 psi es un valor apropiado para ese suelo cuando el contenido de agua es 1% mayor al óptimo y está sujeto a un esfuerzo desviador de 6 psi o más.

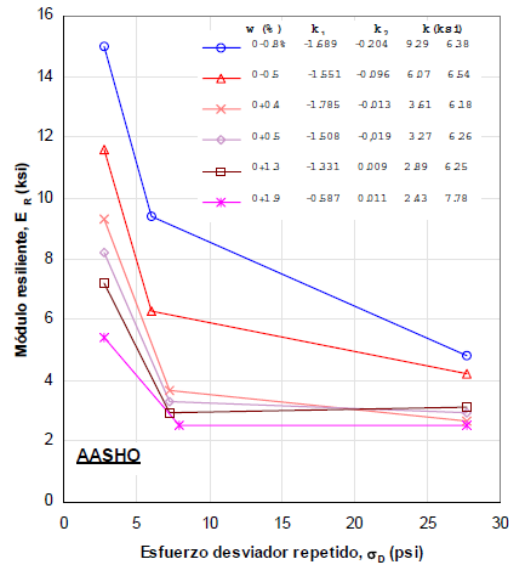


Figura 5 Módulos de resiliencia del tramo prueba AASHO reportados por Thompson y Robnett (1 ksi = 1000 psi). Fuente: Publicación Técnica N. 142, MT (2001)

Lo que no es discutido por Thompson y Robnett, (citado en IMT, 2001) es que los resultados obtenidos están basados en pruebas sin confinamiento. Sin embargo, el procedimiento actual de prueba AASHO recomienda utilizar una presión de confinamiento de 3 psi para un cierto rango de esfuerzos desviadores.

Finalmente, como el procedimiento de diseño de la Guía AASHO fue desarrollado como una modificación del comportamiento de la ecuación obtenida de los resultados del tramo de prueba AASHO, los datos de entrada deben de ser consistentes con las condiciones de prueba del tramo de prueba AASHO. Así entonces, el módulo de resiliencia debe ser determinado para niveles de esfuerzo desviador de 6 psi, o más, y en condiciones de compresión no confinada. De no ser así, la metodología puede conducir a secciones estructurales de pavimento subdiseñadas.

1.1.2 Determinación del módulo resiliente del suelo de subrasante a partir del estudio de deflectometría

La prueba de deflectometría es una forma rápida y fácil de evaluar la condición estructural de un pavimento en servicio de manera no destructiva. En la actualidad, se cuenta con

diversos equipos de medición, desde dispositivos simples como la viga con medidores de marcación mecánica, hasta equipos más sofisticados que utilizan tecnología basada en láser. Sin embargo, todos los equipos de prueba de deflexión del pavimento funcionan básicamente de la misma manera: se aplica una carga conocida al pavimento y la deflexión máxima resultante de la superficie o el conjunto de deflexiones de la superficie ubicadas a distancias fijas de la carga, conocido como cuenco de deflexión, son medidos de acuerdo con el siguiente esquema:

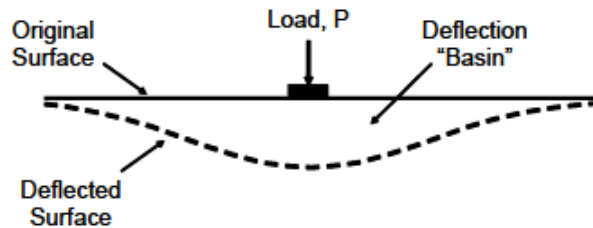


Figura 6 Diagrama típico de cuenco de deflexión. Fuente: (FHWA, 2017)

En general, existen tres métodos principales para realizar pruebas de deflexión: carga estática o cuasi-estática, carga en estado estacionario y carga por impulso o impacto. Seguidamente, se describen los fundamentos del método de carga por impulso, siendo el método empleado en el estudio de deflectometría objeto de la presente investigación.

La carga de impulso o por impacto, se realiza dejando caer un peso en varias alturas de caída para aplicar un impulso de carga, que varía de 6.7 a 120 kN (1,500 a 27,000 lbf), a la superficie del pavimento. Las deflexiones son medidas utilizando sismómetros, transductores de velocidad o acelerómetros. Los dispositivos de este tipo son conocidos como FWD.

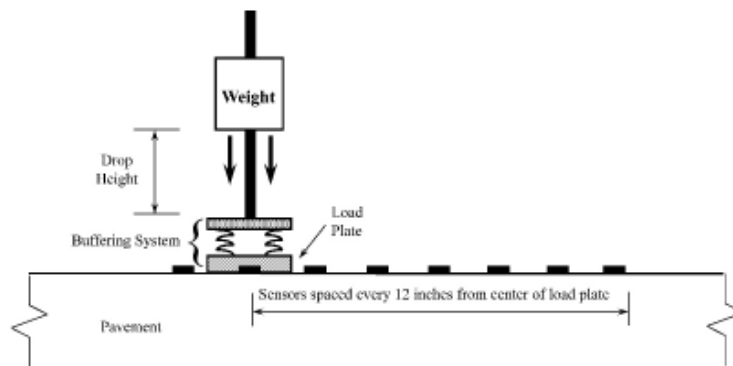


Figura 7 Diagrama esquema de prueba FWD. Fuente: (FHWA, 2017)

La frecuencia de medición de las pruebas depende de la longitud de la vía y el nivel de investigación o las exigencias de cada proyecto. Las pruebas pueden realizarse en la huella exterior del carril, en el centro del carril, o ambos.

El uso de pruebas no destructivas ha sido una herramienta efectiva en la evaluación de pavimentos tanto de aeropuertos como de carreteras. Las evaluaciones se utilizan para estimar la vida remanente y permisible del pavimento, así como para proporcionar datos en los cálculos de diseño. Se han desarrollado métodos (Bush & Alexander, 1985) de evaluación que han dado resultados razonables tanto para pavimentos rígidos como flexibles.

1.1.2.1 Ventajas y desventajas de los equipos de carga por impulso:

1.1.2.1.1 Ventajas

- Simulación realista de la carga real de la rueda.
- Alta productividad
- Capacidad para medir el cuenco de deflexión
- Capacidad para medir la transferencia de carga de juntas / grietas (pavimentos de concreto)

1.1.2.1.2 Desventajas

- Alto costo inicial (en caso de adquisición de equipo)
- Necesidad de control de tráfico (especialmente para trabajos nocturnos)
- Sistema electromecánico relativamente complejo.

1.1.2.2 Determinación del módulo por el método AASHTO

Según FHWA 2017, varios investigadores han desarrollado ecuaciones de regresión para predecir los módulos de capa a partir de datos de prueba de deflexión. Por ejemplo, Newcomb desarrolló ecuaciones de regresión para dos y tres capas de pavimento para

predecir el módulo de subrasante como parte de un esfuerzo general para desarrollar un procedimiento de diseño de superposición empírico-mecanicista para el Departamento de Wisconsin de Transporte; Horak también desarrolló una ecuación de regresión para predecir el módulo de subrasante utilizando la desviación a 2.000 mm (79 pulgadas) del centro de aplicación de la carga.

La ecuación más utilizada para predecir el módulo de subrasante es la presentada en la guía AASHTO 1993, la cual vincula la carga aplicada (P), en Lb (o N), la deflexión medida a la distancia r de la carga aplicada (dr) en pulgada (o mm) y la distancia radial a la cual se mide la deflexión (r), en pulgadas (o mm).

$$MR = \frac{0.24 P}{dr r}$$

Ecuación 2

1.1.2.3 *Análisis de los resultados de la deflectometría (retrocálculo de módulos)*

El retrocálculo es una evaluación mecanística, a través de la cual se busca la coincidencia, con algún margen de tolerancia, entre el cuenco de deflexión calculado mediante la aplicación de la teoría elástica y el cuenco producido en el pavimento por el equipo de medida de deflexiones (Figura 8). El proceso que involucra los módulos de las diversas capas del pavimento y la subrasante es normalmente iterativo y se resuelve con ayuda de un software utilizable en computadores.

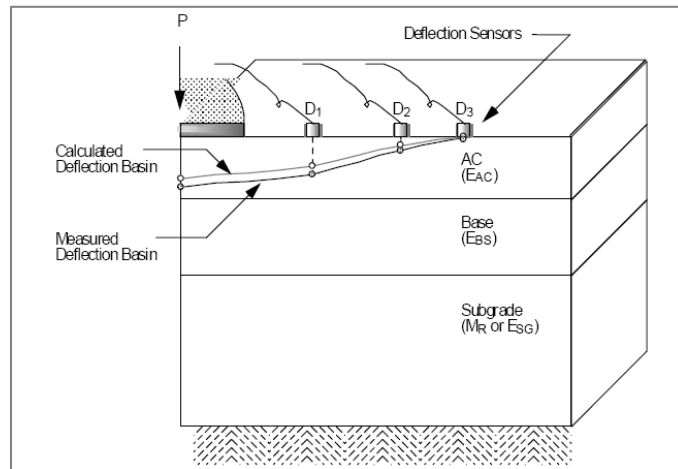


Figura 8 Cuenco de deflexión teórico y real. Fuente: (FHWA, 2017)

El retrocálculo se ejecuta con la secuencia que muestra el diagrama de flujo de la Figura 9 y comprende los siguientes pasos:

- Medida de las deflexiones a distintas distancias del punto de aplicación de la carga.
- Registro de la carga aplicada y de los espesores del pavimento en el sitio del ensayo.
- Introducción de módulos elásticos iniciales de las diversas capas de pavimento (módulos semilla), los cuales se escogen, bien a partir de la experiencia del diseñador o bien empleando algunas ecuaciones que permiten su estimación a partir de las deflexiones.
- Mediante algún programa de computador apropiado, se determina el cuenco de deflexión del modelo del pavimento.

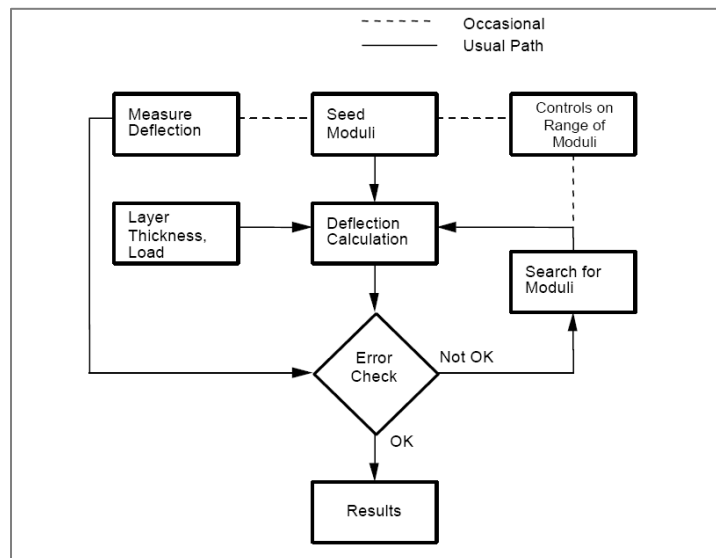


Figura 9 Diagrama de flujo de un proceso de retrocálculo. (FHWA, 2017)

El programa de retrocálculo compara el cuenco calculado con el medido en el sitio de ensayo y establece si existe o no una adecuada convergencia. La medida más utilizada para ello es la raíz del error medio cuadrático (RMS). Normalmente, se considera que la convergencia es adecuada si el RMS no es mayor de 1 o 2 % (INVIAS, 2008).

El primero programa multicapa disponible para modelar la respuesta estructural de pavimentos, fue el programa LAYER, desarrollado por la Chevron Oil Company (Michelow, 1963), el programa tenía ciertas limitaciones, ya que solo se podría usar una sola carga. LAYER se mejoró y se ha conocido comúnmente como CHEVRON, el cual permitió la definición de múltiples cargas, pero aun así no permitió fricción entre capas. ELSYM5 fue desarrollado por Ahlborn (1972) y se basa en el programa LAYER (ELSYM5).

Los recientes desarrollos en la evaluación no destructiva de pavimentos, han llevado al uso de los modelos en capas elásticas (Bush & Alexander, 1985). El análisis se realizó modelando el sistema de pavimento como un sistema equivalente de capas elásticas. La solución para un sistema multicapa, fue formulada por primera vez por Burmister (1943), y se limitó a un caso de dos o tres capas. En el trabajo de Burmister, Mehta y Veletsos (1959) se amplió el caso a n capas.

La teoría elástica multicapa predice la respuesta elástica a la carga estática o cuasi estáticas. Sin embargo, el uso de un sistema elástico equivalente puede ser útil al analizar cargas dinámicas y deflexiones. Mientras que el enfoque del análisis cuasi estático es ciertamente una correlación empírica aplicado a pruebas dinámicas no destructivas. Una gran cantidad de literatura ha indicado que las predicciones empíricas basadas en modelos elásticos lineales son útiles para la evaluación y cálculos de diseño. Para las predicciones de respuesta de las cargas de prueba no destructiva, el método típico es modelar la carga dinámica máxima como una carga cuasi estática equivalente y asumir que el cuenco de deflexión elástica equivalente calculada es una buena aproximación de la envolvente de las deflexiones máximas medidas.

La investigación por Bodare y Orrje (1985) indicó que el módulo dinámico teórico de una prueba de carga dinámica que simula la carga de una llanta, se acerca al módulo estático teórico, cuando el tiempo de aplicación de carga máxima es relativamente largo. Aunque el tiempo que se consideraría largo, está en función de varios factores, incluidas las propiedades del material y el radio de carga, Bodare y Orrje (1985) presentaron un ejemplo utilizando las propiedades típicas del sistema, lo que indica que el tiempo necesario para alcanzar el pico fue de unos 10 milisegundos, menor al tiempo para alcanzar el pico con el deflectómetro de impacto.

El modelo elástico lineal multicapa tiende a dar deflexiones más grandes y valores picos dinámicos superiores a los medidos cuando se supone que la capa inferior es semi-infinito. Investigaciones anteriores (Bush 1980), han indicado que la relación entre las deflexiones elásticas predichas y las deflexiones dinámicas medidas, se asemejan, si se incluye una capa rígida en el sistema elástico equivalente a una profundidad de 20 pies. Aunque este supuesto es una correlación empírica, otros investigadores (Roesset y Shao 1985, Mamlouk 1985) han apoyado el uso de este supuesto.

Los programas de retrocálculo de mayor utilización se basan en una aplicación iterativa inversa de la teoría de elasticidad en sistemas de capas. Ejemplos de ellos son BISDEF, ELSDEF, CHEVDEF y EVERCALC, los cuales se basan en los programas BISAR, ELSYM5, CHEVRON y WESLEA, respectivamente.

La Figura 10 presenta un ejemplo del esquema e información requerida para el proceso de retrocálculo, para un sistema de cuatro (4) capas, a partir de las medidas de deflexión con el FWD en un punto del pavimento.

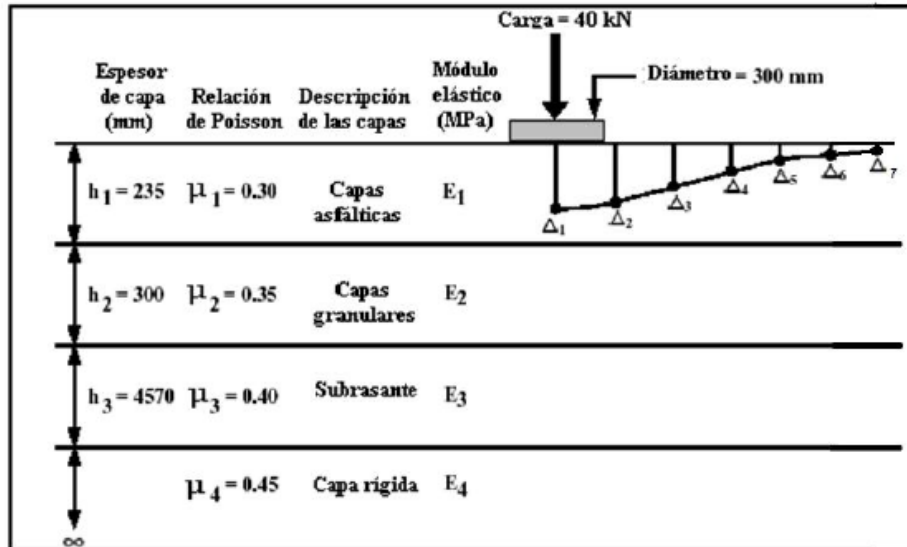


Figura 10 Esquema del pavimento para el proceso de retrocálculo. Fuente: (INVIAS, 2008)

1.1.2.3.1 Métodos de retrocálculo

Un gran número de programas de computación para el retrocálculo de módulos se ha desarrollado a partir de datos de ensayos no destructivos. Basados en la literatura disponible (FHWA, 2017), se indica que todos los algoritmos empleados se pueden agrupar en tres métodos generales.

- Métodos simplificados,
- Métodos de relajación de gradiente, y
- Métodos directos de interpolación

La Figura 11 presenta un esquema de la zona del pavimento que queda sometida a esfuerzos bajo la carga de un equipo de medida de deflexión de tipo dinámico (por vibración o por impacto). Cuando la carga es aplicada, dicha zona se extiende a través de una porción de la estructura, como lo muestra la parte cónica de la figura. La pendiente de los lados de esta zona, que varía entre una capa y otra, está relacionada con el módulo de la capa (a

medida que el material es más rígido, el esfuerzo se distribuye sobre un área mayor) (INVIAS, 2008).

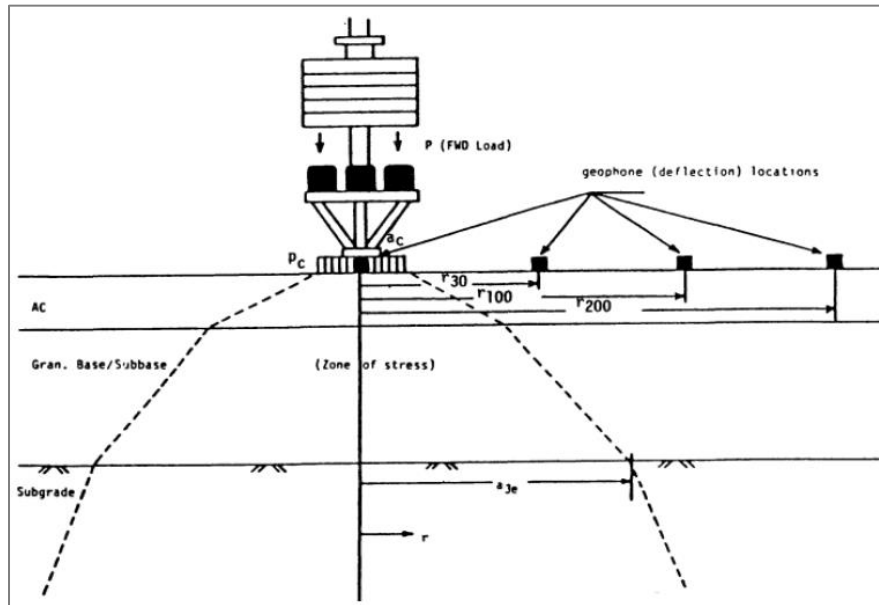


Figura 11 Esquema de la zona de esfuerzos en el pavimento bajo la carga de un equipo dinámico. Fuente: (FHWA, 2017)

Para determinar los valores de los módulos dinámicos a partir de las deflexiones, se considera que el pavimento es un sistema elástico de capas múltiples, del cual se requieren conocer los espesores de las capas y las relaciones de Poisson de los materiales que las constituyen. Los primeros se establecen a través de las perforaciones y de la auscultación con georradar, mientras que las segundas pueden ser calculadas o asumidas en función de los materiales constitutivos de las capas.

Los módulos dinámicos de las capas de un pavimento asfáltico se pueden estimar a partir de las deflexiones mediante tres procedimientos básicos: (i) retrocálculo, (ii) cálculo directo y (iii) ecuaciones de regresión. Los valores obtenidos con cada uno de ellos suelen ser diferentes, por lo que el buen juicio ingenieril será determinante en la elección del más apropiado para cada caso particular.

Otro método es el denominado método de espesor equivalente (MET), el cual se basa en la suposición de Odemark, en el cual, a partir de las deflexiones de un pavimento multicapa

se puede obtener un sistema con módulos E_i y espesores de capa h_i utilizando una sola capa de espesor H y el módulo E . ELMOD3 es un ejemplo de un programa que utiliza el método Odemark-Boussinesq, el cual emplea el concepto de espesor equivalente de capa y el método del radio de curvatura; las propiedades de rigidez del material de subrasante y su comportamiento no lineal, se calculan utilizando las desviaciones de los sensores externos. BOUSDEF es otro programa que usa el método MET.

El concepto de módulo de superficie es muy útil para estimar el módulo de subrasante y para diagnosticar si el material de subrasante es sensible al esfuerzo (comportamiento no lineal) y la presencia de capas rígidas.

Los programas de cálculo directo se utilizan para generar una base de datos de cuencos de deflexión para diferentes combinaciones de módulos de capa, espesores de capa especificados, propiedades del material, tipos de pavimento y condiciones de carga. Los cuencos de deflexión medidos se comparan con los cuencos de deflexión en la base de datos mediante una búsqueda de algoritmo, y un conjunto de módulos se interpolan a partir de los módulos de capa que producen el más cercano al cuenco de deflexión calculado en la base de datos. Dentro de este sistema de cálculo se encuentran los programas MODULUS y WESDEF.

1.1.3 Relaciones entre el módulo resiliente de laboratorio y el determinado por proceso de retrocálculo

La guía AASHTO permite el uso tanto de ensayos de laboratorio como módulos retrocalculados in situ, pero reconoce que los módulos determinados en ambos procedimientos no son iguales. La guía sugiere que el módulo de subrasante determinado a partir de los cuencos de deflexión, medido en la superficie del pavimento, se ajuste por un factor de 0,35. (NCHRP, 2004).

Hay muchos factores que pueden contribuir a la diferencia entre módulo de laboratorio y el retrocalculado. Una de las razones es la dificultad de obtener muestras representativas de campo debido a la variabilidad inherente de la capa de subrasante. Chou y Lytton (1991) (Citado en Gopalakrishnan, 2009), atribuyen la diferencia en la asignación de parámetros

de entrada en programas de retrocálculo, a una variación sustancial en los valores del módulo. Una buena discusión de las diferencias entre el módulo de laboratorio. M_R y módulos retrocalculado E_{back} se presenta en Houston, Mamlouck, & Perera, 1992 .

Debido a la complejidad del procedimiento de prueba de laboratorio para la determinación del M_R , las agencias de carreteras han estado explorando pruebas no destructivas, como el deflectómetro de impacto. En el estudio "Falling Weight Deflectometer for Estimating Subgrade, (Rahim & George, 2003), se estudiaron 12 secciones de prueba con diferentes tipos de subrasante, suelos de grano fino y grueso, realizando mediciones de deflectometría y toma de muestras en tubos Shelby de pared delgada hasta una profundidad de 1,5 m para las pruebas de laboratorio (M_R).

El procedimiento consistió en mediciones de FWD directamente en el suelo de subrasante y después de la construcción de la estructura de pavimento. Estos resultados facilitaron una comparación uno a uno de módulos de laboratorio y dos ciclos de retrocálculo de módulos a partir del estudio de FWD.

Los resultados de las pruebas de laboratorio muestran de manera concluyente que el suelo de la subrasante en las 12 secciones de prueba es bastante heterogéneo, mostrando más variación espacial que con la profundidad.

Como conclusión se obtiene, que para un amplio espectro de suelos, el valor del módulo retrocalculado a partir de las mediciones de deflexiones con FWD directamente sobre la subrasante coincide con el valor de módulo determinado en el laboratorio (M_R). Cuando la medición se hace sobre la estructura de pavimento, el módulo de la subrasante retrocalculado E_{back} aumenta en un 40% para suelos finos, mientras que el aumento es del 100% para suelos de grano gruesos, esto es debido principalmente al confinamiento resultante de la conformación de las diferentes capas de la estructura de pavimento.

Los resultados de este estudio, aunque tentativos, sugieren fuertemente una necesidad de reevaluar el factor $C = 0.33$ sugerido por la Guía AASHTO (1993) para calcular el M_R de laboratorio a partir de valores retrocalculados.

Ali & Khosla, 1987 , evaluaron tres secciones de pavimento en una carretera primaria en Carolina del Norte; se tomaron muestras de material de las secciones de pavimento para prueba de laboratorio, analizando las propiedades mecánicas de los materiales del pavimento; dichas muestras fueron ensayadas a diferentes condiciones ambientales. La relación de los módulos de laboratorio y los retrocalculados por deflectometría variaron según se indica a continuación:

- Utilizando el modelo VESYS se tuvo la menor variación respecto a los valores de laboratorio, con una relación MR_{lab}/ MR_{pred} entre 0.48 y 1.08 y la mayoría de los valores entre 0.77 y 0.97.
- Los valores para ELMOD variaron entre 0.54 y 1.56, con la mayoría de los valores entre 0.80 y 1.26.
- Las mayores variaciones en la relación de MR_{lab}/ MR_{pred} fueron exhibidas por los valores de los modelos MODCOMP2 y OAF. La relación de MR_{lab}/ MR_{pred} para MODCOMP2 varió de 0.1 a 18.2 con la mayoría de estos valores entre 0.55 y 5.61.
- La relación MR_{lab}/ MR_{pred} para OAF osciló entre 0.18 y 14.80, con la mayoría de los valores entre 0.32 y 9.80.

De lo anterior, se puede ver que los modelos de VESYS y ELMOD son los más adecuados para la predicción de los módulos de las capas del pavimento.

Newcomb (1987) presento los resultados de pruebas similares para el estado de Washington. Las deflexiones del equipo FWD Dynatest se midieron con cuatro niveles de carga y los módulos correspondientes se calcularon utilizando el programa Chevron N-layer P y el procedimiento de iteración desarrollado por Bush (1980). Para el nivel de esfuerzos la relación de los valores de laboratorio a los módulos de campo estaba en el rango de 0.8 y 1.3 para los materiales de subrasante. Por otro lado, Von Quintus y Killingsworth (1998) reportaron un rango de relación entre 0.1 a 3.5.

Bonaquist et al. (1986) (citado en utilizó un enfoque diferente. En lugar de retrocalcular los valores de módulo a partir de datos de deflexión, los valores determinados por laboratorio se utilizaron en un programa de teoría de capas elásticas para calcular deflexiones. Las

deflexiones calculadas se compararon con las deflexiones medidas con una viga Benkelman, un plato de carga y un FWD Dynatest. Los detalles de la investigación son demasiados extensos, sin embargo, las conclusiones son muy significativas, en cuanto al procedimiento de prueba de laboratorio para llegar al módulo, el cual podría emplearse para predecir de manera confiable las deflexiones medidas con cualquier dispositivo de medida de deflexión.

Houston et al. (1992), realizó un estudio comparativo bastante extenso de laboratorio, comparando valores de módulo de laboratorio versus valores de campo como parte de un proyecto de Universidad Estatal de Arizona (ASU) para el Departamento de Transporte de Arizona, Phoenix, Arizona, (Mamlouk, Houston, Houston, & Zaniewski, 1988). Veinte sitios en Arizona fueron seleccionados para pruebas de campo y recolección de muestras para pruebas de laboratorio.

Las pruebas de campo incluyeron mediciones de deflexiones con FWD y pruebas de penetración de cono (PDC) en muestras de subrasante no alteradas, así como muestras alteradas de materiales de base, subbase y subrasante. Las muestras no alteradas de subrasante se sometieron a pruebas de módulo elástico y las muestras alteradas se analizaron para determinar el contenido de humedad, la gradación y límites de Atterberg. Los valores de módulos calculados fueron aproximadamente 1.5 veces los valores de laboratorio, en promedio. En el caso de las muestras de subrasante, se concluyó que la principal causa de las diferencias entre los módulos de laboratorio y los valores de campo (retrocalculados) se relacionaron con los diferentes volúmenes de material probado en ambos procedimientos.

Una buena relación entre los módulos de laboratorio y los medidos en campo no existe si se sigue la práctica habitual de muestrear y probar solo 1 o 2 pies de profundidad (0,3 o 0,6 m) del subsuelo, debido a que se prueban diferentes volúmenes de material; la heterogeneidad en cualquier capa contribuye a diferentes módulos. También se concluye que el costo de determinar los módulos mediante pruebas de módulo resiliente de laboratorio es típicamente 60-80 veces mayor que el costo de un programa de pruebas de campo equivalente con FWD

Debido al alto costo de los ensayos de laboratorio, se llega a la conclusión de que el uso de NDT con FWD y retrocálculo de módulos es el enfoque apropiado para la caracterización de materiales para el diseño de pavimentos, cuando hay capas construidas sobre la misma subrasante. Esta conclusión no significa que las pruebas de módulo de resiliente de laboratorio no tienen lugar en el diseño de pavimento; el papel apropiado de este tipo de pruebas de laboratorio es en la investigación, ya que representan la forma más eficiente de estudiar los efectos de ciertos parámetros sobre los módulos del material.

Petersen, Wahr y Palma (Leal Noriega, 2010), investigaron en Chile la relación entre el módulo resiliente (M_R) obtenido en ensayos de laboratorio y el obtenido mediante retrocálculo de deflexiones medidas con deflectómetro de impacto. El estudio se realizó sobre una estructura de pavimento flexible, encontrando materiales de subrasante de tipo granular con presencia de limo y arcilla, sobre los cuales se estimaron 12 puntos para medidas de deflexión.

Una vez realizadas las mediciones de deflexión, se procedió al análisis de éstas mediante el método propuesto por AASHTO, obteniendo de esta forma el módulo resiliente retrocalculado. En el laboratorio se ejecutaron 24 ensayos de módulo resiliente, dos por cada punto donde se midieron las deflexiones. Con base en los resultados obtenidos se propuso un factor de ajuste igual a 0,45, formulando la siguiente relación:

$$MRL = 0.45 * MRR$$

Ecuación 3

Donde:

MRL: Módulo resiliente hallado en laboratorio.

MRR: Módulo resiliente obtenido por retrocálculo.

Por otra parte, Fuentes, Sepúlveda y Gaete, mencionados en Leal Noriega (2010), al igual que investigadores chilenos, realizaron un procedimiento similar seleccionando 5 sitios para realizar los ensayos, donde se obtuvieron 3 muestras de suelos gruesos (material granular) y 6 muestras de suelos finos (arena, arcilla y limo), que posteriormente se ensayaron según la guía AASHTO T294-92.

Paralelo al muestreo se midieron las deflexiones con FWD, realizando un total de 9 pruebas, la misma cantidad de ensayos de módulo resiliente ejecutados en laboratorio.

Los resultados obtenidos están discriminados según el tipo de suelo, así:

Correlación para suelos finos:

$$\text{MRL} = 0.94 * \text{MRR}$$

Ecuación 4

Correlación para suelos gruesos:

$$\text{MRL} = 0.90 * \text{MRR}$$

Ecuación 5

MRL: Módulo resiliente hallado en laboratorio.

MRR: Módulo resiliente obtenido por retrocálculo.

Otros investigadores como George (2003), citado en Leal Noriega (2010), recomendaron, a partir de su trabajo realizado en la ciudad de Mississippi, el uso de los siguientes factores de corrección, según el tipo de suelo existente en la subrasante: 0,65 para suelos finos y 0,51 para suelos granulares.

Por su parte, estudios realizados por Guzmán Suarez (2017), el Módulo Resiliente de la subrasante retrocalculado (Mrr) y el Módulo Resiliente medido en laboratorio (Mr) no son iguales por varias razones. La principal razón es que las presiones de confinamiento uniforme y los esfuerzos verticales repetidos usados durante el ensayo en laboratorio, no simulan realmente el confinamiento y estado de esfuerzos a que se ve sometida la subrasante al ser solicitada por la carga del FWD o las ruedas de los vehículos.

Algunos de los aspectos mencionados en cuanto a las relaciones entre el M_R y el módulo retrocalculado son citados por Guzmán Suarez y se resaltan a continuación:

- Basados en los resultados de AASHTO, los departamentos de transporte de diferentes estados han realizado investigaciones independientes, tendientes a desarrollar su propia calibración del factor de ajuste, con el fin de mejorar la eficiencia en el diseño de rehabilitación de pavimentos y reflejar las prácticas locales. Los resultados se presentan en la Tabla 3 (Ng, Kam & Hellrung, Daniel & Ksaibati, Khaled & S. Wulff, Shaun, 2016)

Tabla 3. Factor de ajuste empleado por diferentes Agencias de Transporte en Estados Unidos

| Agencia | Factor de ajuste – C | Observación |
|--|----------------------|-----------------------------|
| AASHTO | 0.33 | |
| Departamento de Transporte de Colorado | 0.52 | |
| Departamento de Transporte de Idaho | 0.35 | |
| Departamento de Transporte de Missouri | 0.35 | |
| Departamento de Transporte de Montana | 0.50 | |
| Departamento de Transporte de Utah | 0.55 | Para suelos fino-granulares |
| | 0.67 | Para suelos granulares |
| Departamento de Transporte de Wyoming | 0.645 | |

Fuente: (Guzmán Suarez, 2017)

- *El Estudio experimental Realizado en la Universidad Técnica Federico Santa María – Chile*, consistió en comparar el Módulo Resiliente de subrasante obtenido mediante el deflectómetro de impacto y el obtenido en laboratorio. Los suelos evaluados en este estudio fueron clasificados como A-2-4 y A-2-6, en el sistema AASHTO. Con base en los resultados obtenidos, se propone un factor de ajuste $C=0.45$ para estimar el módulo resiliente de laboratorio a partir del módulo retrocalculado de deflexiones medidas con el FWD (Petersen, Wahr, Palma, Castro, & Albornoz, n.d.).
- *En el Estudio de la Universidad del Estado De Michigan*, para cada tipo de suelo evaluado según la Tabla 4, se presenta la relación entre el valor del módulo resiliente retrocalculado promedio, usando los datos de las medidas de deflexiones y el promedio obtenido en el laboratorio (Baladi, Dawson, & Sessions, 2009).

Tabla 4. Factor de ajuste para suelos de subrasante de acuerdo con el tipo de suelo

| Sistema de clasificación | | Resultados de laboratorio | | Resultados del retrocálculo | | Factor de ajuste - C |
|--------------------------|--------|---------------------------|-----------------|-----------------------------|------------------|----------------------|
| SUCS | AASHTO | Número de ensayos | Mr promedio MPa | Número de ensayos | Mrr promedio MPa | |
| SP1 | A-1-a | 16 | 199 | 1499 | 190 | 0.96 |
| | A-3 | | | | | |
| SP2 | A-1-b | 10 | 176 | 563 | 172 | 0.98 |
| | A-3 | | | | | |
| SP-SM | A-1-b | 8 | 145 | 364 | 140 | 0.96 |
| | A-2-4 | | | | | |
| | A-3 | | | | | |
| SC-SM | A-2-4 | 7 | 160 | 1924 | 139 | 0.87 |
| | A-4 | | | | | |
| SC | A-2-6 | 16 | 129 | 1517 | 147 | 1.14 |
| | A-6 | | | | | |
| | A-7-6 | | | | | |
| SM | A-2-4 | 17 | 117 | 370 | 170 | 1.45 |
| | A-4 | | | | | |
| CL | A-4 | 9 | 256 | 774 | 104 | 0.41 |
| | A-6 | | | | | |
| | A-7-6 | | | | | |
| ML | A-4 | 4 | 169 | 23 | 110 | 0.65 |
| Promedio | | | | | | 0.93 |

Fuente: (Guzmán Suarez, 2017)

- En el Estudio Instituto de Transporte de Texas (Oh, Fernando, Holzschuher, & Horhota, 2011) se documentan los estudios hechos para evaluar los factores de corrección aplicables a los materiales para pavimentos en Florida. El proyecto recomienda los factores de ajuste para determinar el módulo equivalente de laboratorio relacionado con el módulo retrocalculado en materiales de base, subrasante estabilizada y terraplén. El factor de ajuste fue evaluado a diferentes profundidades en cada una de las capas; sin embargo, aunque pruebas estadísticas de significancia mostraron diferencias entre los factores determinados a diferentes profundidades, la magnitud de estas diferencias dentro de un intervalo de confianza del 95 % no fue lo suficientemente significativa, por lo que se optó por combinar los datos del factor de ajuste determinados en las diferentes profundidades de cada capa, con el fin de generar los siguientes modelos de regresión del factor de corrección en función del módulo retrocalculado de cada capa.

- ✓ Capa de base

$$C = 10.503 * M_{rr}^{-0.855}$$

Ecuación 6

- ✓ Capa de subrasante estabilizada

$$C = 8.041 * M_{rr}^{-0.848}$$

Ecuación 7

✓ Capa de terraplén

$$C = 7.837 * M_{rr}^{-0.833}$$

Ecuación 8

Donde:

C: Factor de ajuste

M_{rr} : Módulo resiliente retrocalculado

Leal Noriega (2010) presenta el estudio de investigación, el cual se desarrolló en un proyecto de maestría en el año 2010 en la Ciudad de Bogotá. En él, se realizó la evaluación estructural del pavimento en 8 puntos de ensayo mediante deflectometría, y se comparó los módulos para cada una de las capas con los obtenidos en los ensayos de laboratorio. El estudio encontró que, para el material de subrasante, que correspondió a un material granular remanente, el factor de ajuste para el módulo es de 0.65; para el material de subbase granular es igual a 0.24; y para el material de base granular, es igual a 0.17.

Estudios realizados a nivel de Colombia (Guzmán & Higuera, 2016), en suelos finos de subrasante con comportamiento típico, el módulo resiliente debe aumentar con la profundidad a la que se evalúe, y la relación entre el módulo de retrocálculo y de laboratorio debe ir aumentando; es decir, que en un punto bajo de la subrasante estos dos módulos coinciden.

En este estudio en particular, se encontró que el factor que representa la relación entre el módulo resiliente de laboratorio con el obtenido por retrocálculo con el método AASHTO (1993) es 0,37. Al caracterizar la resistencia de la subrasante mediante el método de Rohde (1994), el factor de ajuste por utilizar es 0,63.

1.1.4 Estimación del módulo resiliente de la subrasante a partir del ensayo de CBR

Terzaghi (1955), (citado en (Eka Putri, V Kameswara Rao, & Mannan, 2012)), propuso una correlación empírica entre CBR y E como se muestra en la Figura 12 (Jones, 1997). La Figura 12 también presenta las correlaciones empíricas entre el módulo de elasticidad, E

con CBR que han sido resueltas por Heukelom y Klomp (1962), NAASRA (1950) y Powell, Potter, Mayhew y Nunn (1984) (citados en Eka et al. 2012).

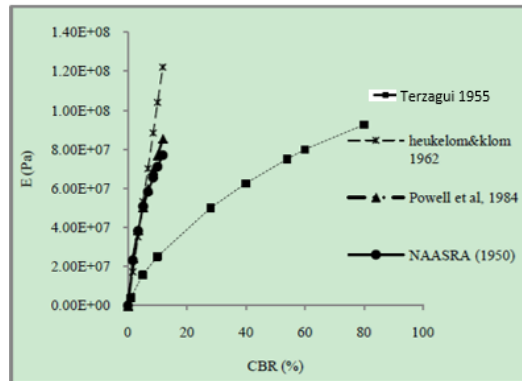


Figura 12 CBR Versus Módulo de Elasticidad. Fuente: Eka et al. (2012)

Heukelom y Klomp (1962) estudiaron la correlación de CBR con E y propusieron una relación empírica como:

$$E = 1500 \text{ CBR (psi)}$$

Ecuación 9

Por otra parte, Powell, Potter, Mayhew, & Nunn (1984), proponen una correlación entre el CBR y el módulo, E (aplicada para suelos con CBR entre el 2 y 12%):

$$E = 17.6 \text{ CBR}^{0.64} \text{ (MPa)}$$

Ecuación 10

NAASRA (1950), ha dividido en dos partes la correlación entre E y CBR:

La primera para CBR menores a 5%:

$$E = 16.3 \text{ CBR}^{0.7} \text{ (MPa)}$$

Ecuación 11

La segunda para CBR mayores de 5%:

$$E = 22.4 \text{ CBR}^{0.5} \text{ (MPa)}$$

Ecuación 12

De acuerdo con lo establecido en el estudio de Eka et al. (2012), para desarrollar el procedimiento para correlacionar el resultado de CBR con la relación entre la carga y la deflexión de diferentes suelos con varios valores de módulos, E, se utiliza el método de elementos finitos para modelar la prueba de CBR con el parámetro de entrada obtenido de las pruebas de laboratorio. Este método ofrece un enfoque racional para desarrollar la correlación de CBR frente a E. Las correlaciones de CBR vs. E se presentan en la Figura 13. Las correlaciones desarrolladas por otros autores también se presentan en la comparación.

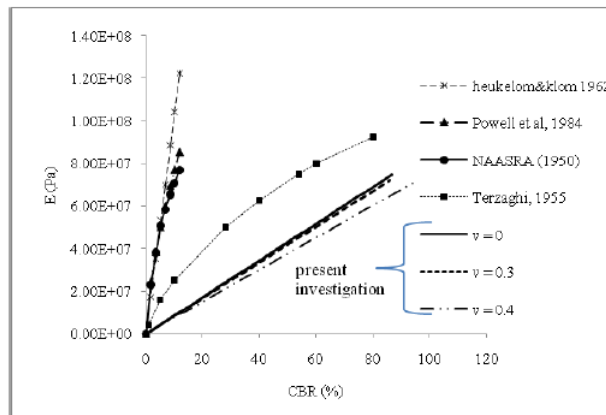


Figura 13 CBR Versus E obtenidos a partir de diferentes relaciones de Poisson. Fuente: Eka et al. (2012)

El resultado de la correlación del estudio de Eka et al. (2012), es cercano al resultado de Terzaghi (1955), mientras que la correlación realizada por Heukelom y Klomp (1962), NAASRA (1950) y Powell, Potter, Mayhew y Nunn (1984) difieren considerablemente, probablemente debido a que su naturaleza es empírica. De la Figura 13, las correlaciones entre E y CBR de la investigación son las siguientes:

$$E = 863.82 \text{ CBR (kPa)}, \nu = 0$$

Ecuación 13

$$E = 840.53 \text{ CBR (kPa)}, \nu = 0.3$$

Ecuación 14

$$E = 751 \text{ CBR (kPa)}, \nu = 0.4$$

Ecuación 15

De acuerdo con lo descrito por Maher, Bennert, Gucunski, & Papp (2000), el Instituto de Asfalto (1982) desarrolló la siguiente ecuación para calcular módulo elástico M_R :

$$M_R = 1155 + 555 (\text{CBR})$$

Ecuación 16

Según Dione, Fall, Berthaud, Benboudjema, & Michou (2015), La primera relación entre el módulo resiliente y CBR fue desarrollado por Heukelom y Foster, además de las pruebas dinámicas en varios tipos de suelo de plataforma. Los resultados llevaron a la siguiente relación:

Tabla 5. Correlaciones M_R Vs CBR

| Referencia | Correlación |
|--|---|
| Shell Oil (Heukelom and Foster 1960) | $M_r = 1500 \text{ CBR (psi)}$ $M_r = 10 \text{ CBR (MPa)}$ |
| U.S.Army Corps of Engineers (USACE) (Green and Hall 1975) | $M_r = 5409 \text{ CBR}^{0.711} \text{ (psi)}$ $M_r = 37.3 \text{ CBR}^{0.71} \text{ (MPa)}$ |
| South African Council on Scientific and Industrial Research (CSIR) | $M_r = 3000 \text{ CBR}^{0.65} \text{ (psi)}$ |
| Powel | $M_r = 2554 \text{ CBR}^{0.64} \text{ (psi)}$ CBR entre 1 – 12% |
| Transport and Road Research Laboratory (TRRL) (Lister 1987) | $M_r = 2555 \text{ CBR}^{0.64} \text{ (psi)}$ |

Fuente: Elaboración Propia, Adaptado de Dione et al. (2015)

Según la Tabla 5, se muestra que hay una gran cantidad de relaciones entre el módulo resiliente y CBR. Para ver su comparativo, se genera la Figura 14 y el análisis de la variabilidad de resultados que se pueden obtener.

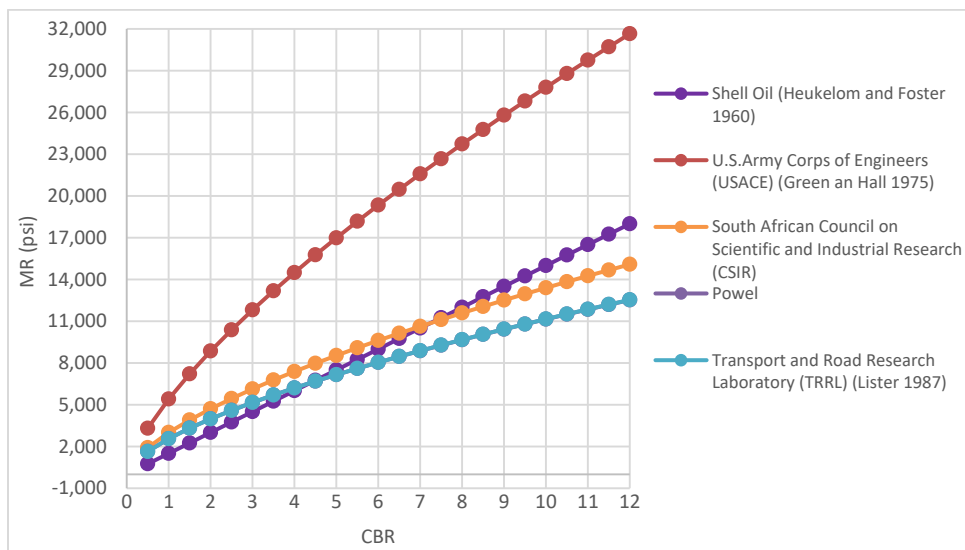


Figura 14 Comparativo resultados correlaciones M_R vs CBR

A partir de los módulos obtenidos para diferentes valores de CBR (entre 0.5 y 12.0 %) empleando las correlaciones anteriores (ver Figura 14), la correlación U.S. Army Corps of Engineers (USACE), presenta valores mayores de módulo con relación a las demás correlaciones, desde el valor de CBR de 0.5%. Se puede observar un punto de quiebre aproximadamente en el CBR de 5% entre las correlaciones de Powel y TRLL, cambiando su tendencia a disminuir para esta última. Al igual, se puede observar un punto de intersección aproximado en el valor de CBR del 7%, entre Powel y CSIR.

En cuanto a los valores medios obtenidos y comparados con el valor medio más bajo para el grupo de CBR entre 0.5 y 12%, correlación Powel, las demás correlaciones tienen una variación entre el 12% (Shell Oil) y el 59% (USA Army).

Así mismo, basados en la Figura 15 presentada por la Shell (1978), la relación entre el módulo de la subrasante y el CBR, puede estar entre 5 y 20 (MPa); no obstante, la Shell propone un valor de 10, de modo que el valor del MR puede ser entre la mitad y el doble del propuesto. Por ejemplo, para un valor de CBR del 6%, el módulo de la subrasante varía entre 30 y 120 MPa, lo que indica un comportamiento con gran dispersión.

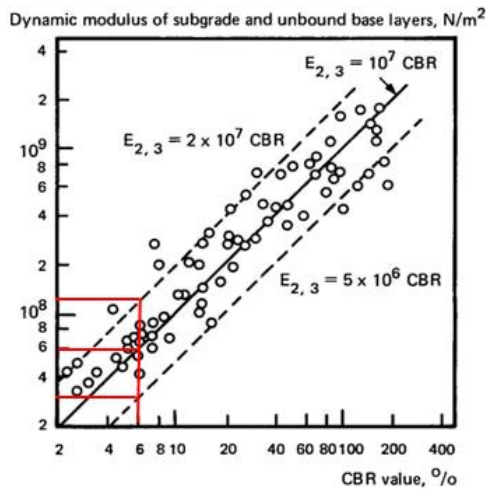


Figura 15 Grafica de Correlación MR vs CBR. Fuente: Shell (1978)

Las correlaciones determinadas por Uzan (1985) y NCHRP (2004), se basan en el análisis estadístico y pruebas de significación para su eventual establecimiento. Los resultados permiten establecer la siguiente relación con un R^2 de 0.69 para el modelo de Uzan y un R^2 de 0.66 para el modelo NCHRP:

$$M_r = 91.226 + 0.017 \times (\text{CBR})^2 \quad (\text{Uzan, 1985})$$

Ecuación 17

$$M_r = 99.720 + 0.019 \times (\text{CBR})^2 \quad (\text{NCHRP, 2004})$$

Ecuación 18

El modelo de Uzan es aplicable en capas de base para el diseño utilizando el método de elementos finitos.

En la NCHRP (2004), se detallan las correlaciones generales que describen la relación entre el índice de suelo y las propiedades de resistencia y que pueden ser usadas para estimar el M_R . Las relaciones podrían ser directas o indirectas. Por las relaciones indirectas está primero la relacionada con el CBR y luego el CBR está relacionada con los modelos de M_R , tal como se ilustra en la siguiente tabla:

Tabla 6. Modelos que relacionan el índice del material y propiedades mecánicas a M_r

| Strength/Index Property | Model | Comments | Test Standard |
|--------------------------|---|---|---|
| CBR | $M_r = 2555(\text{CBR})^{0.64}$ (TRL) Mr, psi | CBR = California Bearing Ratio, percent | AASHTO T193, "The California Bearing Ratio" |
| R-value | $M_r = 1155 + 555R$ (20) Mr, psi | R = R-value | AASHTO T190, "Resistance R-Value and Expansion Pressure of Compacted Soils" |
| AASHTO layer coefficient | $M_r = 30000 \left(\frac{a_i}{0.14} \right)^{20}$ Mr, psi | a_i = AASHTO layer coefficient | AASHTO Guide for the Design of Pavement Structures |
| PI and gradation* | $\text{CBR} = \frac{75}{1 + 0.728(wPI)}$ (see Appendix CC) | wPI = P200*PI P200= percent passing No. 200 sieve size PI = plasticity index, percent | AASHTO T27, "Sieve Analysis of Coarse and Fine Aggregates" AASHTO T90, "Determining the Plastic Limit and Plasticity Index of Soils" |
| DCP* | $\text{CBR} = \frac{292}{\text{DCP}^{1.12}}$ | CBR = California Bearing Ratio, percent DCP =DCP index, mm/blow | ASTM D 6951, "Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications" |

*Estimates of CBR are used to estimate M_r .

Fuente: NCHRP (2004)

Para el caso de la correlación entre el CBR y wPI de la AASHTO T-27, se obtiene un coeficiente de determinación, R^2 , de 0.67; sin embargo, se puede observar una base de datos limitada.

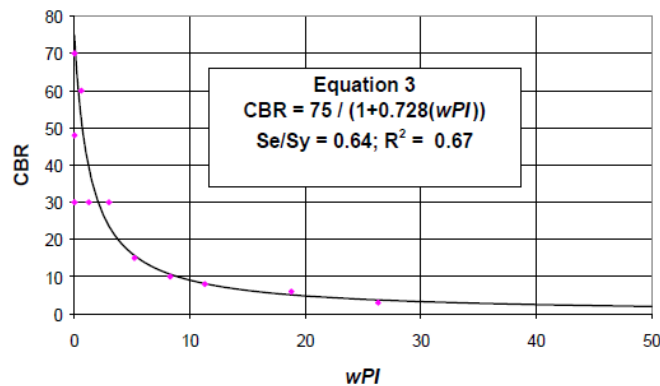


Figura 16 Correlación CBR vs plasticidad de los materiales. Fuente: NCHRP (2001)

Por consiguiente, y dado lo mencionado en la presente revisión bibliográfica, surge la necesidad de evaluar una correlación entre los valores de CBR, ensayo empleado muy comúnmente en Colombia en el diseño y rehabilitación de pavimento, y los módulos retrocalculados con FWD (mediciones in situ) o deflexiones, con el fin de evaluar las condiciones propias en terreno y tipos de suelos en Colombia, debido a los pocos estudios encontrado valorando estas dos variables.

1.2 Correlaciones CBR y FWD

Varias autoridades estatales de carreteras en Australia han desarrollado métodos para estimar valores de CBR de la subrasante a partir de datos de deflexión FWD (Austroad, 2004). Estos métodos generalmente son empíricos y pueden proporcionar valores indicativos para ciertos tipos de suelos. Como menciona Chai, (Chai et al., 2013), las deflexiones registradas en el sensor D_{900} , ubicadas a 900 mm del centro de la placa de carga, son las que generalmente se emplean en los modelos.

Tres modelos basados en la deflexión son comúnmente utilizados en Australia; estos modelos fueron desarrollados por Jameson (1993), Roberts et al (2006) y Queensland Department of Main Roads (QDMR, 1992), citados en Chai et al 2013. Jameson desarrolló la siguiente relación para predecir el CBR de la subrasante a partir del análisis de una amplia gama de pavimentos viales en Hong Kong.

$$CBR_{\text{Subgrade}} = 1836(D_{900})^{-1.018}$$

Ecuación 19

Donde:

- D_0 : Deflexión a 700 kPa (micrones),
CBR: Capacidad de soporte de la subrasante (%)
 D_{900} : Deflexión a 900 mm desde el centro de la placa de carga (micrones).

Roberts (2006) demostró que la resistencia del material de la capa de subrasante puede estimarse utilizando la deflexión medida con FWD. Se demostró que la resistencia del material de la capa de subrasante de un pavimento está relacionada al comportamiento de las franjas exteriores del cuenco de deflexión, en gran medida independiente de la forma de la parte interna del cuenco. Los datos de deflexión estructural se obtuvieron de pruebas de FWD a 700 kPa como carga de impacto. Usando los datos de FWD recopilados en un proyecto en Australia, se derivó una relación, vinculación directa de la subrasante CBR (según estimaciones de los pozos de prueba por PDC) con el valor de la deflexión FWD D_{900} . La relación se muestra en la siguiente ecuación:

$$\text{CBR}_{\text{Subgrade}} = 850(D_{900})^{-1}$$

Ecuación 20

Donde:

- D_0 : Deflexión a 700 kPa (micrones),
CBR: Capacidad de soporte de la subrasante (%)
 D_{900} : Deflexión a 900 mm desde el centro de la placa de carga (micrones).

El tercer modelo basado en la desviación fue desarrollado por el Departamento de Main de Queensland Carreteras (QDMR). Este modelo es actualmente utilizado por el Ayuntamiento de Brisbane (BCC) para evaluar la respuesta de la subrasante utilizando datos de la deflexión D_{900} . La respuesta de la subrasante se refleja en D_{900} y es relativamente independiente de la estructura del pavimento subyacente. Para pavimentos no ligados, asfalto grueso o capas rígidas, se ha encontrado que la deflexión D_{900} refleja una respuesta de la subrasante que esencialmente no se ve afectada por la estructura del pavimento subyacente y se utilizó para estimar el CBR de subrasante al momento de la prueba (QDMR, 1992). Esta relación se muestra en la siguiente ecuación:

$$\text{CBR}_{\text{Subgrade}} = 0.5996(D_{900})^{-1.4543}$$

Ecuación 21

Donde:

- CBR: Capacidad de soporte de la subrasante (%)
 D_{900} : Deflexión a 900 mm desde el centro de la placa de carga (mm).

Según Chai et al. (2013), el cual estudió pavimentos delgados con espesores de material granular entre 16 y 25 cm y capa asfáltica entre 3 y 5 cm, el material de subrasante es elástico lineal hasta una ubicación del sensor D_{450} . Esto se evidencia en el módulo de superficie que disminuye a medida que el esfuerzo disminuye a una distancia de aproximadamente 450 mm desde el centro de la placa de carga. Más allá de la D_{450} , el módulo de superficie aumenta a medida que disminuye el nivel de esfuerzo, lo que confirma el comportamiento no lineal de los materiales de subrasante.

Lo anterior, puede considerarse aplicable para pavimentos delgados, el cual es la base del estudio de Chai.

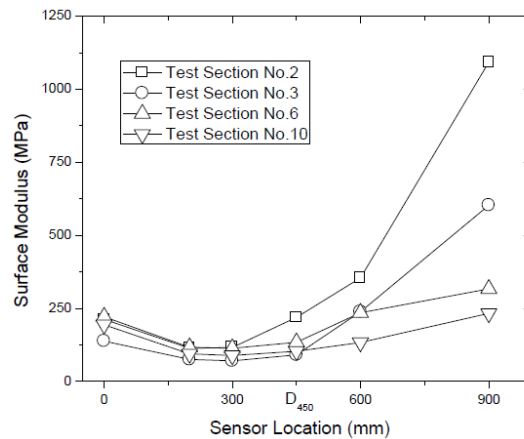


Figura 17 Módulo de la superficie Versus Localización Sensor. Fuente: Chai et al. (2013)

Basados en la Figura 17, el módulo de superficie generalmente disminuye con la distancia, a partir del punto de la carga; en los puntos cercanos a la carga, la respuesta del pavimento depende no solamente del módulo de la subrasante sino de los módulos de las capas subyacentes que componen la estructura del pavimento, los cuales son mucho mayor. A cierta distancia, dependiendo del espesor y rigidez del pavimento, la respuesta empieza a depender principalmente de la subrasante, y ahí es donde se puede calificar si la subrasante tiene un comportamiento elástico lineal o no.

Teóricamente, ese punto de quiebre podría estar asociado o coincidir con la distancia que define la metodología AASHTO-93 para escoger el sensor alejado para analizar el comportamiento de la subrasante. Para los pavimentos tan delgados del estudio de Chai, está asociado al sensor ubicado a 450 mm; por tanto, el módulo crece de ahí en adelante, lo que indica que el suelo tiene un comportamiento elástico no lineal, donde el módulo aumenta a medida que se reducen los esfuerzos (a medida que la distancia a la carga aumenta), comportamiento típico de suelos finos. Pero podría ser que el módulo siguiera disminuyendo con la distancia, en el caso de suelos granulares, tal como se indica en E. Horak (Horak, 2007).

E. Horak, ilustra las gráficas típicas de módulos de superficie para estructuras de pavimento. Los módulos de superficie calculados a la distancia horizontal r son representativos del

material comprimido en la zona de influencia por debajo de la profundidad z, (ver Figura 18). A medida que la distancia horizontal aumenta, se alcanza un punto en el que solo la subrasante cae dentro de la zona de influencia y los módulos de superficie solo reflejan los módulos del material de la subrasante.

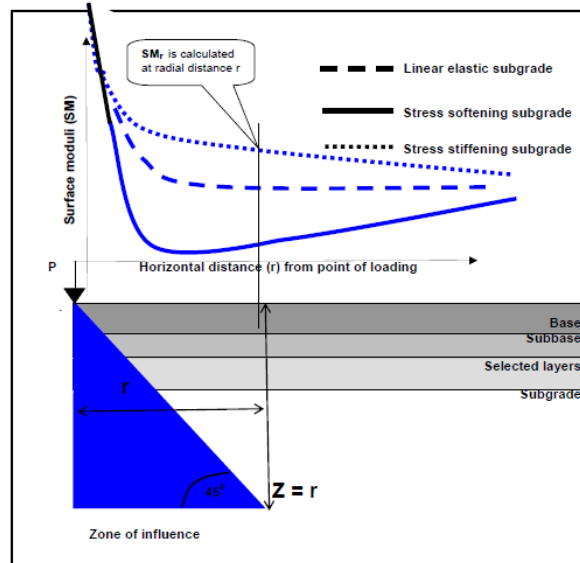


Figura 18 Gráficos de módulos de superficie típicos para estructuras de pavimento (Ullidtz, 1897).

Fuente: Horak (2017)

En el estudio de Chai, si la deflexión a D_{900} se usa en el modelo del CBR de la subrasante, el modelo predeciría un exceso en los valores de CBR porque los datos de deflexión son muy bajos (<0.100 mm), debido a que se tiene estructuras de pavimento muy delgadas. El nuevo modelo desarrollado en el estudio utilizó la deflexión en el sensor D_{450} y se presenta en la siguiente ecuación:

$$CBR_{\text{Subgrade}} = 2.6523(D_{450})^{-1.001}$$

Ecuación 22

CBR: Capacidad de soporte de la subrasante (%)

D_{450} : Deflexión a 450 mm desde el centro de la placa de carga (mm).

Es importante mencionar, que las investigaciones respecto a correlaciones entre resultados de FWD y CBR son muy limitadas; por ende, la importancia y relevancia para la ingeniería

de pavimentos en nuestro país, aprovechar la información disponible de datos simultáneos de CBR y mediciones de FWD, para tratar de encontrar correlaciones propias entre estas dos variables consideradas dentro de los parámetros de diseño de pavimentos flexibles, teniendo en cuenta la facilidad del procedimiento para obtener datos de CBR contra la disponibilidad de información de ensayos de módulo resiliente.

Capítulo 2

Metodología de Investigación

El actual trabajo de investigación está dividido en cuatro etapas; la primera de ellas está relacionada con la recopilación de la información disponible de proyectos viales en Colombia, de sitios donde se tiene simultáneamente ensayos de CBR y mediciones de deflectometría, así como su respectivo análisis y validación de la información disponible; la segunda etapa permite determinar las propiedades de rigidez de los materiales de subrasante mediante diferentes métodos de análisis como AASHTO 1993 y cálculo directo, la tercera consiste en analizar el comportamiento de los valores de CBR con relación a las propiedades del suelo y por último una cuarta etapa, en donde se establecen las correlaciones entre la deflectometría y resultados de CBR para diferentes tipos de suelo de subrasante.

2.1 Recopilación, análisis y validación de la información

Una de las primeras actividades a realizar en la investigación, es la búsqueda, recopilación, revisión y organización de información disponible en sitios simultáneos de mediciones de deflectometría, exploración geotécnica y ensayos de laboratorio como: clasificación de suelo (SUCS), límites de Atterberg, humedad natural y CBR, producto de la ejecución de proyectos viales de evaluación estructural de pavimentos realizados en Colombia. Esta información es proporcionada por dos empresas de Consultoría Vial en Colombia.

Para tal fin, se logra recopilar información de proyectos viales entre los años 2010 y 2019, con proyectos ubicados en los siguientes departamentos:

- ✓ Cundinamarca
- ✓ Boyacá
- ✓ Antioquia
- ✓ Valle del Cauca
- ✓ Bogotá
- ✓ Meta

- ✓ Norte de Santander
- ✓ Tolima
- ✓ Huila
- ✓ Nariño

Basado en lo anterior, el tamaño de la base de datos definida para el estudio corresponde a 501 puntos, en donde se cuenta con datos simultáneos de FWD y geotecnia, los cuales representan un tamaño adecuado para determinar la correlación entre CBR y módulo determinados para diferentes tipos de materiales de subrasante, analizando diferentes parámetros que sean incidentes en los resultados.

La base de datos recopilada y organizada se presenta en el **Anexo 1**.

De los datos de deflectometría, se recopila información referente a:

- Carga aplicada (kN)
- Temperaturas de la capa asfáltica y ambiente (°C)
- Deflexiones obtenidas en campo, a distancia a 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 cm del centro de aplicación de carga (micrones)
- Espesores de capa asfáltica y materiales granulares (base granular y/o subbase granular cm).

Por otro lado, de la exploración geotecnia disponible en cada proyecto analizado y registro de ensayos de laboratorio, se obtiene:

- Profundidad de exploración
- Perfiles estratigráficos
- Humedad natural
- Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad
- Granulometría: % gravas, % arenas y % finos
- Clasificación: Sistema Unificado de Clasificación de Suelo (SUCS) American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)

- CBR de laboratorio sobre muestras inalteradas y muestras compactadas

De la información recopilada, se analizan aspectos influyentes en el desarrollo de la investigación como, espesores de la estructura de pavimento, profundidad de la exploración geotécnica, clasificación del material de subrasante, límites de Atterberg, resultados de CBR de muestras inalteradas en humedad natural y CBR de muestras compactadas en laboratorio en inmersión.

2.1.1 Espesores de la estructura de pavimento

De los datos registrados en la base de datos, se tiene los siguientes espesores de carpeta asfáltica:

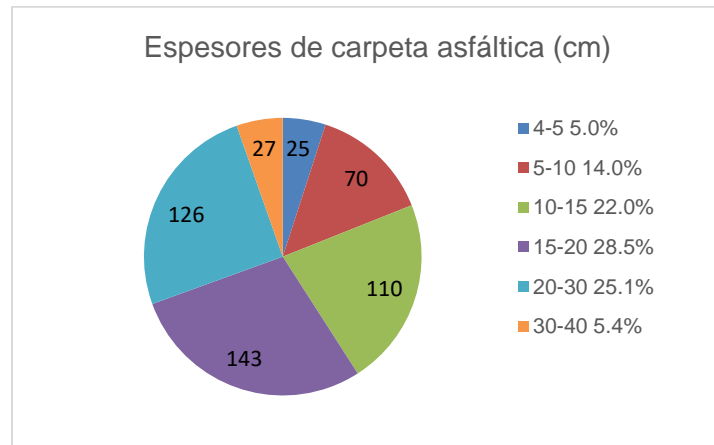


Figura 19 Espesores carpeta asfáltica

Como se puede observar, los espesores de carpeta asfáltica, en general, están comprendidos entre 10 y 30 cm, correspondiente al 75.6% de la muestra total. Sin embargo, se están analizando variedad de espesores de capa asfálticas, entre 4 y 40 cm.

Por otro lado, el material granular, entendiéndose como la capa de base y/o subbase granular de la estructura de pavimento, presenta estructuras más heterogéneas, ya que sus espesores varían entre 20 y 100 cm, como se indica en la siguiente en la Figura 20. Como la presente investigación no contempla el comportamiento en particular de estos materiales, no se ha realizado el análisis del tipo de suelo y su caracterización.

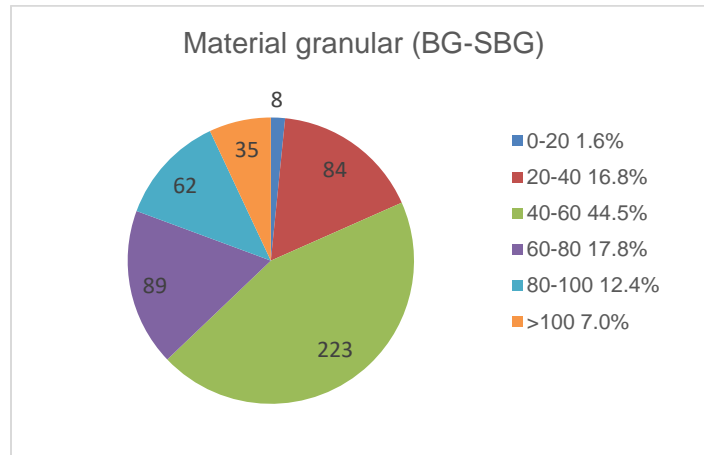


Figura 20 Espesores material granular (BG/SBG)

2.1.2 Resultados de ensayos de laboratorio

Las propiedades de los suelos de subrasante son de los parámetros más relevantes e importante a considerar dentro del objetivo de la presente investigación. La subrasante se denomina al suelo que sirve como fundación para todo el paquete estructural de un pavimento.

De los ensayos de laboratorio recopilados, se describen a continuación, cada una de sus características.

2.1.2.1 Granulometría

- ✓ Los suelos que se encontraron fueron diversos: tipo grava, arenas, limos y arcillas.

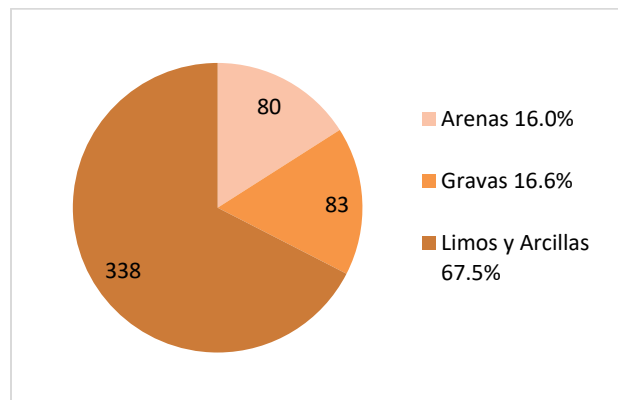


Figura 21 Granulometría base de datos

- ✓ Se cuenta con arcillas y limos de alta y baja plasticidad, suelos orgánicos, de grano grueso: gravas bien y mal graduadas, gravas arcillosas, gravas limosas, arenas arcillosas y arenas limosas.

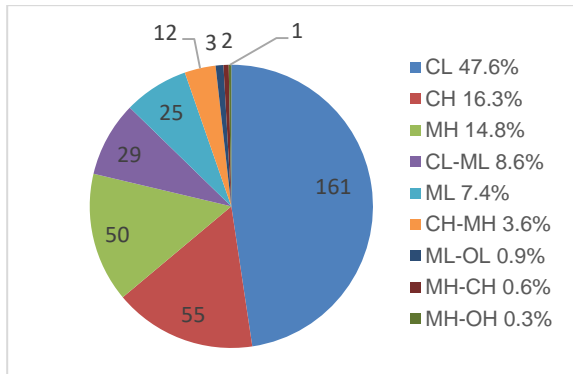


Figura 22 Clasificación para suelos finos

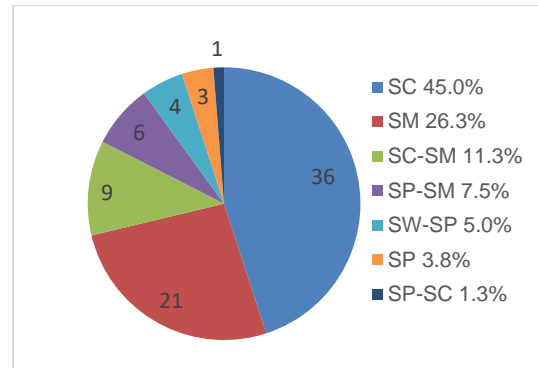


Figura 23 Clasificación para suelos arenosos

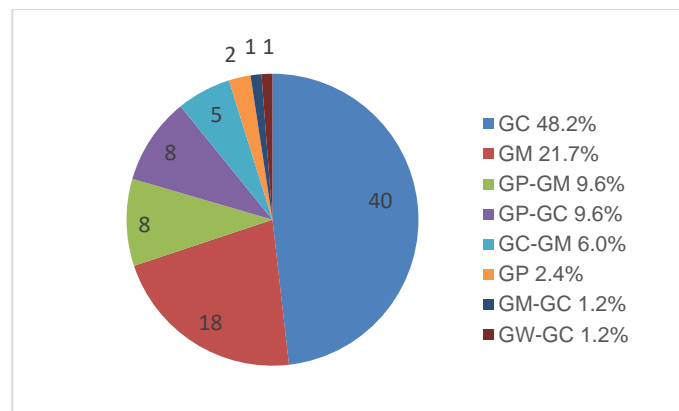


Figura 24 Clasificación para suelos tipo grava

- ✓ Los suelos predominantes recopilados fueron del tipo fino, arcillas y limos en un 67.5%, le sigue las gravas con el 16.6% y finalmente las arenas con un 16%.
- ✓ En cuanto a los suelos tipo fino, se tiene en su mayoría arcillas de baja plasticidad (CL 47.6%), arcillas de alta plasticidad (CH 16.3%) y limos de alta plasticidad (14.8%).

Basados en lo anterior, para la investigación se establecen los suelos categorizados como suelos finos, arenosos y tipo grava.

2.1.2.2 Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg para los puntos evaluados, se presentan en las siguientes gráficas, para los suelos clasificados como limos y arcillas:

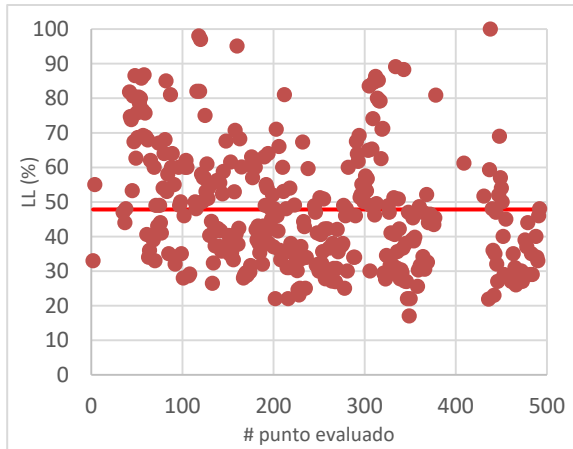


Figura 25 Gráfica de límites líquidos, suelos

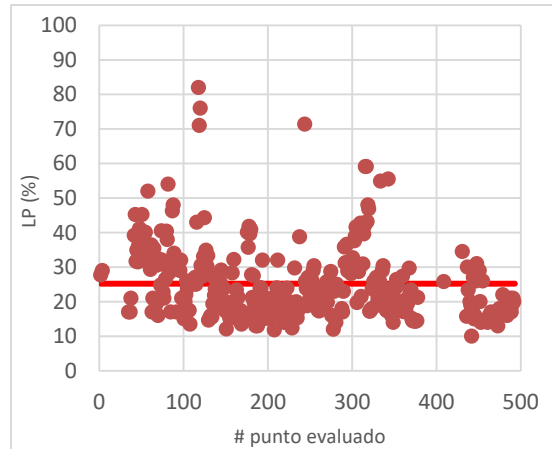


Figura 26 Gráfica límites plásticos, suelos

finos

finos

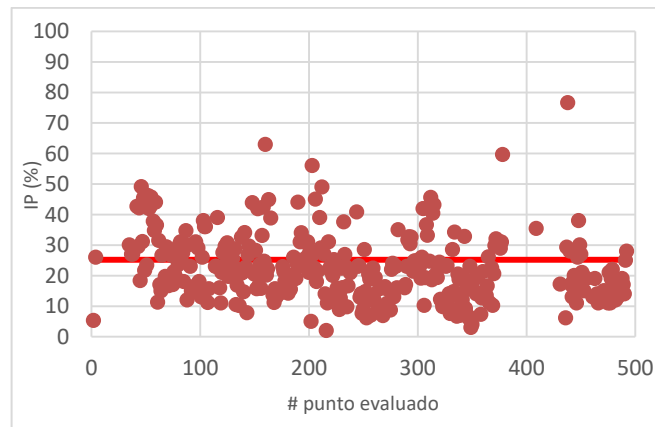


Figura 27 Gráfica índice de plasticidad, suelos finos

Para el caso de los límites líquidos, se presenta un rango entre 17% y el 100%, con mayor incidencia entre 20 - 60%. Por otro lado, los límites plásticos varían entre 10% y mayor a 100%, con promedio en general del 25%.

En los suelos finos o cohesivos, la humedad es un parámetro muy importante ya que nos permite determinar numerosas propiedades geotécnicas. A partir de la humedad natural de

los suelos y los límites de Atterberg es posible determinar el índice de liquidez (IL) y el índice de consistencia (Ic), los cuales nos permiten analizar la resistencia del terreno.

El índice de liquidez se define como la consistencia relativa de un suelo en estado natural y se determina con la siguiente ecuación:

$$IL = \frac{w - LP}{LL - LP}$$

Ecuación 23

Donde:

IL: Índice de liquidez

W: contenido de humedad del suelo in situ

LP: Límite plástico

LL: Límite líquido

Con el fin de comprobar el estado del suelo durante la ejecución de las mediciones de deflectometría, en la Figura 28 se presenta los datos obtenidos para el índice de liquidez.

Con base en la siguiente información tabulada, se puede valorar la consistencia del suelo:

Tabla 7. Consistencia del suelo a partir del I_L

| Valor del I_L | Consistencia |
|-----------------|--------------|
| 1.00 - 0.80 | Muy blando |
| 0.80 - 0.65 | Blando |
| 0.65 - 0.40 | Media |
| 0.40 - 0.25 | Duro |
| < 0.25 | Muy Duro |

Fuente: <http://geotecniafacil.com/limites-de-atterberg/>

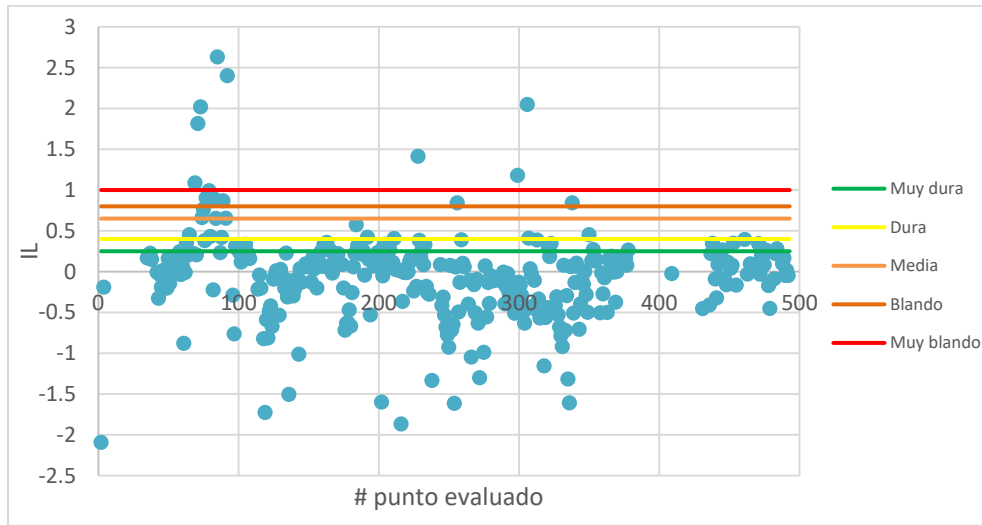


Figura 28 Gráfica índice de liquidez

De la Figura 28 se puede decir que los suelos evaluados en general presentan una consistencia dura y, en algunas zonas y en menor proporción, suelos blandos. Para valores de índice de liquidez menores a 0, la humedad natural es menor que el límite plástico.

Por otro lado, el índice de consistencia se determina de la siguiente manera:

$$I_c = \frac{LL - w}{LL - LP}$$

Ecuación 24

Donde:

Ic: Índice de consistencia

W: contenido de humedad del suelo in situ

LP: Límite plástico

LL: Límite líquido

Con base en la información de la Tabla 10, se puede definir el estado del suelo:

Tabla 8. Estado del suelo partir del I_c

| Valor del I_c | Estado del suelo |
|-----------------|------------------|
| < 0 | Líquido |
| 0 - 0.25 | Semilíquido |

| Valor del I_c | Estado del suelo |
|-----------------|---------------------|
| 0.25 - 0.50 | Plástico muy blando |
| 0.50 - 0.75 | Plástico blando |
| > 1 | Sólido |

Fuente: <http://geotecniafacil.com/limites-de-atterberg/>

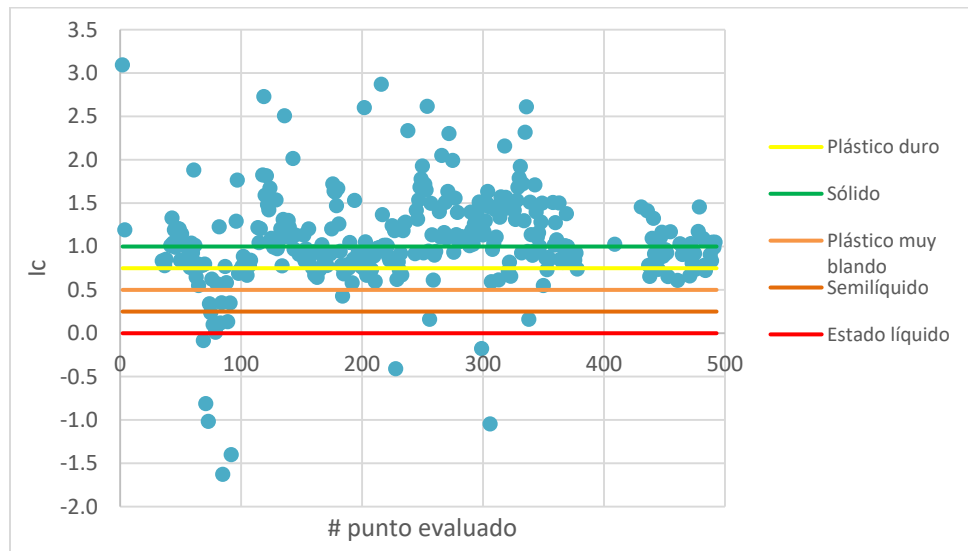


Figura 29 Gráfica índice de consistencia

La consistencia de los suelos, según el índice evaluado, en general se encuentra entre estado plástico duro y sólido; sin embargo, se cuenta con consistencias debajo de la condición plástico, muy blando a estado líquido, lo que se puede ver influenciado en los rangos de deflexiones obtenidas.

2.1.2.3 Datos de CBR

Dentro de la base de datos recopilada, se tiene información de CBR de muestras inalteradas tomadas en terreno (comúnmente para suelos arcillosos y limosos), en condiciones de humedad natural y algunos casos sumergidos, y otras muestras compactadas en laboratorio (suelos arenosos y gravas) para CBR de laboratorio compactados al 95, en inmersión.

A modo ilustrativo, se presenta los valores de CBR a ser usados para el objetivo de la investigación, los cuales se agrupan por tipo de suelo y tipo de muestreo.

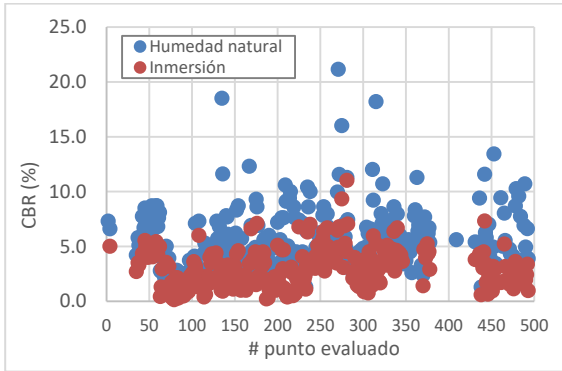


Figura 30 CBR suelos finos, muestras inalteradas

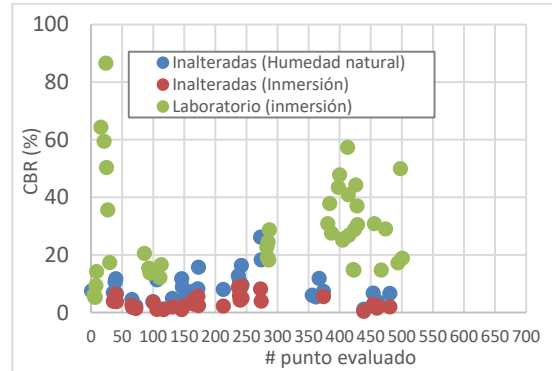


Figura 31 CBR suelos arenosos muestras inalteradas y compactadas

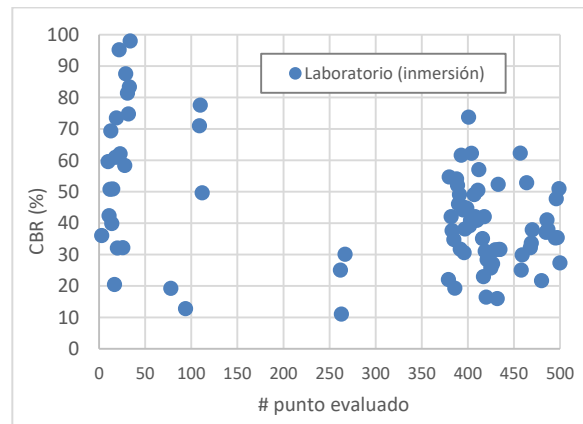


Figura 32 CBR suelos tipo grava, muestras compactadas

2.2 Determinación del módulo de la subrasante a partir de la deflectometría

2.2.1 Datos de mediciones de deflectometría

La información base de mediciones de deflectometría, corresponde a evaluaciones realizadas en diferentes proyectos viales a nivel de Colombia, información que ha sido proporcionada por dos empresas Consultoras del área de la infraestructura vial, con fines académicos e investigativos.

Los equipos empleados para las mediciones de deflectometría fueron el deflectómetro de impacto HFWD KUAB-240 y FWD 50, dispositivos de carga dinámica remolcado por un vehículo, que cumple todos los requisitos estandarizados por la ASTM D 4694-96 y el protocolo de calibración de SHRP para equipos de este tipo. En el **Anexo 2** se presentan los certificados de calibración de dichos equipos empleados en los diferentes proyectos viales, fuente de la información recopilada para la presente investigación.

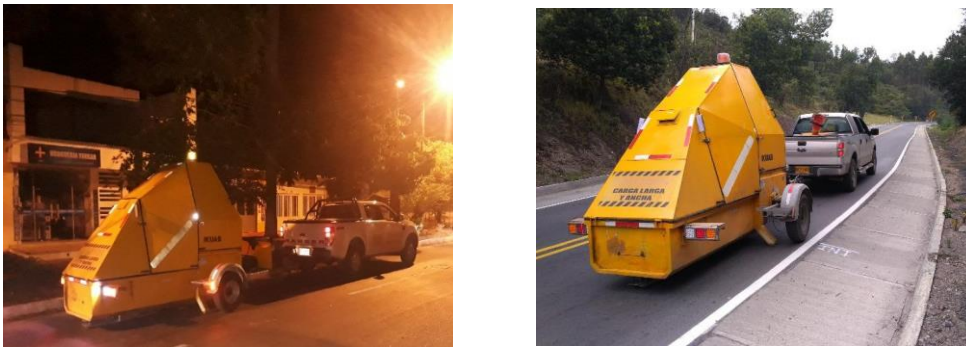


Figura 33 Fotografías equipo deflectómetro. Fuente: Empresa de consultoría

Los datos de deflexión estructural se obtuvieron de las pruebas con FWD con una presión de impacto de 566 kPa; este impacto simula el paso de la rueda de un vehículo pesado y es registrado por un sensor ubicado en el centro del plato, durante el instante en que el disco cae sobre el pavimento.

Las deflexiones producidas son medidas por un grupo de siete (7) sismómetros espaciados entre sí cada 0.30 m, permitiendo la obtención de la curva completa del cuenco de deflexiones, (ver Figura 34) (distancias de 0, 0.30, 0.60, 0.90, 1.20, 1.50 y 1.80 m del centro del disco de carga).

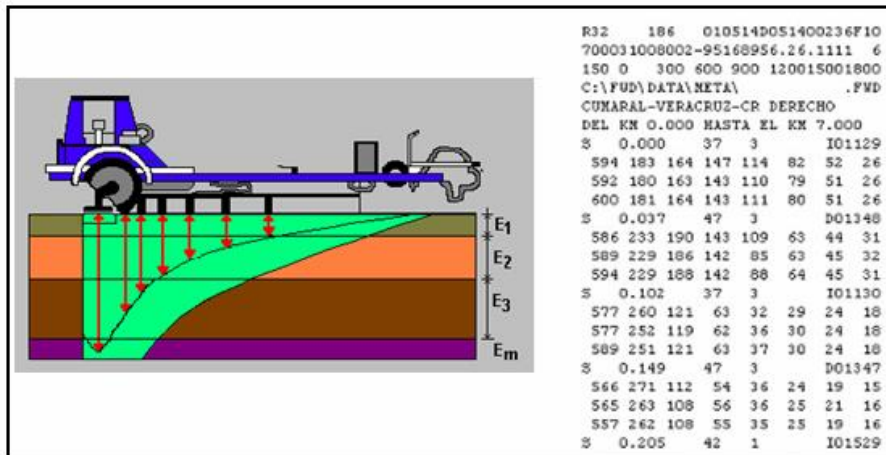


Figura 34 Medida y registro de deflexiones con un deflectómetro de impacto
Fuente: (INVIAS, 2008)

Las siguientes son algunas características de los deflectómetros de impacto:

- Configuración de dos masas: factor que permite la producción de un pulso de carga que simula los efectos reales de un vehículo en movimiento.
- La fuerza es monitoreada con una celda de carga
- Plata de carga circular, diámetros 15 – 30 – 45 cm (diámetro empleado 30 cm)
- Plato de carga segmentado: esta condición asegura una distribución uniforme de presión sobre la superficie del pavimento.
- Sensores de medición: Reporta deflexiones en un rango de 0 a 200 mili pulgadas (0 a 5000 micrones).

2.2.1.1 Normalización de deflexiones por carga

Los datos de deflexión, obtenidos en los estudios de deflectometría se normalizan por carga (a 40 kN) teniendo en cuenta el valor de la carga con que fueron generadas y considerando que la reacción al aplicar la carga no siempre es constante.

Esta corrección se realiza proporcionalmente, es decir, aplicando la siguiente ecuación:

$$d_i = d_{io} * \frac{Pr}{P_0}$$

Ecuación 25

Donde:

d_i = Deflexión del sensor i , corregida a la carga P_r .

d_{i0} = Deflexión del sensor i , medida en campo con la carga de aplicación P_0 .

P_r = Carga a la cual se normalizarán las mediciones, en este caso igual a 40 KN.

P_0 = Carga (en KN) aplicada en las mediciones de campo.

2.2.2 Determinación del módulo resiliente de la subrasante a partir de las mediciones de FWD

La obtención de los módulos de la subrasante a partir de las mediciones de deflectometría, se realiza mediante dos metodologías: AASHTO 1993 y método directo. Seguidamente, se presenta el procedimiento a seguir y en el **Anexo 3** se presenta los resultados obtenidos para cada uno de los puntos evaluados.

2.2.2.1 Método AASHTO 1993

De acuerdo con la metodología AASHTO-93, el cálculo del módulo resiliente de la subrasante puede determinarse a partir de las deflexiones obtenidas con el deflectómetro de impacto (FWD), por medio de la siguiente expresión la cual está en función de los siguientes parámetros:

$$M_r = \frac{P(1 - \mu^2)}{\pi r d_r}$$

Ecuación 26

Donde:

Mr: Módulo resiliente de la subrasante en kg/cm²

P: Carga aplicada en kg

d_r : Deflexión medida a una distancia r del centro del plato de carga en cm

r : Distancia desde el centro del plato de carga en cm

μ : Relación de Poisson de la subrasante

Suponiendo que la relación de Poisson de la subrasante, $\mu = 0.50$ (AASHTO-93), la ecuación se reduce a:

$$M_r = \frac{0.24P}{d_r r}$$

Ecuación 27

Donde:

- Mr: Módulo resiliente de la subrasante en kg/cm²
- P: Carga aplicada en kg
- D_r: Deflexión medida a una distancia r del centro del plato de carga en cm
- r: Distancia desde el centro del plato de carga en cm

Sin embargo, para este estudio se empleó una relación de Poisson de 0.45 para suelos finos y 0.40 para suelos arenosos y tipo grava.

De acuerdo con lo propuesto por la AASHTO, la deflexión empleada para retro calcular el módulo de la subrasante debe ser medida lo suficientemente lejos del punto de aplicación de carga, de tal modo que provea un buen estimativo del módulo de la subrasante, independientemente de los efectos de cualquiera de las capas por encima de ésta; pero también debe estar lo suficientemente cerca, de tal modo que no sea muy pequeña e impida una medición precisa. La mínima distancia debe determinarse por medio de la siguiente relación:

$$r \geq 0.7a_e$$

$$a_e = \sqrt{a^2 + \left(D^3 \sqrt{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2}$$

Ecuación 28

Donde:

- a_e: Radio del bulbo de esfuerzos en la interfaz estructura-subrasante en cm.
- a: Radio del plato de carga del deflectómetro en cm.

- D: Espesor de las capas del pavimento en cm.
 E_p: Modulo efectivo de todas las capas del pavimento por encima de la subrasante en kg/cm².
 M_R: Módulo de la subrasante en kg/cm²

El valor de E_p se obtiene despejando la siguiente expresión:

$$d_0 = 1.5 * p * a * \left\{ \frac{1}{M_r \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \sqrt{\frac{E_p}{M_r}} \right)^2}} + \frac{\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}} \right]}{E_p} \right\}$$

Ecuación 29

Dónde:

- d₀ : Deflexión central en cm.
 P : Presión del plato de carga, psi.
 a : Radio del plato de carga, cm
 D : Espesor total de las capas del pavimento sobre la subrasante, cm
 M_R : Módulo resiliente de la subrasante, kg/cm²
 E_p : Módulo efectivo de las capas que conforman el pavimento, kg/cm²

2.2.2.2 Método directo

El cálculo directo es un método desarrollado por la FHWA, a través del programa LTPP (Long-Term Pavement Performance), el cual permite estimar los módulos de la subrasante y del conjunto de capas asfálticas, a partir de las medidas de deflexión y de los espesores de la estructura del pavimento, sin necesidad de realizar tanteos como lo exige el retrocálculo.

Para el cálculo del módulo de la subrasante, el método utiliza una formulación basada en el modelo de Hogg.

Los autores del método mencionan las siguientes ventajas: A) Puesto que los módulos de la subrasante y de las capas asfálticas calculados por este procedimiento no dependen de los módulos de otras capas del sistema, sólo se obtiene una solución para cada cuenco de deflexión, al contrario de lo que sucede con el retrocálculo. B) El cálculo directo es fácil de entender y usar, en tanto que el retrocálculo exige un juicio ingenieril especializado, así como el conocimiento de la manera de correr el programa iterativo escogido. C) Según su experiencia con la información de la base de datos del LTPP, para los mismos espesores y deflexiones, la técnica de cálculo directo producen menos dispersión en los resultados que la obtenida mediante retrocálculo al analizar pavimentos flexibles.

Este método propuesto en el documento FHWA-HRT-05-152, emplea la deflexión máxima y una adicional de las medidas con el FWD, a una distancia tal, que el valor de deflexión correspondiente sea aproximadamente igual a la mitad del máximo. La ecuación para determinar el módulo es la siguiente:

$$E_0 = I \times \frac{(1 + \mu_0)(3 - 4\mu_0)}{2 \times (1 - \mu_0)} \times \left[\frac{S_0}{S} \right] \times \left[\frac{p}{D_0 I_0} \right]$$

Ecuación 30

Donde:

- E₀: Modulo de la subrasante
- I: Factor de Influencia (Tabla 9)
- μ₀: Relación de Poisson de la subrasante
- S: Rigidez del pavimento (p/D₀)
- p: Carga aplicada
- D₀: Deflexión central (deflexión máxima)
- I₀: Longitud característica del cuenco de deflexión.

$$I_0 = y_0 \frac{r_{50}}{2} + \left[(y_0 r_{50})^2 - 4m\alpha r_{50} \right]^{0.5}$$

Ecuación 31

Si $\frac{\alpha}{I_0} < 0.2$ entonces $I_0 = (y_0 - 0.2m)r_{50}$

S₀/S: relación entre la rigidez de la carga puntual teórica y la rigidez del pavimento.

$$\left[\frac{S}{S_0}\right] = 1 - m \left[\frac{\alpha}{l_0} - 0.2\right]$$

Ecuación 32

Si $\frac{\alpha}{l_0} < 0.2$ entonces $\left[\frac{S}{S_0}\right] = 1.0$

Donde:

y_0 : Coeficiente de longitud característica

m : Coeficiente de longitud característica

α : Coeficiente de ajuste de la curva

r_{50} : Distancia a la cual la deflexión es igual a la mitad de la máxima ($D_r/D_0=0.5$)

$$r_{50} = r \frac{(1/\alpha)^{1/\beta} - B}{\left[\frac{1}{\alpha} \left\{ \frac{D_0}{D_r} - 1 \right\}\right]^{1/\beta} - B}$$

Ecuación 33

Donde:

β : Coeficiente de ajuste de la curva

B : Coeficiente de ajuste de la curva

Esta implementación del modelo de Hogg considera tres (3) casos. El Caso III corresponde a una fundación elástica infinita, mientras los Casos I y II son para capas elásticas finitas, con un espesor efectivo que se asume aproximadamente igual a diez (10) veces la longitud característica del cuenco de deflexión ($10 \cdot l_0$). Los dos casos de espesor finito son para subrasante con relación de Poisson de 0.40 y 0.50, respectivamente, lo que puede corresponder a suelos finos y también granulares en el caso de la relación 0.40. Las diferentes constantes usadas para los 3 casos del modelo se muestran en la Tabla 9.

El Caso II ha sido empleado de manera amplia para calcular módulos de subrasante con propósitos de evaluación de pavimentos mediante cálculo directo.

Los coeficientes de Hogg utilizados para los cálculos, corresponden al Caso II (capas elásticas finitas).

Tabla 9. Coeficientes del modelo Hogg

| | | CASO I | CASO II | CASO III |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Distancia a soporte rígido | H/l | 10 | 10 | Infinito |
| Relación de Poisson | μ_0 | 0.50 | 0.40 | Cualquiera |
| Factor de influencia | l | 0.1614 | 0.1689 | 0.1925 |
| Rango D_k/D_0 | | > 0.70 | > 0.43 | Cualquiera |
| $r_{50} = f(D_k/D_0)$ | α | 0.4065 | 0.3804 | 0.3210 |
| | β | 1.6890 | 1.8246 | 1.7117 |
| | B | 0 | 0 | 0 |
| Rango D_k/D_0 | | < 0.70 | < 0.43 | |
| $r_{50} = f(D_k/D_0)$ | α | 2.6947E-3 | 4.3795E-4 | |
| | β | 4.5663 | 4.9903 | |
| | B | 2 | 3 | |
| $l = f(r_{50}, a)$ | y_0 | 0.642 | 0.603 | 0.527 |
| | m | 0.125 | 0.108 | 0.098 |
| $(S/S_0) = f(a/l)$ | \bar{m} | 0.219 | 0.208 | 0.185 |

Fuente: (INVIAS, 2008)

2.2.2.3 Resultados obtenidos de módulo

Si se grafican los resultados de los módulos obtenidos por cada metodología, se observa una trayectoria similar en su comportamiento; (Figura 35), sin embargo, las gráficas también indican que se logra obtener valores mayores de módulo mediante la metodología AASHTO, en promedio en un 24% aproximadamente.

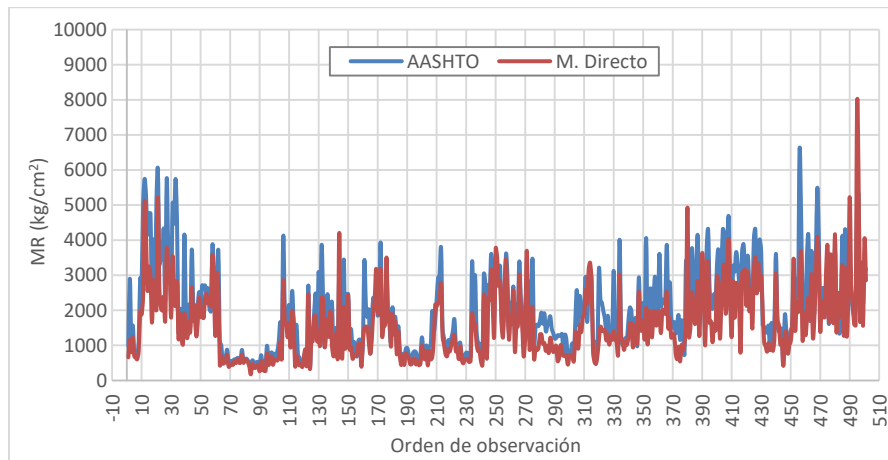


Figura 35 Módulos de la subrasante

Los resultados del sensor determinado para la estimación del módulo, permite establecer el empleo del sensor ubicado a 90 cm en un mayor porcentaje en la metodología AASHTO y el ubicado a 60 cm en el método directo (ver Figura 36 y Figura 37).

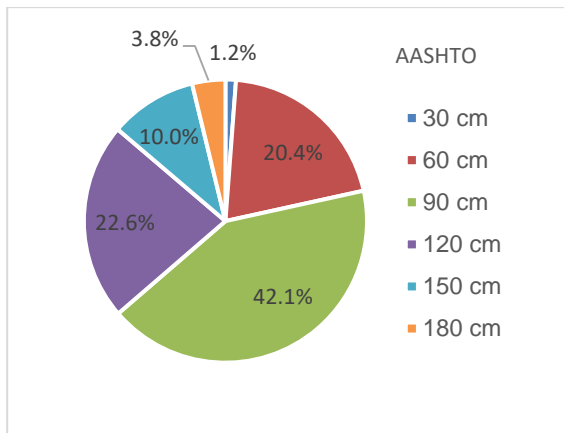


Figura 36 Sensor empleado en AASHTO

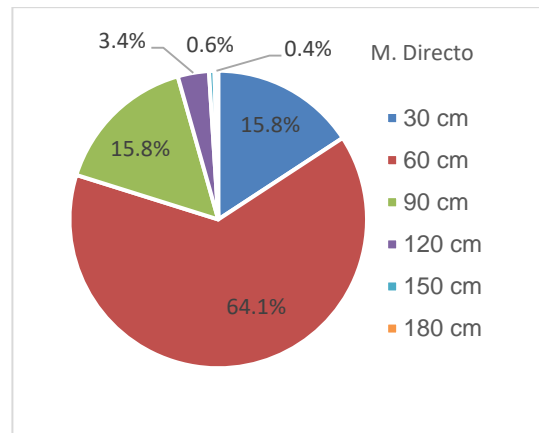
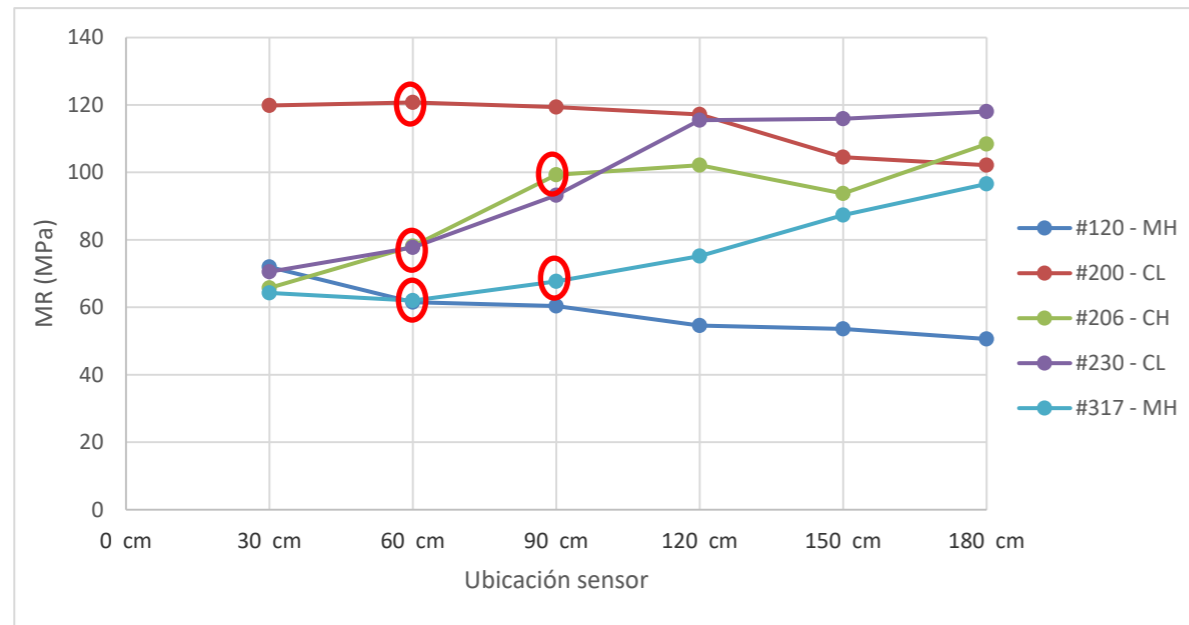
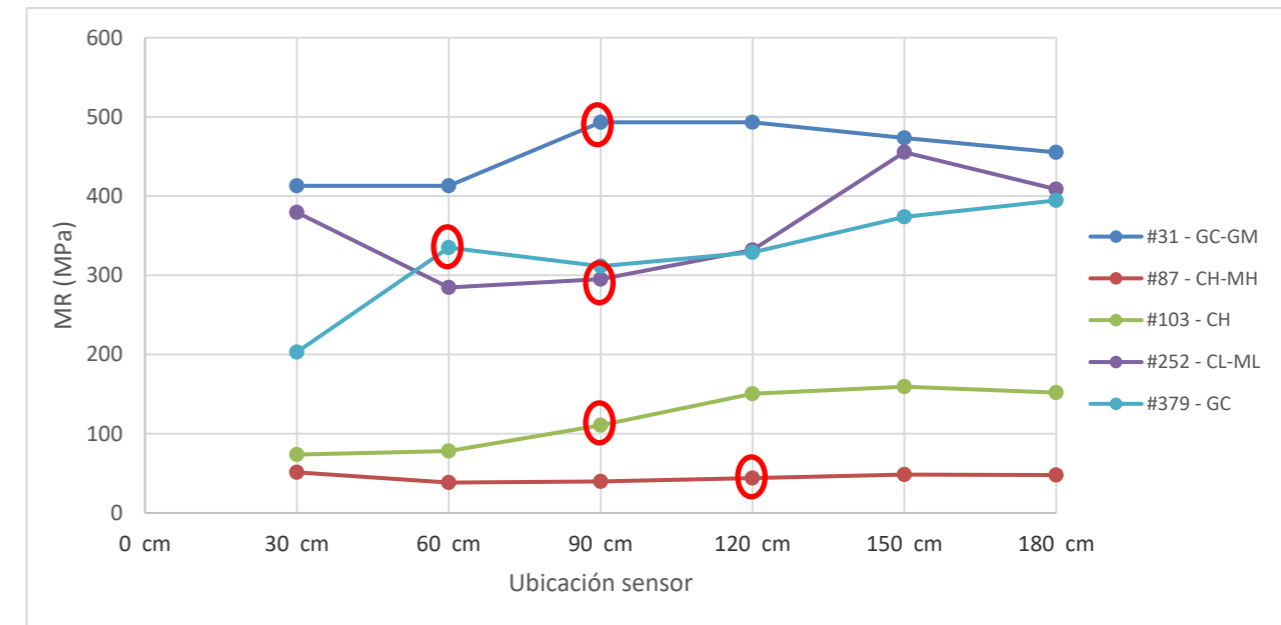


Figura 37 Sensor empleado en método directo

Con el fin de validar lo indicado por Chai et al. (2013), en donde se indica que el material de subrasante es elástico lineal hasta una ubicación del sensor a 450 mm desde el centro de la placa de carga, para el caso de pavimentos delgados, a continuación, se presenta el comportamiento del módulo en diferentes puntos, aleatorios, para diferentes estructuras de pavimento, tomando los resultados obtenidos por la metodología AASHTO:



Carpetas menores a 5 cm y material granular entre 24 y 90 cm



Carpetas entre 10 y 20 cm y material granular entre 30 y 50 cm

- Para el caso del punto #120, se puede observar que el módulo disminuye con respecto a la distancia del sensor, y tiene un comportamiento elástico lineal más allá del sensor ubicado a 90 cm. Algo similar para con el punto # 200.
- Para el caso de los puntos evaluados # 206, 230 y 317, a partir del sensor localizado a 60 cm, el módulo tiende a aumentar, esto puede estar asociado a la disminución de esfuerzos a partir de esta distancia y por ende una deflexión muy baja, viéndose reflejado en un módulo mayor obtenido por retrocálculo calculado con los sensores más allá del de 60 cm, (comportamiento típico de suelo finos).
- Los puntos en círculo en rojo corresponden a los sensores empleados para el cálculo del módulo por la metodología AASHTO.
- Para el caso del punto #87 se tiene un comportamiento lineal elástico, allí el módulo tiene poca variación con respecto a la distancia del sensor.
- Para el punto # 31, el módulo aumenta hasta una distancia del sensor, después se observa una leve disminución (comportamiento típico de suelos granulares).
- Para el punto #252, el módulo disminuye hasta el sensor ubicado entre 60 y 90 cm, posterior a este aumenta en consideración (comportamiento de un suelo fino, aumenta el módulo a menor esfuerzo). Así mismo el comportamiento de los puntos # 103 y # 379, el módulo tiende a aumentar a mayor distancia del sensor (menor esfuerzo).
- Los puntos en círculo en rojo corresponden a los sensores empleados para el cálculo del módulo por la metodología AASHTO.

Figura 38 Comportamiento del módulo en función de la deflexión, puntos aleatorios

El análisis anterior, nos permite analizar el comportamiento del suelo según su tipo, el efecto en el módulo determinado con diferentes deflexiones según el sensor analizado. De aquí la importancia de analizar la determinación del sensor a emplear para la determinación del comportamiento del suelo de subrasante, a partir del estudio de deflectometría.

Capítulo 3

Comportamiento entre el CBR y Parámetros del Suelo

Previo a definir algún tipo de modelo estadístico, se realizaron gráficas de dispersión para observar el comportamiento de los datos entre el CBR y los parámetros de suelo.

Con la información disponible de los ensayos de laboratorio se realizaron gráficas de dispersión entre el CBR y las propiedades relacionadas con la gradación y límites de consistencia. Lo anterior, con la finalidad de poder realizar un análisis dimensional para los parámetros de mayor incidencia.

Para la presente investigación, se cuenta con valores de CBR en las siguientes condiciones:

- Suelos finos (arcillas y limos): muestras inalteradas en condiciones de humedad natural.
- Suelos arenosos: muestras inalteradas en condiciones de humedad natural y muestras compactadas en laboratorio, 95% de la densidad máxima, en inmersión.
- Suelos tipo grava: muestras compactadas en laboratorio al 95% de la densidad máxima, en inmersión.

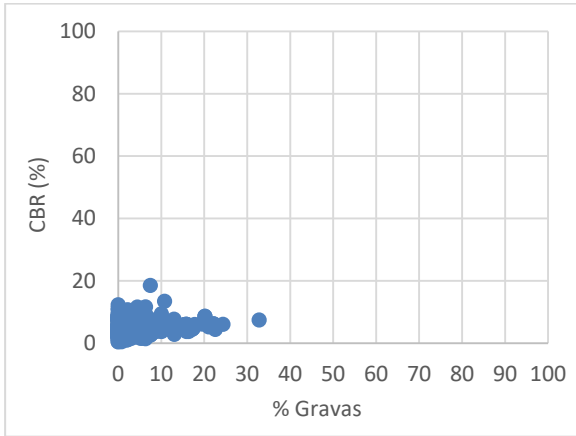
3.1 Relación entre el CBR y granulometría

Seguidamente, se presenta el análisis de dispersión, entre la granulometría de todos los tipos de suelos analizados, finos, arenas y gravas y el CBR (para suelos finos: muestra inalteradas humedad natural, suelos arenosos: muestras inalteradas humedad natural y muestras compactadas en laboratorio y gravas: muestras compactadas en laboratorio):

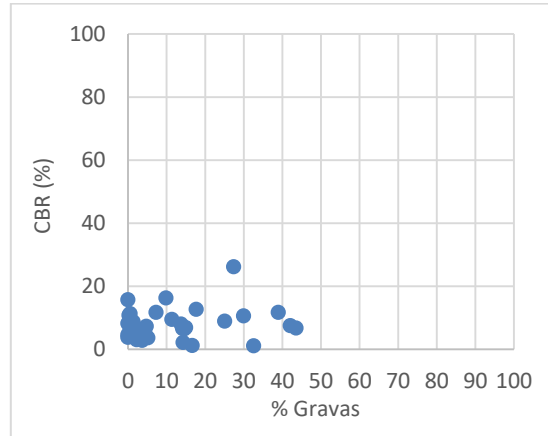
3.1.1 CBR y porcentaje de gravas

La Figura 39 presenta la gráfica de dispersión entre el CBR y el porcentaje de gravas (%G), se puede observar, en general, que entre más alto sea el contenido de grava, la tendencia del valor de CBR es mayor. Sin embargo, se nota que la dispersión es alta para porcentajes

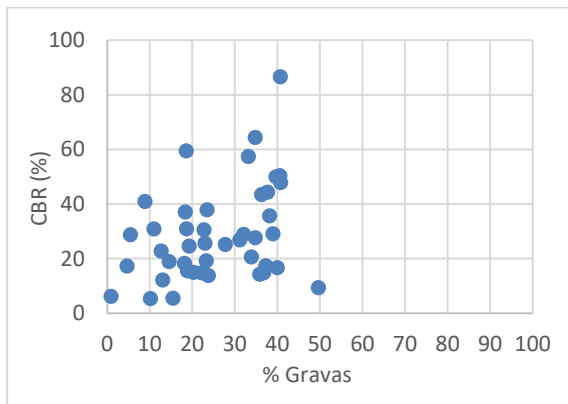
mayores al 30%. Esto podría indicar la existencia de otros factores que influyen en la capacidad de los suelos, además del % de gravas.



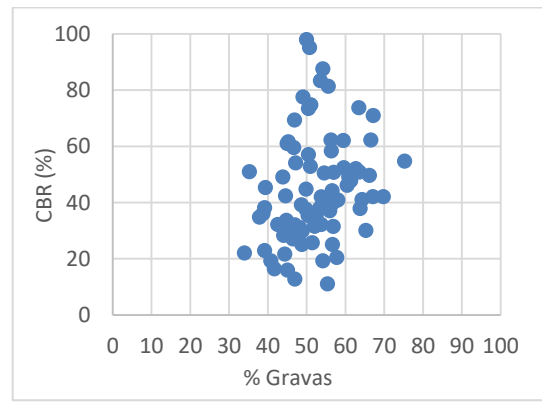
Suelos finos, CBR muestra inalterada, humedad natural



Suelos arenosos, CBR muestra inalterada, humedad natural



Suelos arenosos, CBR compactado en laboratorio, en inmersión



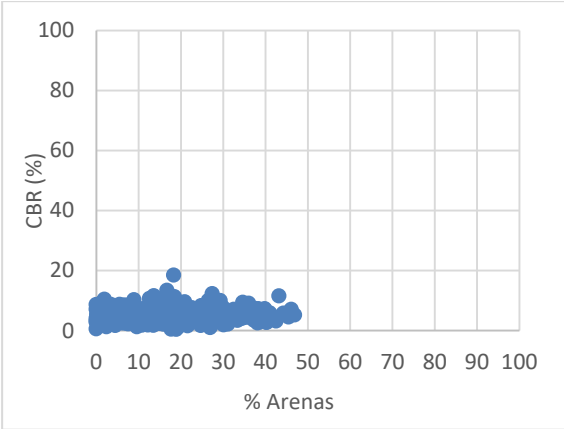
Suelos grava, CBR compactado en laboratorio, en inmersión

Figura 39 Gráfica de dispersión CBR vs % Gravas

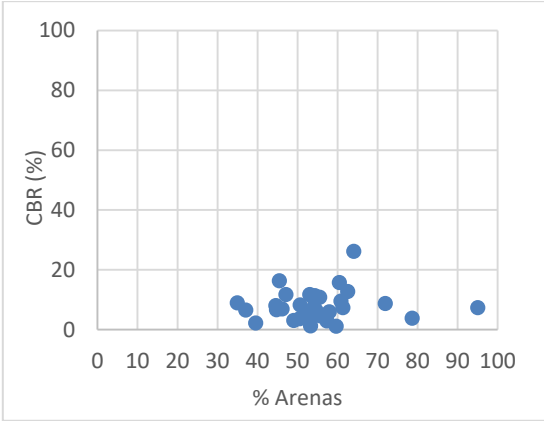
3.1.2 CBR y porcentaje de arenas

Para la gráfica de dispersión entre el CBR y el contenido de arena (% S), se nota una tendencia similar entre el 0% y 30% de contenido de arena, en este rango, el CBR se mantiene por debajo del 20%. Entre el 30% y 45% (S), el CBR se dispara presentando una mayor dispersión de los datos. Y, por último, para porcentajes mayores al 45% (S), el valor

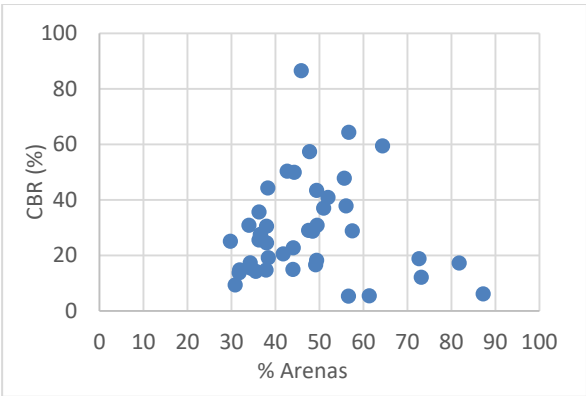
del CBR disminuye, mostrando valores inferiores al 20%, siendo similar la tendencia a los datos. También se podría indicar que el % de contenido de arena no es un factor determinante del comportamiento del CBR.



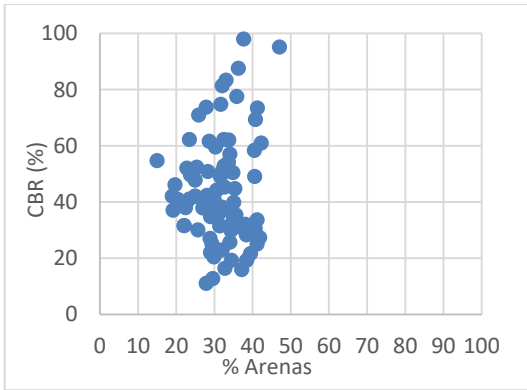
Suelos finos, CBR muestra inalterada, humedad natural



Suelos arenosos, CBR muestra inalterada, humedad natural



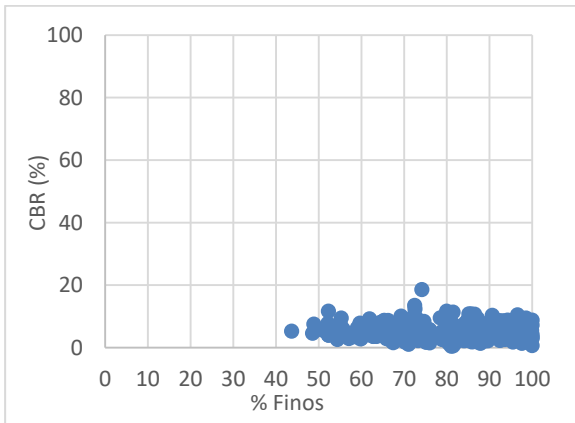
Suelos arenosos, CBR compactado en laboratorio, en inmersión



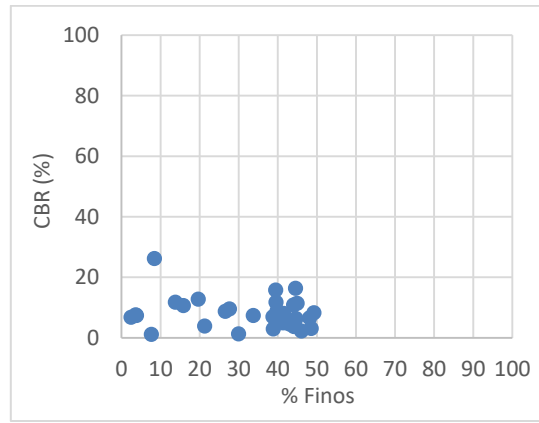
Suelos grava, CBR compactado en laboratorio, en inmersión

Figura 40 Gráfica de dispersión CBR vs % Arenas

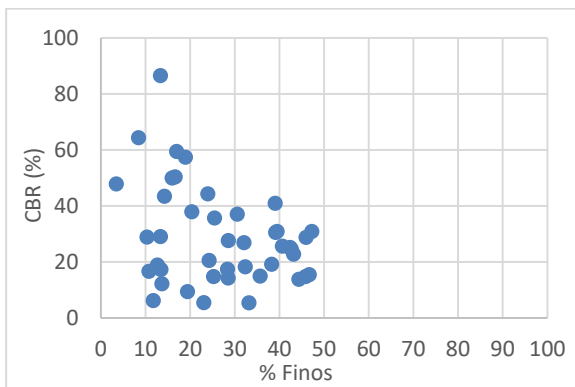
3.1.3 CBR y porcentaje de finos



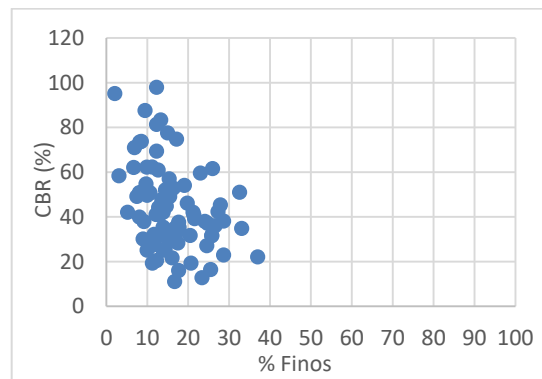
Suelos finos, CBR muestra inalterada, humedad natural



Suelos arenosos, CBR muestra inalterada, humedad natural



Suelos arenosos, CBR compactado en laboratorio, en inmersión



Suelos grava, CBR compactado en laboratorio, en inmersión

Figura 41 Gráfica de dispersión CBR vs % Finos

En cuanto a la gráfica de dispersión para el CBR y % de finos (arcillas y limos), se nota claramente una tendencia a disminuir el CBR a medida que aumenta la cantidad de finos. La relación entre estos dos valores parece ser del tipo potencial, con valores mayores de CBR entre el 0 y 20% del contenido de finos y disminuye después de este último intervalo.

3.2 Relación entre el CBR y límites de Atterberg

3.2.1 CBR y límite líquido

Al graficar la dispersión de los valores de CBR y límite líquido del suelo, se puede observar claramente el comportamiento del suelo según su gradación; para suelos tipo grava, los valores de CBR son mayores y para suelos finos, con mayores porcentajes de límite líquido, el valor del CBR disminuye.

También se puede observar que, para valores de límites líquidos del mismo rango, se obtienen valores de CBR bajos y altos; esto especialmente para suelos arenosos, lo cual podría significar que, aunque el límite líquido influye en el valor del CBR, lo determinante es el porcentaje de grava presente en el suelo, ya que se tiene una tendencia clara en los suelos finos y suelos tipo grava. Para los suelos arenosos, el comportamiento es más variado, debido a que su gradación puede estar más hacia al lado de granos gruesos o granos finos.

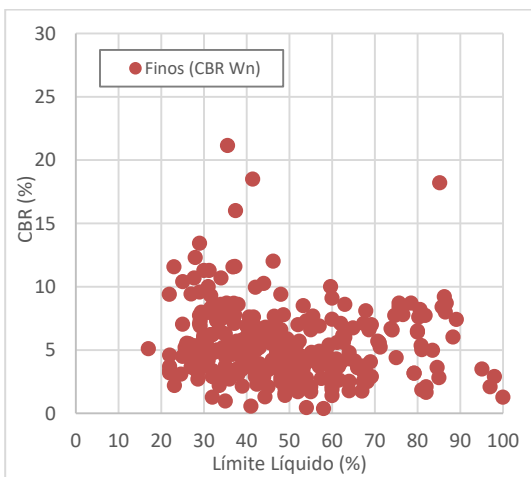


Figura 42 Gráfica de dispersión CBR vs % Límite líquido, suelos finos

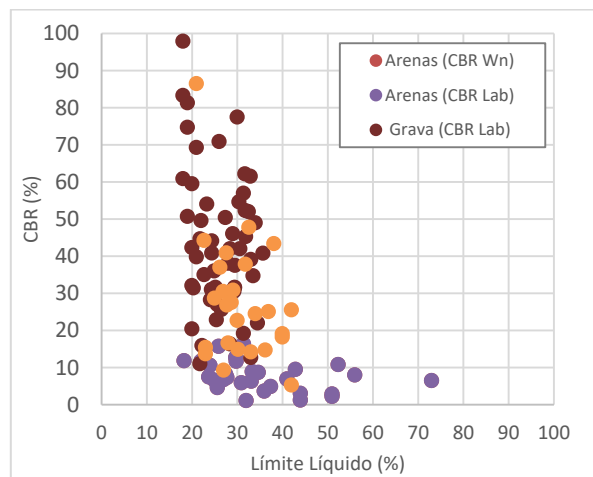


Figura 43 Gráfica de dispersión CBR vs % Límite líquido, suelos arenosos y gravas

Lo que puede concluir es que el valor del CBR en muestras inalteradas y elaboradas en laboratorio no tiene una correlación clara con el límite líquido.

3.2.2 CBR y límite plástico

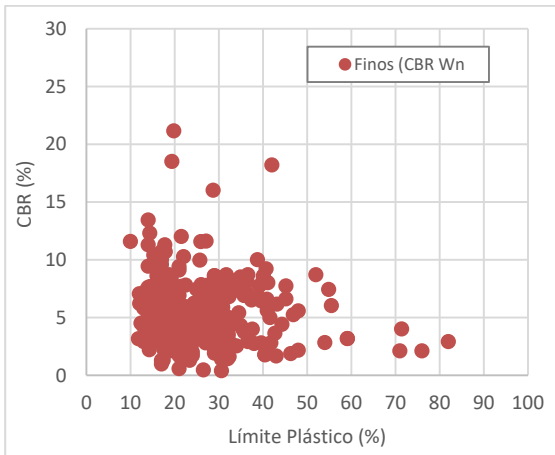


Figura 44 Gráfica de dispersión CBR vs Límite plástico, suelos finos

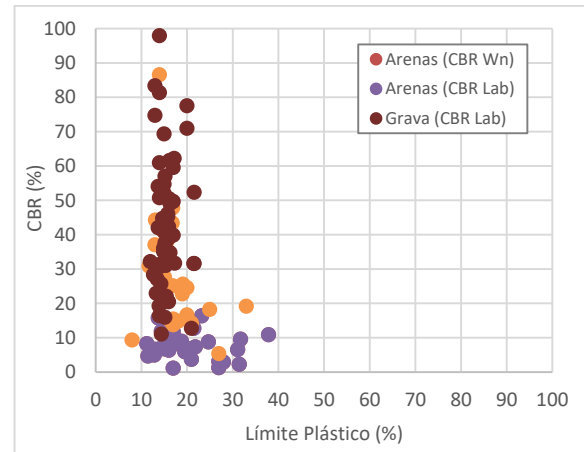


Figura 45 Gráfica de dispersión CBR vs Límite plástico, suelos arenosos y gravas

De acuerdo con la dispersión presentada entre el CBR y el límite plástico, es claro que el CBR disminuye a medida que aumenta el LP. Para límites plásticos menores al 20%, el CBR aumenta considerablemente; esto se evidencia para los suelos tipo grava y arenosos. Arriba del 20% del límite plástico, el CBR en suelos finos es inferior al 10% en general. De igual manera que para el límite líquido, no se encuentra una correlación clara entre el CBR y el límite plástico.

3.2.3 CBR e Índice de Plasticidad

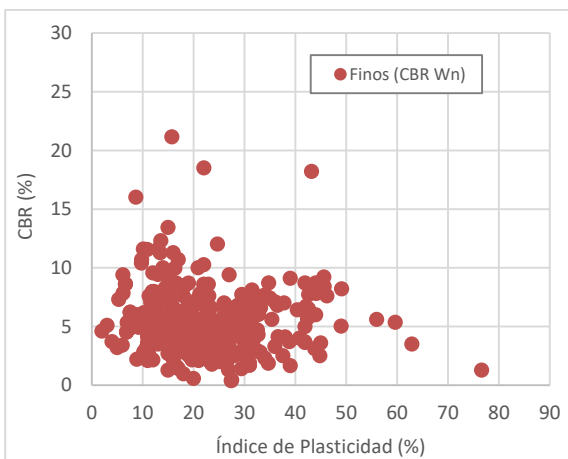


Figura 46 Gráfica de dispersión CBR vs Índice de plasticidad, suelos finos

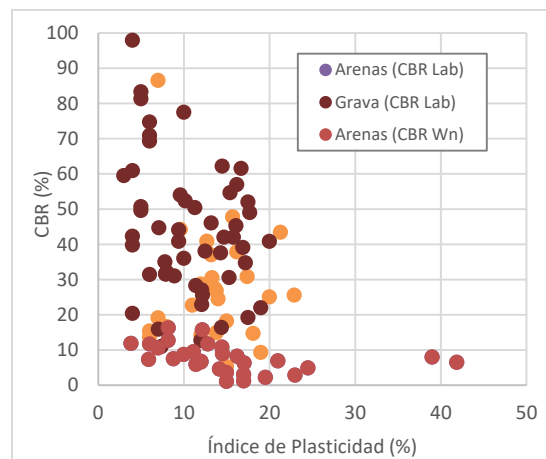


Figura 47 Gráfica de dispersión CBR vs Índice de plasticidad, suelos arenosos y gravas

Al igual que el comportamiento del límite plástico, el valor del CBR disminuye con el aumento del índice de plasticidad. Del análisis realizado, al comparar los valores de CBR y los límites de consistencia del suelo, se puede apreciar que existe una mayor dispersión de los datos de CBR para suelos tipo grava y arenosos; para los suelos finos, el comportamiento es más homogéneo, con valores de CBR menores del 10%, para valores bajos y altos de límites líquidos, límites plásticos e índice de plasticidad.

3.3 CBR vs Plasticidad y contenido de finos para suelos finos

La National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) of United States of America, propuso la siguiente correlación para estimar los valores de CBR para suelos finos, donde w es el porcentaje que pasa el tamiz 0.075 mm y PI el índice de plasticidad.

$$CBR = \frac{75}{1 + 0.728(wPI)}$$

Ecuación 34

La Figura 48 muestra los datos de CBR para suelos finos en condiciones de humedad natural versus wPI y los resultados obtenidos para el CBR a partir de la correlación establecida por la NCHRP. Se puede ver que se mantiene una misma tendencia, aunque se presenta una gran dispersión entre la predicción del CBR y el CBR medido en campo, frente a los valores de wPI.

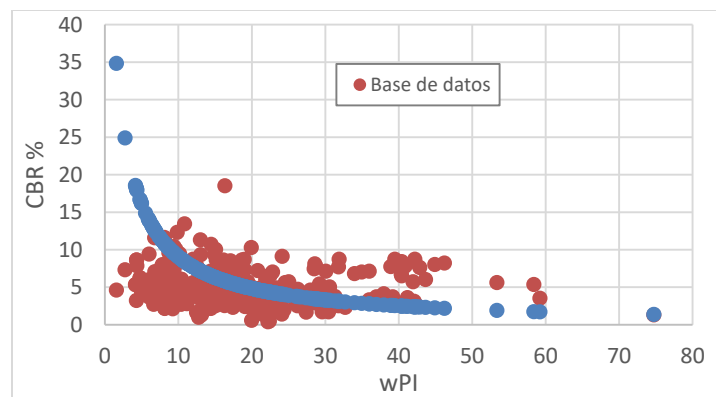


Figura 48 Gráfica de dispersión CBR vs wPI y correlación NCHRP

Capítulo 4

Comparación de los Datos del Estudio con Correlaciones Internacionales

Entre FWD – CBR

Basados en lo mencionado en el estado del arte, existen varias correlaciones para estimar el CBR a partir de las deflexiones medidas a diferentes distancias del centro de aplicación de la carga. En este capítulo se analiza si las ecuaciones disponibles reproducen las tendencias de la base de datos empleada; es decir, si aplican para las condiciones de suelos típicos existentes en Colombia.

Las Figura 49 a Figura 57 presentan, por tipo de suelo, los datos en este estudio (corregidas a una presión de 700 kPa) y las correlaciones entre el CBR y la deflexión D900 de tres modelos comúnmente utilizados en Australia; estos modelos fueron desarrollados por Jameson (1993), Roberts et al (2006) y Queensland Department of Main Roads (QDMR, 1992).

- Ecuación 1: Jameson
- Ecuación 2: Roberts et al
- Ecuación 3: QDMR
- Adicionalmente, se presenta la línea de tendencia que presenta los datos del estudio.

4.1 Suelos finos

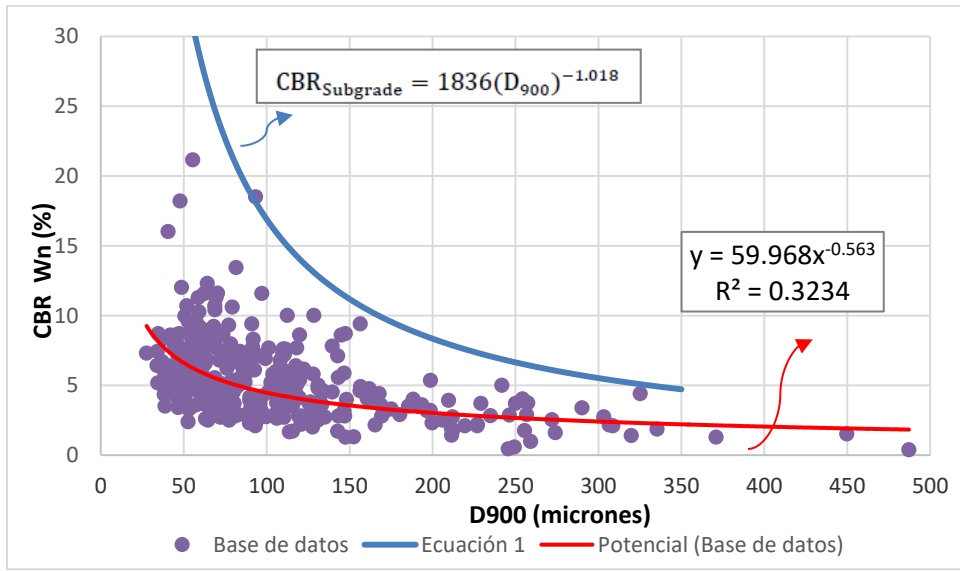


Figura 49 Gráfica de dispersión CBR (humedad natural) vs Deflexión a 900 mm vs ecuación 1, suelos finos

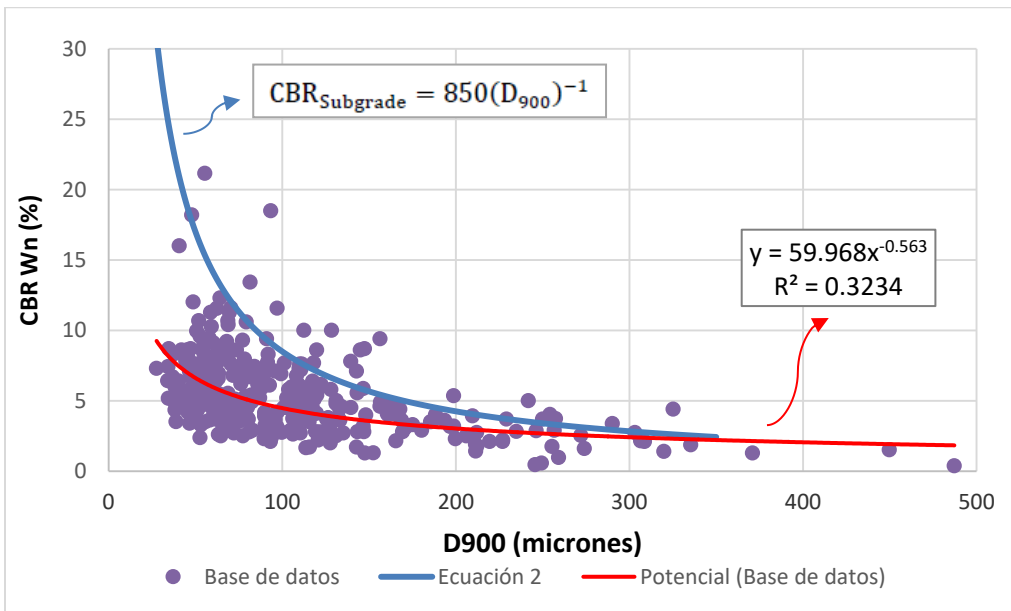


Figura 50 Gráfica de dispersión CBR (humedad natural) vs Deflexión a 900 mm vs ecuación 2, suelos finos

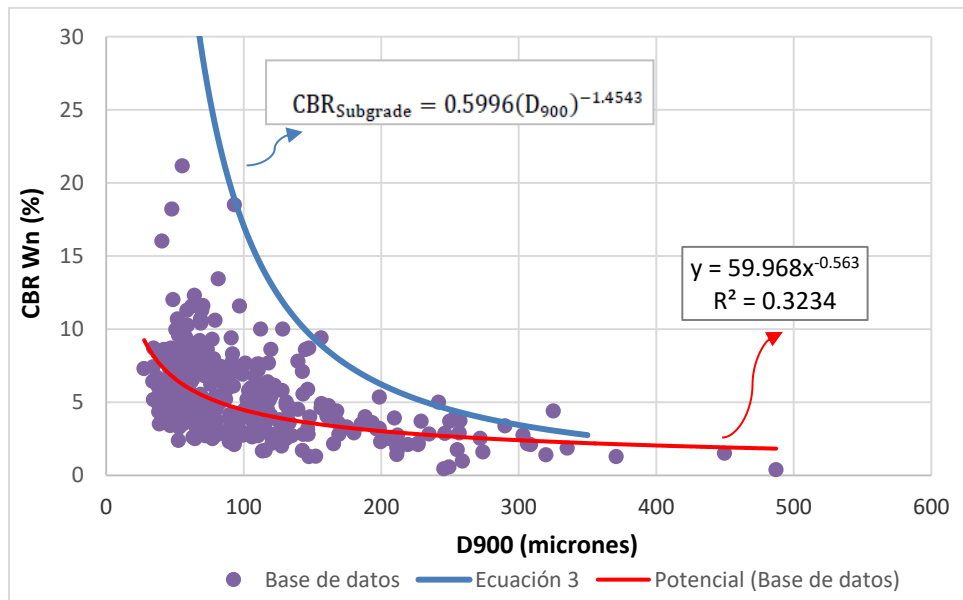


Figura 51 Gráfica de dispersión CBR (humedad natural) vs Deflexión a 900 mm vs ecuación 3, suelos finos

Como se puede ver en las gráficas para suelos finos (limos y arcillas), las tres ecuaciones disponibles presentan una gran diferencia en cuanto a los valores de CBR medidos (datos de este estudio) y los estimados por ellas. Las tres ecuaciones sobrevaloran el valor de CBR a partir de la deflexión; por ejemplo, para una deflexión de 100 micrones, se tiene un CBR del 16.9%, 8.50% y 17.07% (ecuación 1, 2 y 3 respectivamente); mientras que los valores del estudio dan entre 5.6% y 6.2%, lo anterior, puede estar asociado, que no siempre la deflexión ubicada en el sensor a 900 mm es la que evalúa el comportamiento de la subrasante, como se mencionó en capítulos anteriores y, adicionalmente, que la deflexión puede estar asociada al tipo de suelo u otras características del suelo.

Basados en la línea de tendencia estimada para los datos de estudio, entre el CBR y la deflexión D900, se observa un mejor ajuste (Figura 51 $R^2 = 0.32$), sin embargo, con gran dispersión.

4.2 Suelos arenosos

Se grafican los valores de CBR de muestras inalteradas en condiciones de humedad natural (Wn) y CBR compactados en laboratorio (LAB, 95% de compactación y en inmersión).

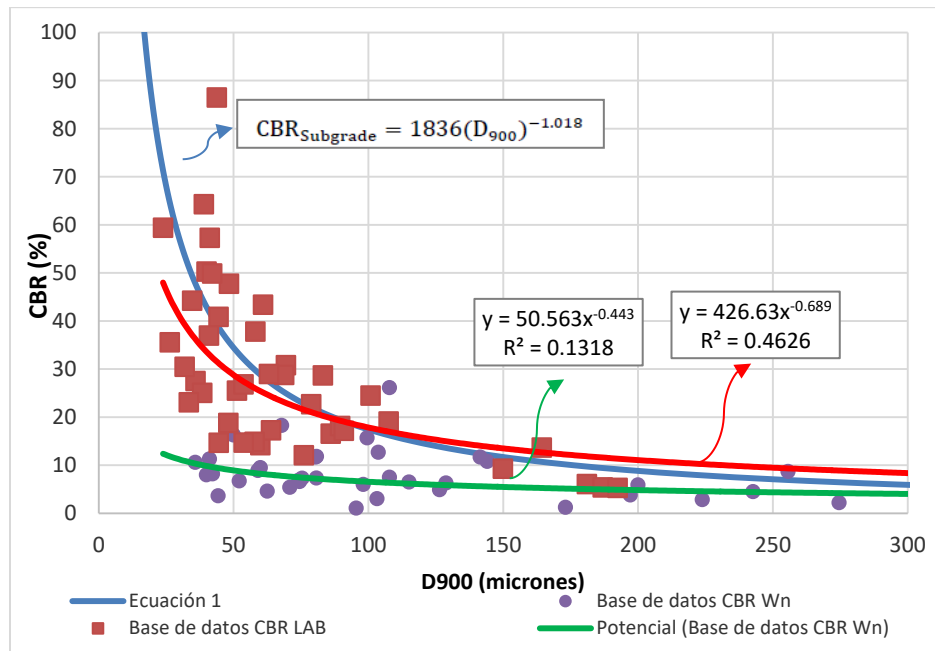


Figura 52 Gráfica de dispersión CBR vs Deflexión a 900 mm vs ecuación 1, suelos arenosos

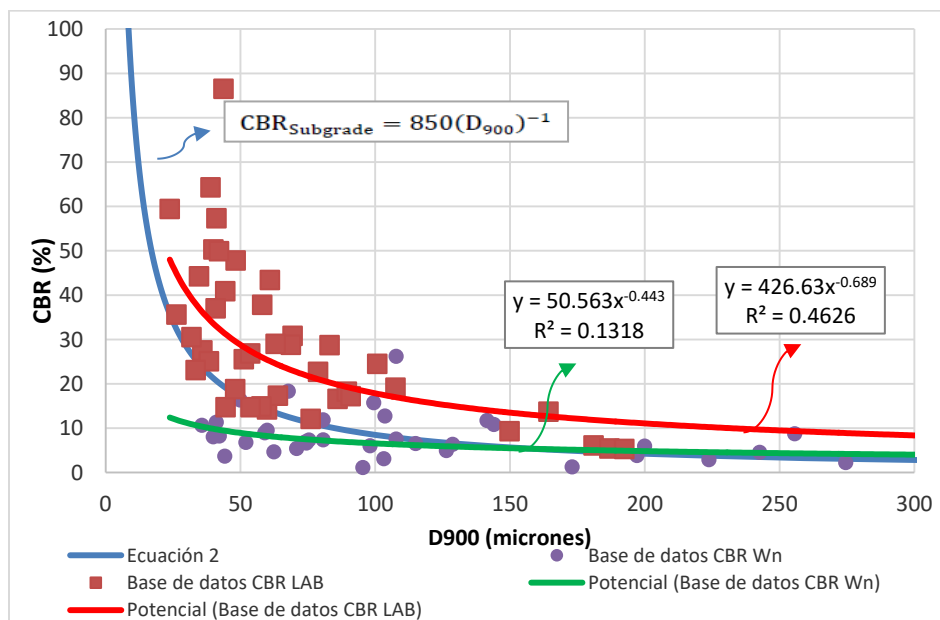


Figura 53 Gráfica de dispersión CBR vs Deflexión a 900 mm vs ecuación 2, suelos arenosos

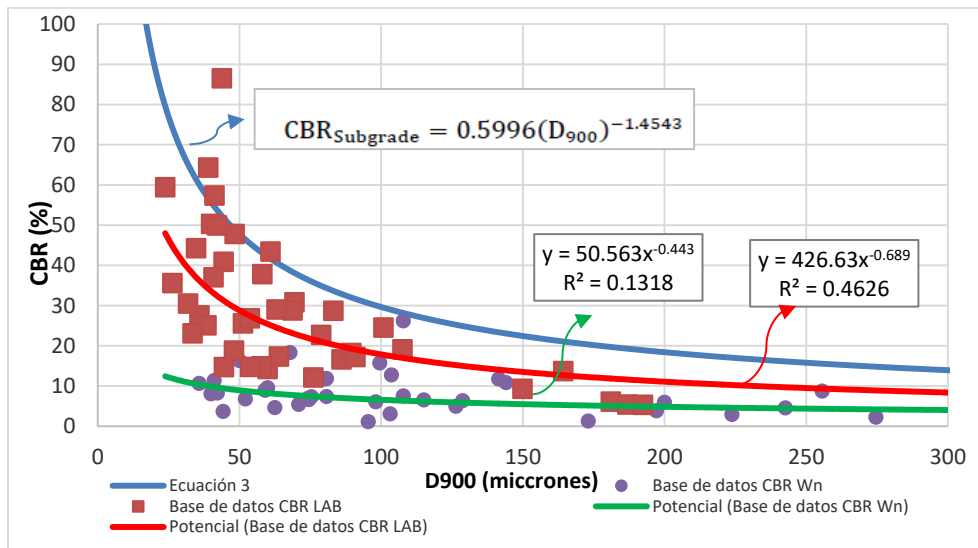


Figura 54 Gráfica de dispersión CBR vs Deflexión a 900 mm vs ecuación 3, suelos arenosos

Para el caso de los materiales arenosos, la dispersión de los datos es un poco menor, ajustándose la ecuación 1 a los CBR compactados en laboratorio y la ecuación 2 a los CBR de muestras inalteradas en humedad natural. Para valores menores a 50 micrones de la deflexión D_{900} , el CBR puede aumentar considerablemente y para valores mayores a 100 micrones, el CBR lleva una tendencia a disminuir y a ser constante. Según la línea de tendencia de los datos de estudio, los CBR de muestras compactadas en laboratorio presentan una mejor correlación, con un R^2 de 0.46.

4.3 Suelos tipo grava

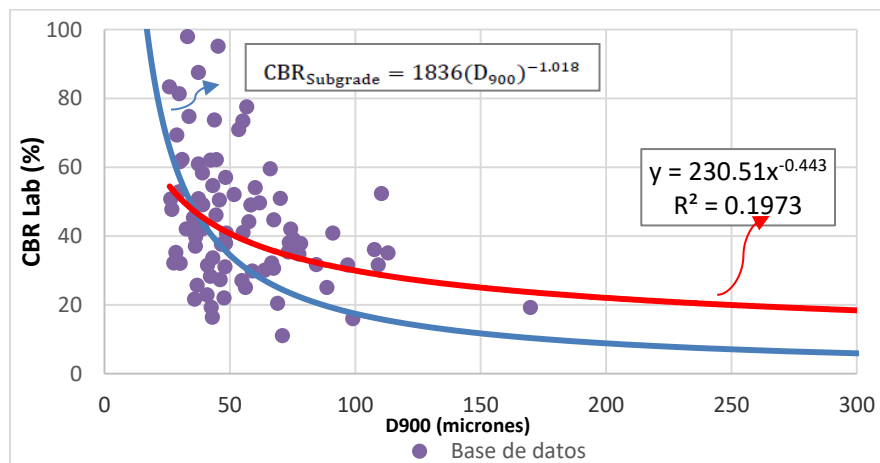


Figura 55 Gráfica de dispersión CBR (Lab) vs Deflexión a 900 mm vs ecuación 1, suelos tipo grava

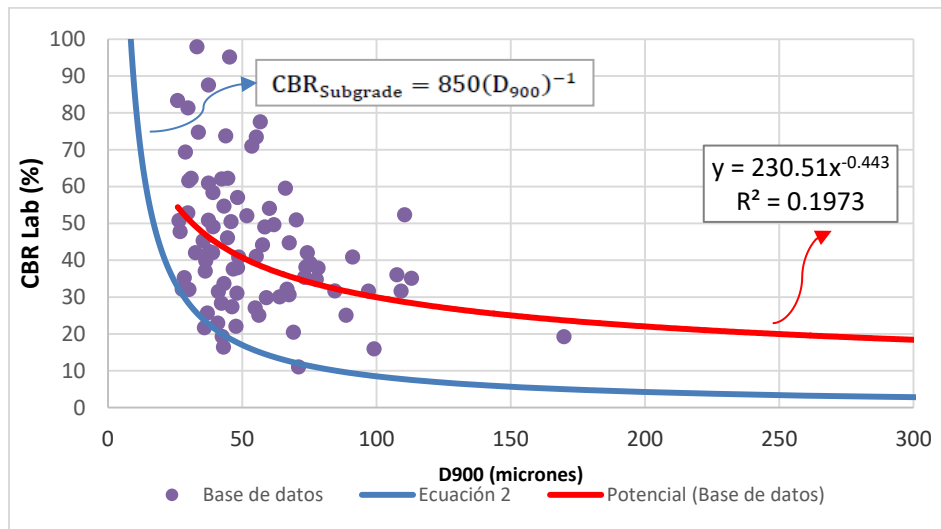


Figura 56 Gráfica de dispersión CBR (Lab) vs Deflexión a 900 mm vs ecuación 2, suelos tipo grava

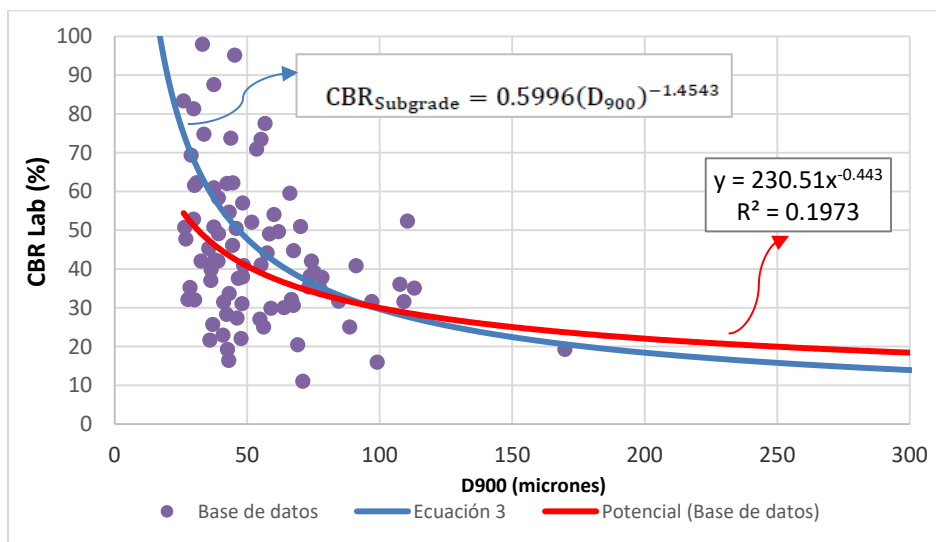


Figura 57 Gráfica de dispersión CBR (Lab) vs Deflexión a 900 mm vs ecuación 3, suelos tipo grava

Por último, para los suelos tipo grava, se puede apreciar que la ecuación 1 y 3 (Jameson y QMDR), se vincula más con los datos de la base de datos, presentando una menor diferencia entre los valores de CBR medidos y los estimados. La ecuación 2, básicamente no relaciona los datos de CBR (medidos y estimados); no tiene ninguna relación con la base de datos. La línea de tendencia de los datos de estudio, en general, no presentan una buena correlación para el CBR y la deflexión a 900 mm; su coeficiente de determinación es muy pobre ($R^2 = 0.19$).

De los análisis anteriores, se puede concluir que para los tipos de suelo arenas y gravas una de las tres ecuaciones presentadas tiene mejor correlación con la base de datos; para los suelos arenosos con la ecuación 1 (Jameson) y para los suelos tipo grava con la ecuación 3 (QDMR). Para el caso de los suelos finos, ninguna de las ecuaciones se ajusta a la base de datos. De las líneas de tendencia propias evaluadas para la base de datos, la que mejor ajuste presenta es para los suelos arenosos con el CBR de laboratorio, seguido la de suelos finos y por último para los suelos tipo grava y arenas (CBR muestra inalterado), con una correlación muy pobre.

Una vez más, se ve la necesidad de evaluar no solo la deflexión medida a una distancia horizontal fija, sino también las características del suelo por su clasificación (suelos finos, arenosos y tipo grava). Es necesario establecer correlaciones con el CBR para cada tipo de suelo, así como la opción de incorporar otros parámetros del suelo; esto se evidencia en los resultados de línea de tendencia obtenidos para los datos de estudios, especialmente para los suelos finos y gravas.

Capítulo 5

Análisis de Regresión y Correlaciones entre CBR y FWD

Para llevar a cabo la determinación de las correlaciones entre el CBR y mediciones de deflectometría, se tiene presente las siguientes consideraciones:

- ✓ Se hará una diferenciación entre materiales de subrasante finos, arenoso y tipo grava.
- ✓ Análisis del sensor a una distancia r del centro de la carga, empleando la metodología AASHTO y método directo.
- ✓ Basados en lo expuesto en el Capítulo 3, se concluye que no existe una correlación directa entre el CBR y los límites de consistencia del suelo. Sin embargo, se analiza la significancia de estas variables independientemente, para ser incluidas, de ser el caso, en un análisis multivariado.
- ✓ En esta investigación se propone realizar un análisis de regresión sobre los datos agrupados, con la finalidad de desarrollar diferentes formas de relacionar los valores de CBR:
 - Suelos finos: CBR muestra inalterada en condición de humedad natural.
 - Suelos arenosos: CBR muestra inalterada en condición de humedad natural y muestras compactadas en laboratorio al 95% y en inmersión.
 - Suelos tipo grava, CBR para muestras compactadas en laboratorio al 95% y en inmersión.
- ✓ Analizar los datos organizados a partir de correlaciones lineales o no lineales; los resultados de este análisis estadístico se evaluarán mediante los parámetros estadísticos.

5.1 Datos empleados para el análisis

En el **Anexo 1** se muestra la base de datos recopilada y organizada en cuanto a los datos de FWD y ensayos de laboratorio, correspondiente a proyectos viales realizados en Colombia entre los años 2010 y 2019; y en el **Anexo 3** los módulos determinados a partir del estudio de deflectometría mediante las metodologías AASHTO 1993 y Método Directo,

en donde se relaciona el sensor y deflexión empleada para su determinación. Como se mencionó anteriormente, se han agrupado los datos según tipo de suelo (Finos, arenas y gravas) y estos a su vez, con CBR de muestras inalteradas en humedad natural y compactados en laboratorio, en inmersión.

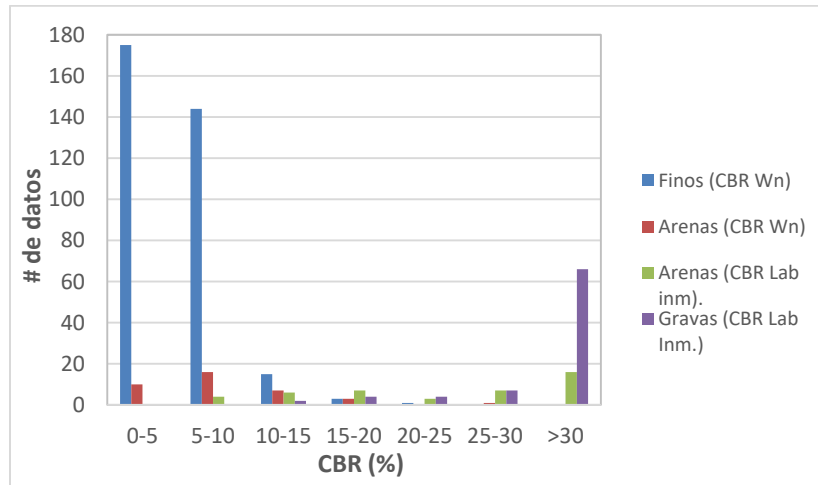


Figura 58 Número de datos de CBR por tipo de suelo

Dentro del rango de valores de CBR menores al 20%, la mayor base de datos es para suelos finos (limos y arcillas), con 338 datos, seguido de las arenas con 36 datos, mientras que el rango de valores de CBR mayores al 30% la mayor frecuencia la presentan los suelos tipo grava con 66 datos dentro de la base de investigación. Por tanto, se tiene una base más amplia para el análisis de suelos finos contrario para los suelos arenosos, en donde la base de datos es más limitada. En conclusión, se tienen: 338 datos para suelos finos (CBR muestras inalteradas humedad natural), 80 datos para suelos arenosos (37 CBR muestra inalterada, humedad natural y 43 CBR muestras compactadas en laboratorio, en inmersión) y 83 para los tipo grava (CBR muestras compactadas en laboratorio, en inmersión).

5.2 Análisis de regresión con modelos clásicos

Lo primero antes de definir un modelo teórico de regresión, es evaluar qué variables son de interés, así como cuáles son las relaciones entre ellas, para que el modelo se pueda describir de la forma más simple posible, o bien que la concordancia entre el modelo y los datos sea lo más completa posible, es decir, con el mínimo error.

Por consiguiente, se evalúa la relación entre el CBR con los resultados obtenidos del estudio de deflectometría: módulos por AASHTO y método directo (MR, MPa), deflexión (dr, mm), distancia del sensor de la deflexión empleada (r o r_{50} , mm) de acuerdo a lo indicado a cada metodología.

5.2.1 Suelos finos

5.2.1.1 CBR muestra inalterada humedad natural vs dr, MR y dr*r (metodología AASHTO)

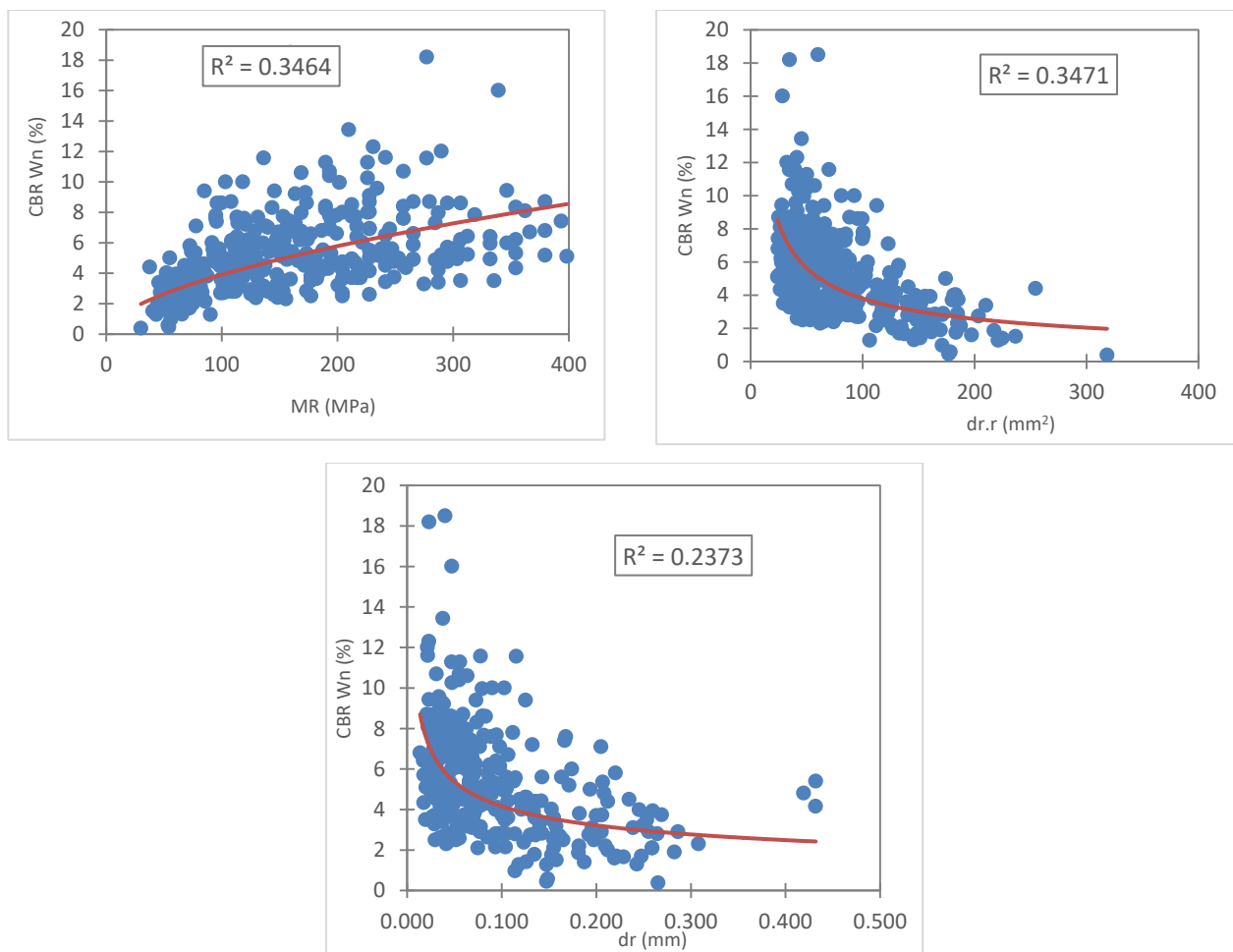


Figura 59 Gráfica de dispersión CBR M.inalterada humedad natural vs MR, dr*r y dr, suelos finos

5.2.1.2 CBR muestra inalterada humedad natural vs dr , MR y dr^*r_{50} (M. Directo)

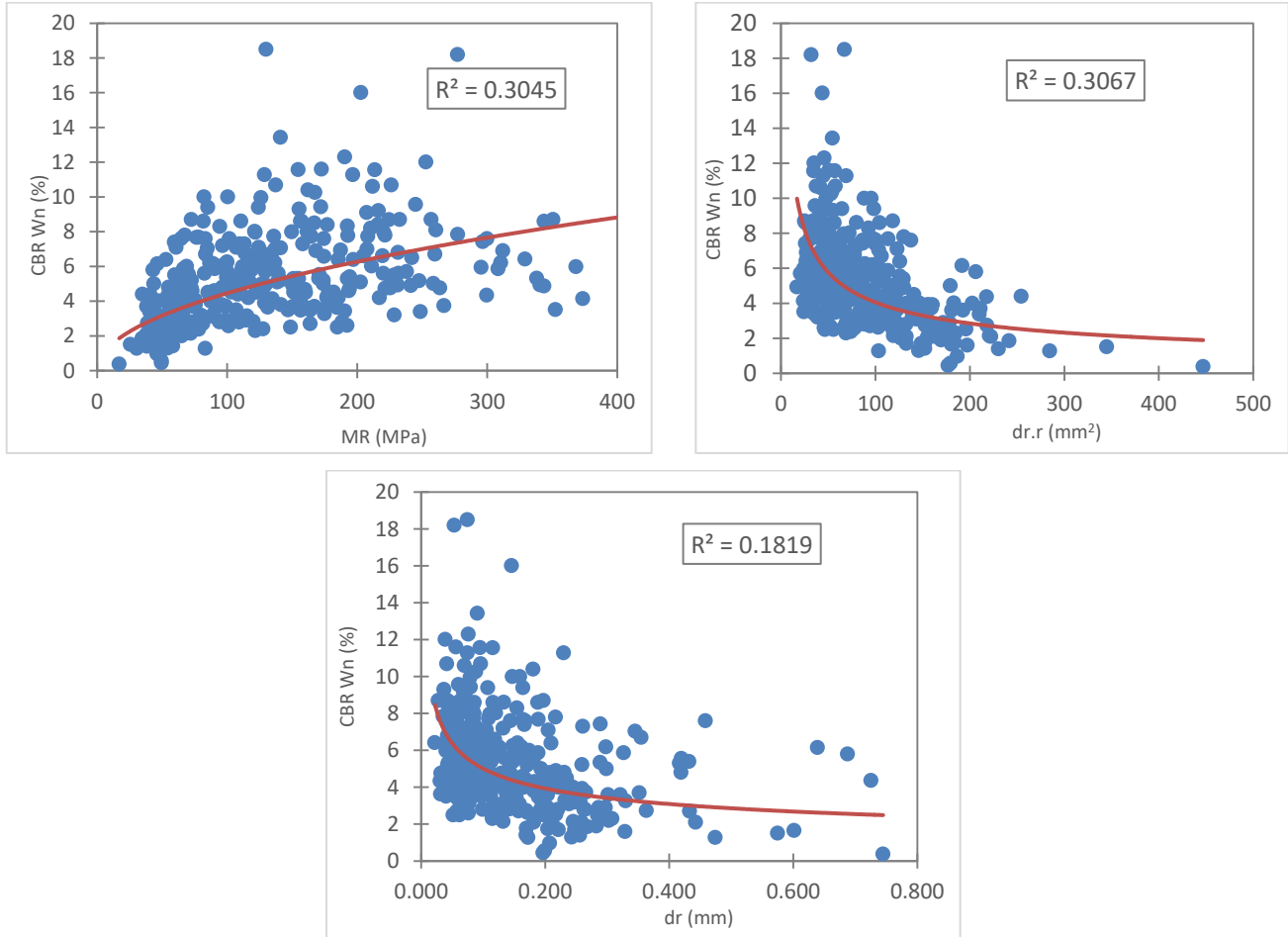


Figura 60 Gráfica de dispersión CBR M. inalterada humedad natural vs MR , dr y dr^*r_{50} , (M. Directo), suelos finos

5.2.2 Suelos arenosos

5.2.2.1 CBR muestra inalterada humedad natural vs MR , dr^*r y dr (metodología AASHTO)

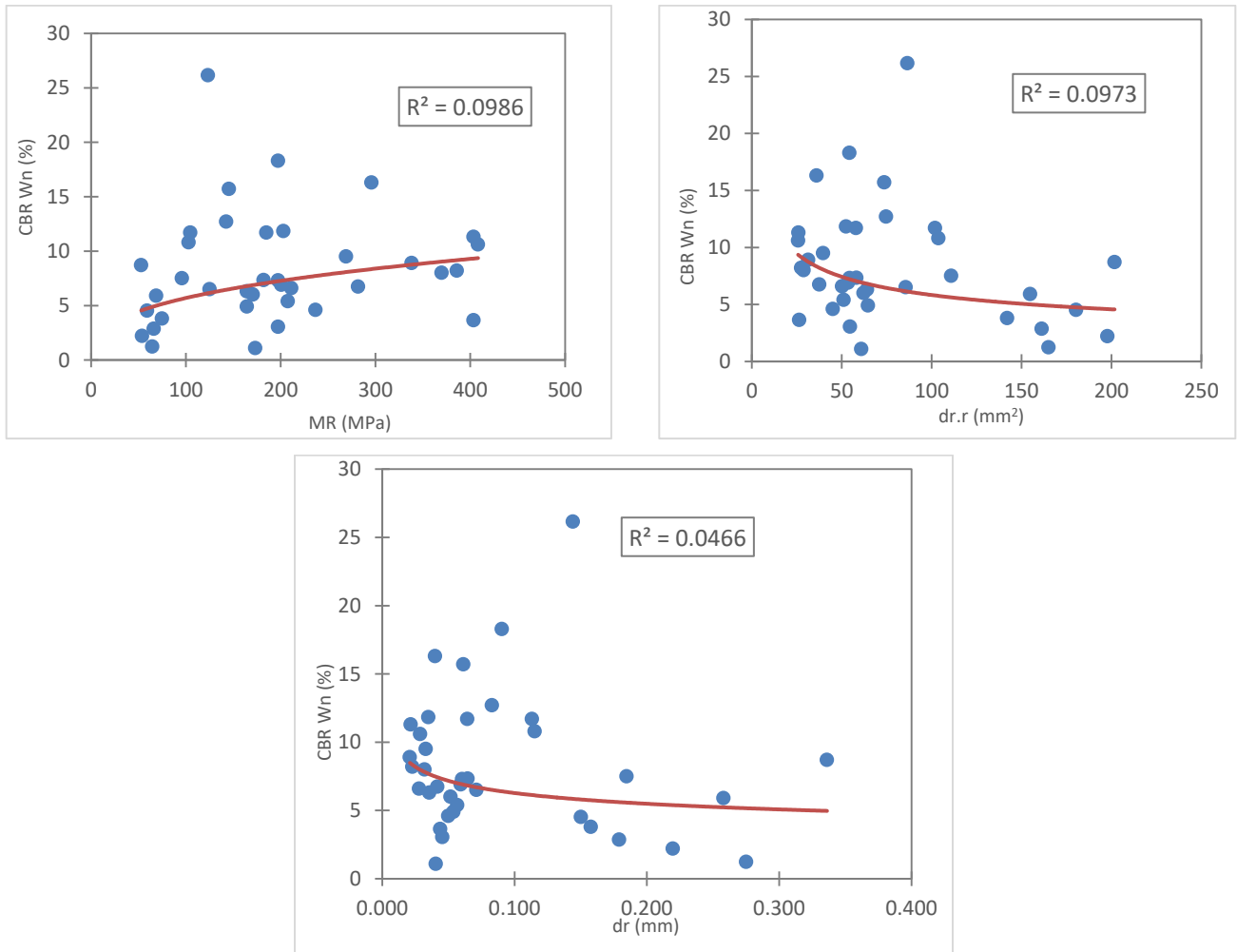


Figura 61 Gráfica de dispersión CBR M. inalterada humedad natural vs MR, dr^*r y dr), suelos arenosos

5.2.2.2 CBR muestra inalterada humedad natural vs MR, dr^*r_{50} y dr, (M. Directo)

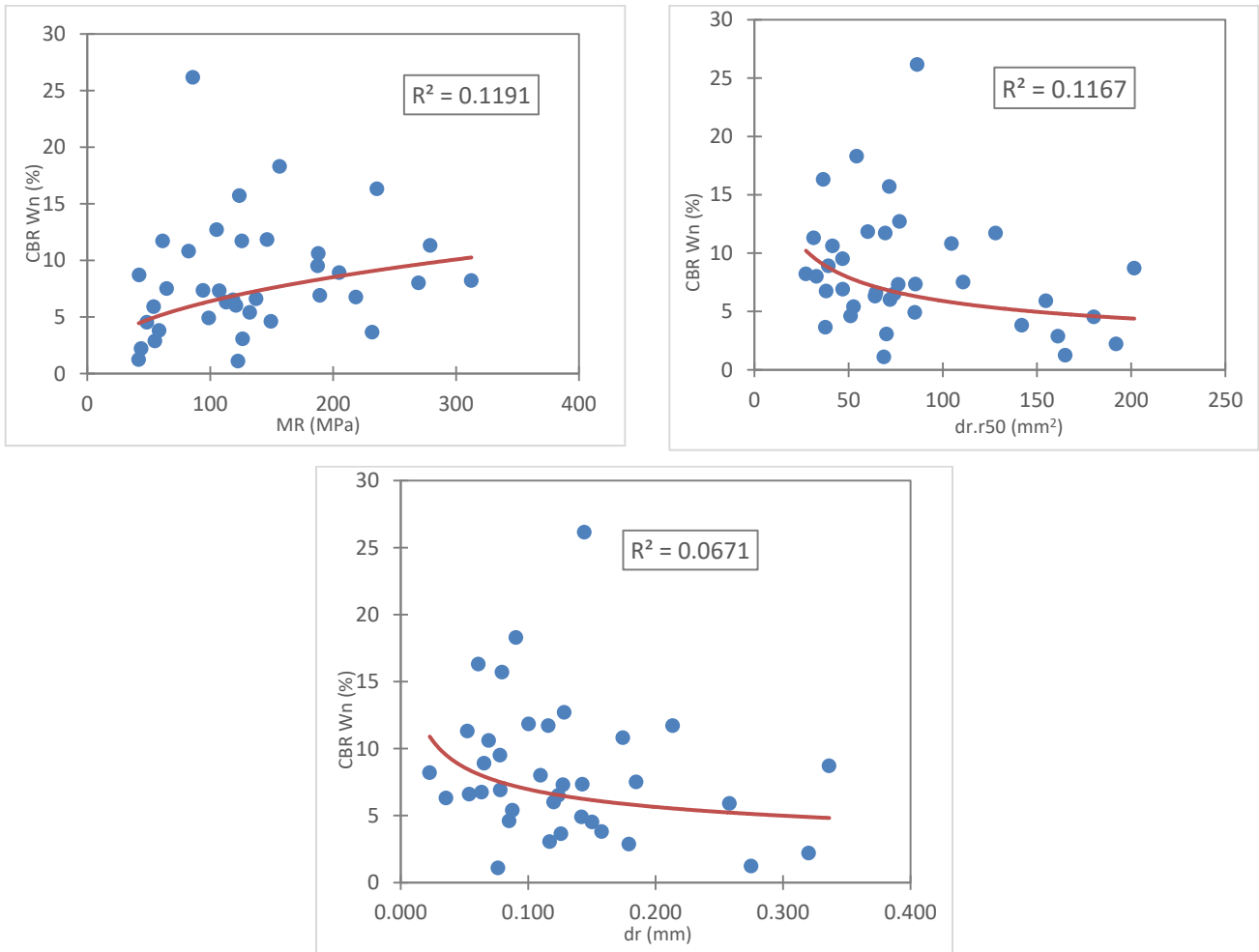


Figura 62 Gráfica de dispersión CBR M. inalterada humedad natural vs MR, $dr \cdot r_{50}$ y dr (M. Directo), suelos arenosos

5.2.2.3 CBR muestra compactada en laboratorio vs MR, $dr \cdot r$ y dr (metodología AASHTO)

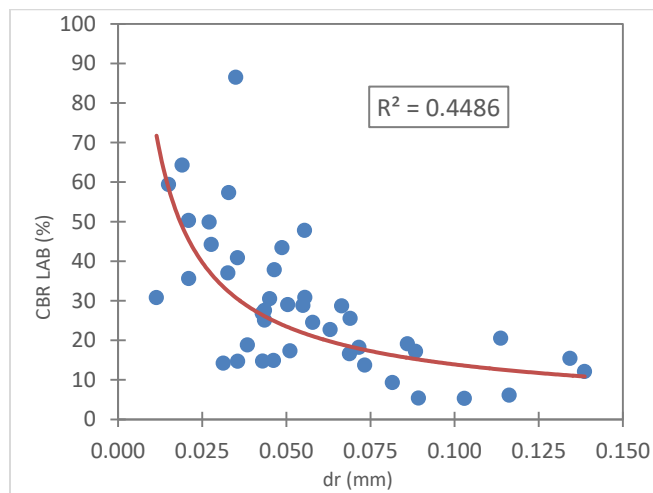
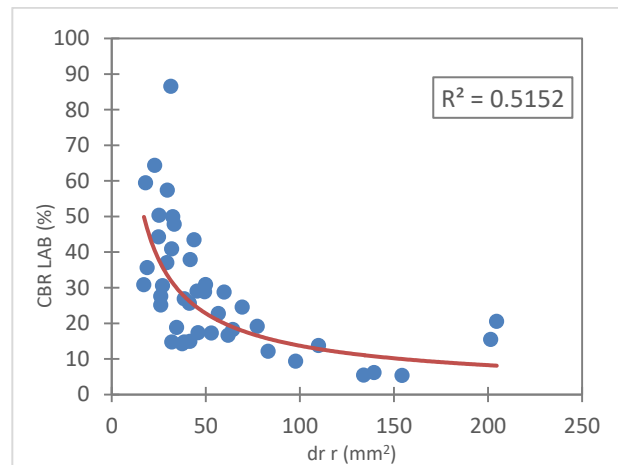
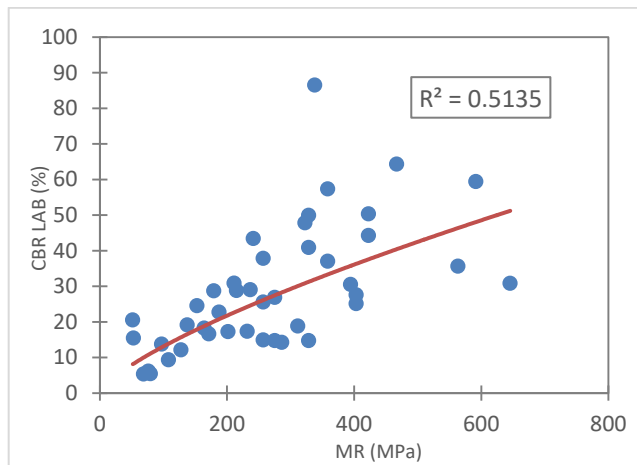


Figura 63 Gráfica de dispersión CBR laboratorio vs MR, $dr \cdot r$ y dr (AASHTO), suelos arenosos

5.2.2.4 CBR muestra compactada en laboratorio vs dr , MR , dr^*r_{50} , $dr^*r_{50}^*HN$ y $dr^*r_{50}^*\%finos$ (M. Directo)

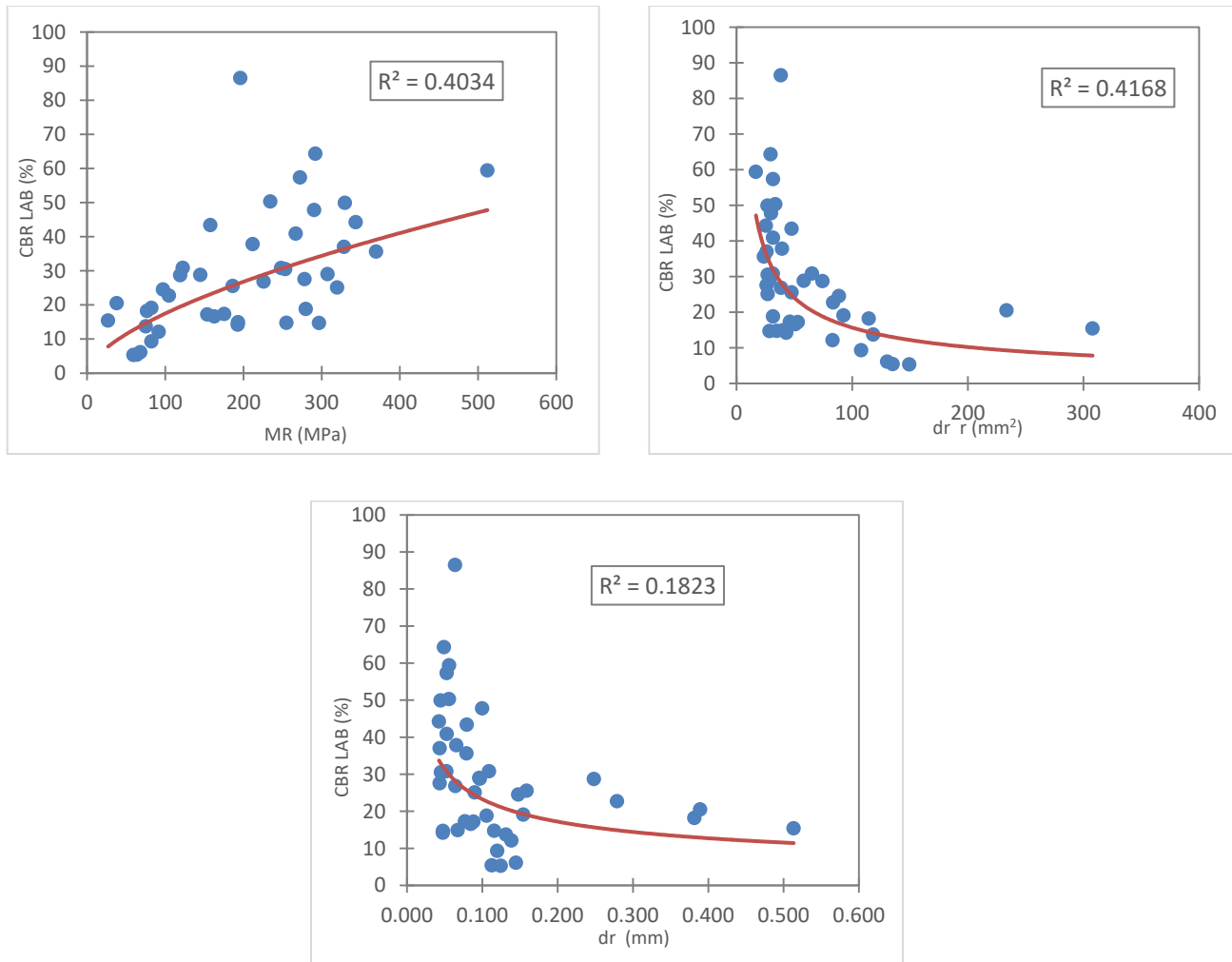


Figura 64 Gráfica de dispersión CBR laboratorio vs MR , dr^*r y dr (M. Directo), suelos arenosos

5.2.3 Suelos tipo grava

5.2.3.1 CBR muestra compactada en laboratorio vs MR , dr , dr^*r , $dr^*r^* \%$ gravas y $dr^*r^* \%$ finos (metodología AASHTO)

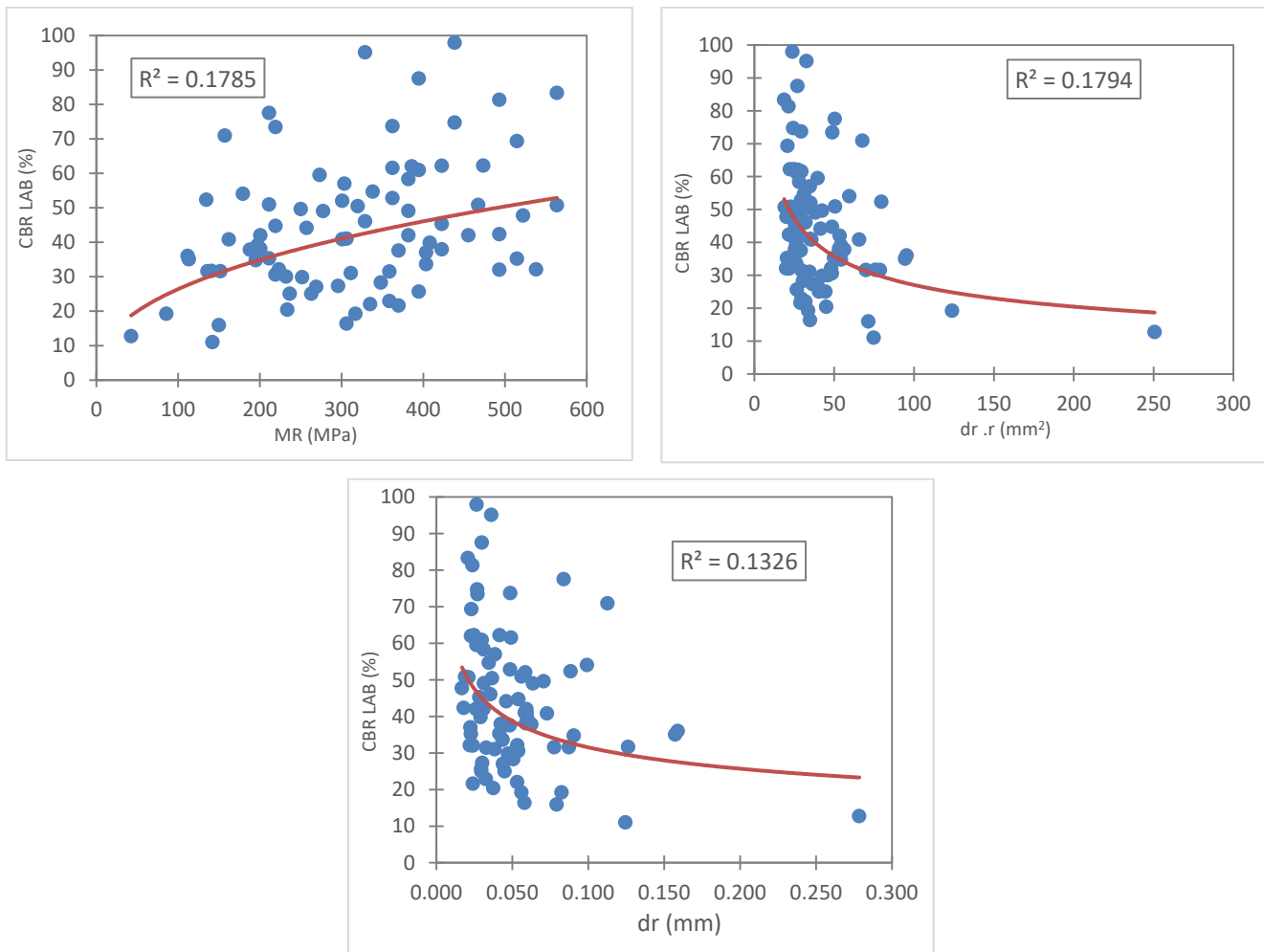


Figura 65 Gráfica de dispersión CBR laboratorio vs MR, $dr \cdot r$, y dr (AASHTO), suelos tipo grava

5.2.3.2 CBR muestra compactada en laboratorio vs dr, $dr \cdot r_{50}$, MR, $dr \cdot r_{50} \cdot \% \text{ gravas}$ y $dr \cdot r_{50} \cdot \% \text{ finos}$ (M. Directo)

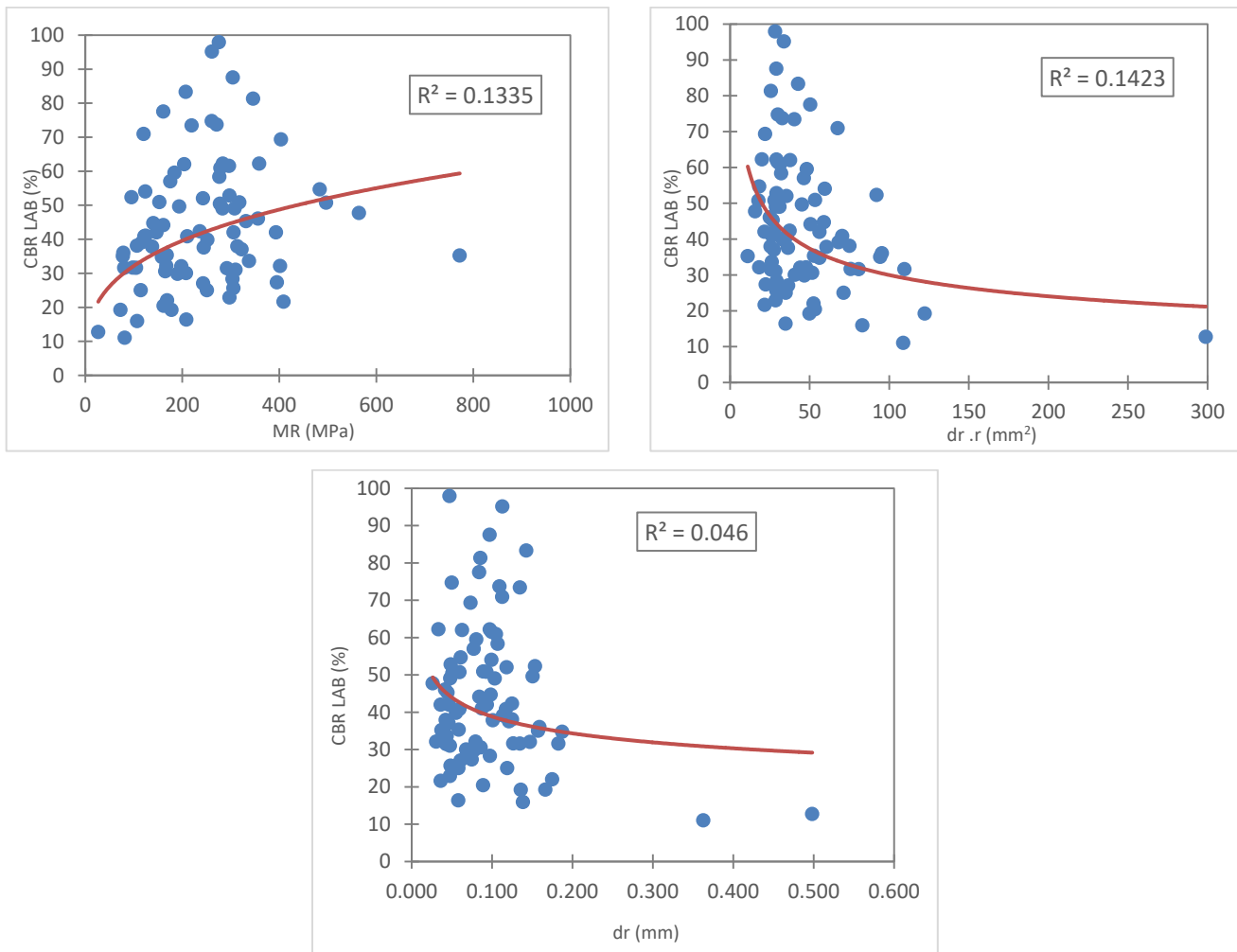


Figura 66 Gráfica de dispersión CBR laboratorio vs MR, $dr \cdot r_{50}$ y dr, suelos tipo grava

5.2.4 Resumen de los análisis de regresión

Tabla 10. Resumen regresiones CBR vs variables – coeficiente de determinación

| Tipo suelo | Variables | Correlación | Parámetros AASHTO | Parámetros M. Directo |
|------------|---|----------------|-------------------|-----------------------|
| | | | R ² | R ² |
| Finos | CBR muestra inalterada humedad natural, módulo | CBR Wn vs MR | 0.3464 | 0.3045 |
| | CBR muestra inalterada humedad natural, deflexión sensor a la distancia r y r | CBR Wn vs dr.r | 0.3471 | 0.3067 |
| | CBR muestra inalterada humedad natural, deflexión sensor a la distancia r | CBR Wn vs dr | 0.2373 | 0.1819 |
| Arenas | CBR muestra inalterada humedad natural, módulo | CBR Wn vs MR | 0.0986 | 0.1191 |

| Tipo suelo | Variables | Correlación | Parámetros AASHTO | Parámetros M. Directo |
|------------|---|-----------------|-------------------|-----------------------|
| | | | R ² | R ² |
| | CBR muestra inalterada humedad natural, deflexión sensor a la distancia r y r | CBR Wn vs dr.r | 0.0973 | 0.1167 |
| | CBR muestra inalterada humedad natural, deflexión sensor a la distancia r | CBR Wn vs dr | 0.0466 | 0.0671 |
| | CBR muestra compact. En laboratorio, módulo | CBR Lab vs MR | 0.5132 | 0.4034 |
| | CBR muestra compact. En laboratorio, deflexión sensor a la distancia r y r | CBR Lab vs dr.r | 0.5152 | 0.4168 |
| | CBR muestra compact. en laboratorio, deflexión sensor a la distancia r | CBR Lab vs dr | 0.4486 | 0.1823 |
| Gravas | CBR muestra compact. En laboratorio, módulo | CBR Lab vs MR | 0.1785 | 0.1335 |
| | CBR muestra compact. En laboratorio, deflexión sensor a la distancia r y r | CBR Lab vs dr.r | 0.1794 | 0.1423 |
| | CBR muestra compact. en laboratorio, deflexión sensor a la distancia r | CBR Lab vs dr | 0.1326 | 0.046 |

De acuerdo con los resultados del análisis de tendencia entre las relaciones del CBR y el MR, deflexión (dr) y ubicación del sensor empleado (r), se observa que existe una gran dispersión (a excepción para los suelos arenosos para el CBR de muestras compactadas en laboratorio), donde se tiene una correlación aceptable evaluada a partir del R², la cual puede disminuir si se involucra otra variable del comportamiento del suelo. Por tanto, en el siguiente numeral se evalúan modelos de regresión para encontrar una correlación entre la deflectometría (ensayos in situ) y resultados de CBR (muestras inalteradas y muestras compactadas en laboratorio), vinculando otras propiedades del suelo, para los tipos de suelos definidos: finos, arenas y gravas, que logre definir una mejor tendencia para estimar una buena correlación. En general, no se espera que las ecuaciones empíricas desarrolladas previamente y las ecuaciones que se desarrollen en el futuro determinen el valor de CBR con precisión para todos los suelos.

Como se puede observar, se obtienen correlaciones pobres y muy pobres evaluadas a partir del coeficiente de determinación, (R² menor a 0.40), a excepción para los suelos arenosos para la relación con el CBR compactado en laboratorio.

Por consiguiente, para la investigación, lo primero fue realizar un análisis dimensional, en donde se evaluó la relación entre variables y la planificación de las correlaciones posibles a partir de las regresiones analizadas. Con lo anterior, se pudo estudiar con mayor facilidad el conjunto de la base de datos objeto de la presente investigación y establecer las variables que indiquen en la respuesta del objetivo, el cual es determinar una correlación entre el CBR y mediciones de deflectometría (FWD). Luego, se adicionaron al modelo variables que logren aumentar el coeficiente de determinación R^2 y verificación mediante otros parámetros estadísticos; solo se incluyó una variable adicional a la vez, teniendo en cuenta que no se debe incluir demasiados términos en el modelo que logre sobre ajustarlo y en la práctica se vuelva inapropiado.

Por tanto, se realiza un análisis de varianza (ANOVA por sus siglas en inglés, Analysis Of Variance), el cual prueba la hipótesis de que las medias de dos o más variables son iguales. Los ANOVA evalúan la importancia de uno o más factores al comparar las medias de la variable de respuesta en los diferentes niveles de los factores. La hipótesis nula establece que todas las medias de las variables son iguales mientras que la hipótesis alternativa establece que al menos una es diferente.

Los análisis ANOVA requieren datos que sigan una distribución aproximadamente normal con varianzas iguales entre los niveles de factores. Sin embargo, los procedimientos de ANOVA funcionan bastante bien incluso cuando se viola el supuesto de normalidad, a menos que una o más de las distribuciones sean muy asimétricas o si las varianzas son bastante diferentes.

Para determinar si cualquiera de las diferencias entre las medias es estadísticamente significativa, se compara el valor p con el nivel de significancia para evaluar la hipótesis nula. Por lo general, un nivel de significancia (denotado como α o alfa) de 0.05 funciona adecuadamente. Un nivel de significancia de 0.05 indica un riesgo de 5% de concluir que existe una diferencia cuando no hay una diferencia real.

Valor $p \leq \alpha$: Las diferencias entre algunas de las medias son estadísticamente significativas. Si el valor p es menor que o igual al nivel de significancia, se rechaza la hipótesis nula y concluye que no todas las medias de población son iguales.

Valor $p > \alpha$: Las diferencias entre las medias no son estadísticamente significativas Si el valor p es mayor que el nivel de significancia, no se cuenta con suficiente evidencia para rechazar la hipótesis de que las medias de población son todas iguales.

En consecuencia, con ayuda de la herramienta estadística Rstudio y el análisis ANOVA, se analiza algunas de las propiedades del suelo con relación al CBR para cada tipo de suelo. A continuación, los resultados obtenidos:

Tabla 11. Resultados análisis ANOVA, RStudio

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) | | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
|-----------|-----|--------|---------|---------|--------------|-----------|-----|--------|---------|---------|----------|
| HN | 1 | 326.5 | 326.5 | 48.88 | 1.48e-11 *** | LP | 1 | 23.3 | 23.257 | 3.059 | 0.0812 . |
| Residuals | 336 | 2244.3 | 6.7 | | | Residuals | 328 | 2494.1 | 7.604 | | |
| IP | 1 | 14.2 | 14.219 | 1.863 | 0.173 | p200 | 1 | 11.4 | 11.396 | 1.849 | 0.175 |
| Residuals | 328 | 2503.1 | 7.631 | | | Residuals | 292 | 1799.7 | 6.163 | | |

Suelos finos, CBR muestra inalterada, Wn

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) | | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
|-----------|----|--------|---------|---------|-----------|-----------|----|--------|---------|---------|------------|
| HN | 1 | 226.6 | 226.56 | 11.29 | 0.0019 ** | LP | 1 | 9.1 | 9.143 | 0.572 | 0.456 |
| Residuals | 35 | 702.5 | 20.07 | | | Residuals | 27 | 431.3 | 15.973 | | |
| IP | 1 | 64.7 | 64.69 | 4.649 | 0.0401 * | HN | 1 | 142.65 | 142.65 | 13.195 | 0.00121 ** |
| Residuals | 27 | 375.7 | 13.92 | | | LP | 1 | 16.68 | 16.68 | 1.543 | 0.22522 |
| | | | | | | Residuals | 26 | 281.08 | 10.81 | | |

Suelos arenosos, CBR muestra inalterada, Wn

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) | | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
|-----------|----|--------|---------|---------|------------|-----------|----|--------|---------|---------|----------|
| HN | 1 | 2359 | 2358.6 | 9.262 | 0.00407 ** | LP | 1 | 836 | 836.3 | 3.366 | 0.079 . |
| Residuals | 41 | 10441 | 254.7 | | | Residuals | 24 | 5963 | 248.4 | | |
| IP | 1 | 49 | 48.91 | 0.174 | 0.68 | p200 | 1 | 1515 | 1514.7 | 5.503 | 0.0239 * |
| Residuals | 24 | 6750 | 281.25 | | | Residuals | 41 | 11285 | 275.3 | | |

Suelos arenosos, CBR compact. Laboratorio, inmersión

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) | | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
|-----------|----|--------|---------|---------|----------|-----------|----|--------|---------|---------|--------------|
| grava | 1 | 1871 | 1870.8 | 5.445 | 0.0221 * | finos | 1 | 4283 | 4283 | 13.65 | 0.000399 *** |
| Residuals | 81 | 27831 | 343.6 | | | Residuals | 81 | 25418 | 314 | | |
| | | | | | | grava | 1 | 1871 | 1870.8 | 5.888 | 0.01749 * |
| | | | | | | finos | 1 | 2414 | 2413.6 | 7.597 | 0.00724 ** |
| | | | | | | Residuals | 80 | 25417 | 317.7 | | |

Suelos tipo grava, CBR compact. Laboratorio, inmersión

Tabla 12. Resumen valores P-value

| Tipo de suelo | CBR | Pr (>F) | | | | | | |
|---------------|--------------------------------------|---------|--------|--------|---------|----------|-------------------|----------------|
| | | HN | LP | IP | % finos | % gravas | HN+IP | %gravas+%finos |
| Fino | Muestra inalterada, humedad natural | 0.0000 | 0.0812 | 0.1730 | 0.175 | | | |
| Arena | Muestra inalterada, humedad natural | 0.0019 | 0.4560 | 0.0401 | | | 0.00121 - 0.22522 | |
| | Compactado en laboratorio, inmersión | 0.0047 | 0.0790 | 0.6800 | 0.0239 | | | |

| Tipo de suelo | CBR | Pr (>F) | | | | | | |
|---------------|--------------------------------------|---------|----|----|---------|----------|-------|-------------------|
| | | HN | LP | IP | % finos | % gravas | HN+IP | %gravas+%finos |
| Grava | Compactado en laboratorio, inmersión | | | | 0.0004 | 0.0221 | | 0.01749 - 0.00724 |

HN: Humedad Natural, LP: Límite Plástico, IP: Índice de Plasticidad

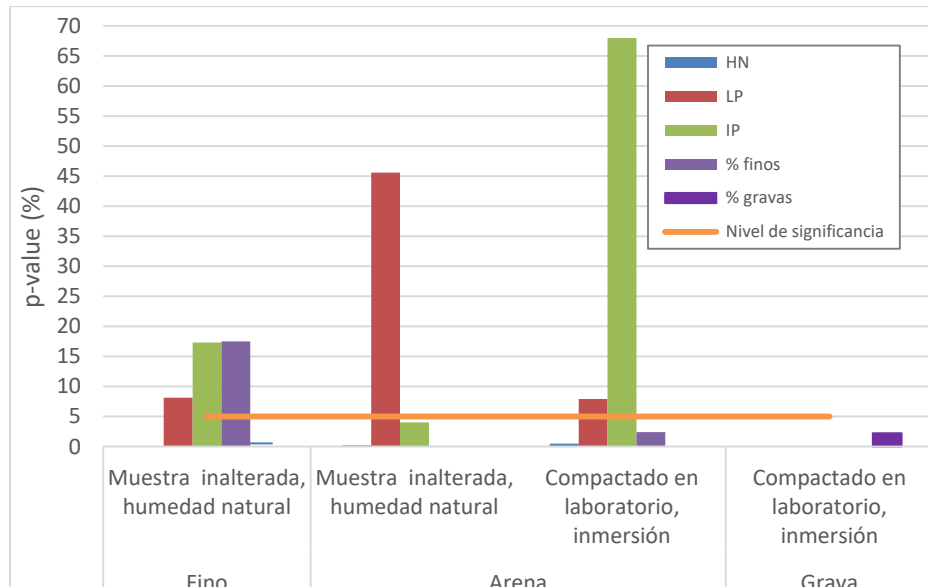


Figura 67 Gráfica valores P vs nivel de significancia, análisis ANOVA

Como se puede observar en la Tabla 12 y Figura 67, la variable HN tiene un nivel de significancia alta frente a los valores de CBR para los suelos finos y arenas; para los suelos tipo grava, las variables % finos y % gravas evaluadas tiene gran significancia frente a los valores de CBR. Por el contrario, las variables LL e IP, los valores de p son bastante altos, muy por encima del valor de significancia adoptado de 5%, según las hipótesis planteadas.

Los resultados del análisis ANOVA, permiten indicar que las variables que tienen mayor influencia adicional a los datos de deflectometría en el análisis del CBR son la humedad natural y el porcentaje de finos del suelo.

Adicionalmente, se hace un análisis de correlaciones entre el CBR, dr^*r y los parámetros del suelos, el cual se presenta en el **Anexo 4**. Allí se muestra el coeficiente de correlación, r , obtenido para cada análisis. De los resultados se concluye, al igual que el análisis Anova, que las variables de mayor incidencia para mejorar las correlaciones entre el CBR y la deflectometría son la humedad natural, el porcentaje de finos y gravas del suelo.

5.3 Análisis estadísticos para la determinación de correlaciones entre CBR y FWD

El análisis de regresión es una técnica estadística muy útil en el campo de la ingeniería y la ciencia para modelar e investigar las relaciones entre dos o más variables (dependiente una o más variables independientes (o predictoras)). El método de análisis de regresión se emplea para desarrollar la línea o curva que proporciona el mejor ajuste a través de un conjunto de puntos de datos.

Ajustar un modelo de regresión requiere varios supuestos. El método de mínimos cuadrados se utiliza para elegir la mejor línea de ajuste para un conjunto de datos. La estimación de los parámetros del modelo requiere la suposición de que los residuales (valores reales menos valores estimados) correspondientes a diferentes observaciones, son variables aleatorias no correlacionadas con media cero y varianza constante (σ^2). En la situación más práctica, la varianza (σ^2) del error aleatorio (\mathcal{E}) será desconocida y debe estimarse a partir de los datos de la muestra. El error estándar de una estimación da alguna idea sobre la precisión de una estimación de acuerdo con el modelo escogido. Durante la modelación, una variable que muestra el menor error estándar de las estimaciones es la que se debe elegir. (Bekele, 2017).

El desarrollo de modelos de regresión múltiple incluye varios pasos. En el primer paso los diagramas de dispersión entre la variable dependiente y las variables independientes se examinan para posibles correlaciones lineales. La importancia de las correlaciones lineales entre dos de las variables se mide utilizando el coeficiente de correlación de Pearson (r). El coeficiente de correlación de Pearson es un índice que mide el grado de covariación entre distintas variables relacionadas linealmente. El rango de valores que r puede asumir va de -1.0 a $+1.0$, siendo más débil la relación para r más cerca de 0.0 , y una mejor o mayor relación, cuanto más cerca esté r de -1.0 o $+1.0$.

La Tabla 13, presenta el intervalo de clasificación según el valor de r .

Tabla 13. Intervalo de clasificación del coeficiente de correlación

| | | | | | | |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------|
| Nula | Muy baja | Baja | Moderada | Alta | Muy alta | Perfecta |
| 0.0 | 0.01 - 0.19 | 0.20 – 0.39 | 0.40 – 0.69 | 0.70 – 0.89 | 0.90 – 0.99 | 1.0 |

Fuente: (Rowntree, 1984)

En la Tabla 14, se muestran los criterios sugeridos por Pellinen, para determinar la bondad del ajuste en función del R^2 .

Tabla 14. Criterio de bondad de ajuste

| Criterio | R^2 |
|-----------|-------------|
| Excelente | ≥ 0.90 |
| Buena | 0.70 – 0.89 |
| Aceptable | 0.40 – 0.69 |
| Pobre | 0.20 – 0.39 |
| Muy Pobre | ≥ 0.19 |

Fuente: Araujo Navaro, 2014

Investigation of the use of dynamic modulus as an indicator of hot – mix asphalt performance.

Pellien (2001)

En el análisis de regresión múltiple, para verificar su validez, se examina la importancia de variables independientes y detectar cualquier multicolinealidad (posibles correlaciones entre variables independientes) o problemas de heterocedasticidad (varianza de error desigual). La idoneidad del modelo se evalúa mediante la prueba F. La probabilidad asociada con la prueba F se designa como $Pr > F$ o valor p. Un valor p pequeño (menor que 0.05) implica que el modelo es significativo al explicar la variación en la variable dependiente. La prueba t se utiliza para examinar la importancia de cada una de las variables independientes utilizadas en el modelo. Similar a la prueba F, la probabilidad asociada con la prueba t se designa con un valor p. Un valor que es inferior a 0,05 indica que, a un nivel de confianza del 95 por ciento, la variable independiente es significativa para explicar la variación de la variable dependiente. La multicolinealidad se detecta utilizando el factor de inflación de varianza (VIF). Un factor VIF mayor que 10 indica que las dependencias débiles pueden estar comenzando a afectar las estimaciones de regresión. Finalmente, la gráfica residual se usa para verificar la heterocedasticidad examinando si los datos tienen un cierto patrón.

En los modelos de regresión lineal multivariado, en muchas ocasiones, se tiene que uno o varios de estos supuestos no se cumplen. Estos problemas se pueden llegar a solucionar mediante la transformación de la variable respuesta. Sin embargo, estas transformaciones no siempre consiguen corregir la falta de normalidad, la heterocedasticidad (varianza no constante) o la no linealidad de los datos. Además, muchas veces, resulta difícil interpretar los resultados obtenidos.

Una alternativa a la transformación de la variable respuesta y a la falta de normalidad, es el uso de los modelos lineales generalizados. Los modelos lineales generalizados (GLM de las siglas en inglés de Generalized Linear Models) son una extensión de los modelos lineales que se pueden aplicar cuando los errores no son normales (binomial, Poisson, multinomial, entre otros). Estos modelos fueron propuestos en Nelder and Wedderburn en 1972. Ciertos tipos de variables respuesta sufren indefectiblemente la violación de estos supuestos de los modelos gaussianos y los GLM ofrecen una alternativa para evaluarlos. (Duarte, 2016)

En el modelo de regresión lineal generalizado es posible flexibilizar este criterio y considerar una formulación más general que permita también contemplar variables dependientes con una estructura no métrica, es decir, variables categóricas (ordinales o nominales), al tiempo que relajar los supuestos del Modelos Lineal clásico, como la linealidad o la homocedasticidad, no así la independencia de los errores.

Los modelos Generalizados Lineales tienen tres propiedades:

1. La estructura del error
2. El predictor lineal
3. La función de vínculo.

En modelos generales lineales la variable dependiente y sus residuos deben ajustarse a una normal. Sin embargo, hay numerosas situaciones en las que esto no ocurre. Por tanto, los modelos MLG logran conseguir la normalidad de los errores (residuos).

Si se generaliza la definición de la distribución de los errores, se puede trabajar con otras distribuciones de los mismos: a) distribuciones Poisson (útiles con conteos) b) distribuciones Binomiales (útiles con proporciones) c) distribuciones Gamma (datos con CV homogéneo). (<https://slideplayer.es/slide/3447951/>).

Tabla 15. Comparativo entre el modelo ML y MLG

| Modelo Lineal (ML) | Modelo Lineal Generalizado (MLG) |
|---|---|
| $y_i = \sum_j \beta_j X_{ij} + \varepsilon_i$ | $y_i = \sum_j \beta_j X_{ij} + \varepsilon_i$ |
| $\mu_i = E(Y_i)$ | $\mu_i = E(Y_i)$ |
| $\eta_i = \sum_j \beta_j X_{ij}$ | $\eta_i = \sum_j \beta_j X_{ij}$ |
| $\eta_i = \mu_i$ | $\eta_i = g(\mu_i)$ |
| <p>y_i: vector de la variable respuesta,</p> <p>X_{ij}: matriz de variables predictoras y covariables</p> <p>β_j: vector de parámetros</p> <p>η_i: vector del predictor lineal</p> | |

Fuente: (Lopez Gonzalez & Ruiz Soler, 2011)

Como se puede ver en la Tabla 15, la expresión del modelo lineal (ML) y generalizado (MLG) es la misma, siendo los valores ajustados $\mu_i = E(Y_i)$. El predictor lineal también coincide: $\eta_i = \sum_j \beta_j x_{ij}$. Aparecen diferencias, en la relación entre los valores ajustados μ_i y el predictor lineal η_i . Estas diferencias se concretan en la función de enlace y en la distribución que ésta debe seguir, función que cobra un especial significado como se indica a continuación (Lopez Gonzalez & Ruiz Soler, 2011):

1. Mientras que en el ML se produce una relación de identidad entre los valores ajustados y el predictor lineal, $\mu_i = \eta_i$, en el MLG la linealidad se establece en la escala del predictor lineal pero no en la escala de los valores ajustados.

No se da, por tanto, la identidad entre valores ajustados y valores predichos, sino que entre ellos media una función que los relaciona, la función de enlace: $g(\mu_i) = \eta_i$. Esto hace que

en el MLG ambos lados de la ecuación no se expresen en la misma escala de medida, lo que sí sucede en el ML.

2. El componente aleatorio del Modelo Lineal debe distribuirse normalmente, y este hecho tiene una importancia considerable: según sea la distribución de los errores serán las distribuciones condicionadas de los valores pronosticados del criterio, que, por tanto, deben ser normales también. Esto es así porque ambas distribuciones están relacionadas a través de una matriz. En el MLG sucede que el componente aleatorio no sigue necesariamente una distribución normal, sino que utiliza cualquier distribución de la familia exponencial y, en consecuencia, las distribuciones de los valores pronosticados del criterio no serán normales necesariamente.
3. Las distribuciones condicionadas de los valores pronosticados de la variable de respuesta en el ML deben ser homocedásticas, y ello es posible siempre que esta condición se cumpla en el componente aleatorio. Como en el MLG los errores pueden seguir cualquier distribución de la familia exponencial, resulta que para la distribución de los errores la homocedasticidad no es imprescindible.
4. Las diferencias indicadas, obligan a estimar los parámetros de un MLG con un método de ajuste distinto al procedimiento de mínimos cuadrados que se emplea en el ML: el método de máxima verosimilitud (que también puede ser aplicado en el ML).

La inversa de la función de enlace (o función de transformación), al ser aplicada al resultado del predictor lineal η_i , se obtiene el valor esperado, μ , que se encuentra en la escala de la variable de respuesta:

$$\mu_i = g^{-1}(\beta_0 + \beta_1 X_i)$$

Ecuación 35

El protagonismo de ese tercer elemento que relaciona los componentes aleatorio y sistemático, es decir, el valor esperado y el valor predicho por el modelo, la función de enlace $g(\mu)$, se destaca en el modelo MLG.

5.3.1 Análisis de residuales

Interesa probar hipótesis y establecer intervalos de confianza de los parámetros del modelo. Los procedimientos de comprobación requieren hacer la hipótesis adicional de que los errores ε_i del modelo estén distribuidos normalmente. Así, las hipótesis completas son: que los errores estén distribuidos en forma normal e independiente, con media 0 y varianza σ^2 .

La prueba de significancia de la regresión más común empleada es la siguiente:

$$H_0: \beta_1 = 0$$

$$H_1: \beta_1 \neq 0$$

Ecuación 36

- ✓ El no rechazar $H_0: \beta_1 = 0$ implica que no hay relación lineal entre x y y .

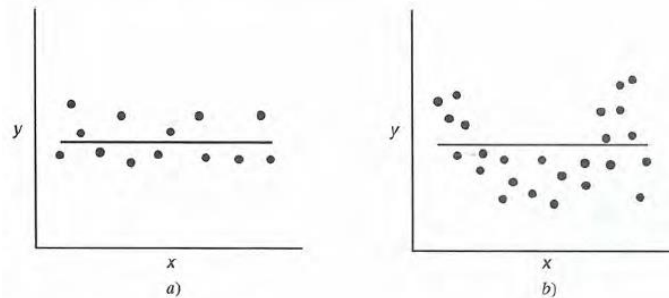


Figura 68 Casos en los que no se rechaza la hipótesis $H_0: \beta_1 = 0$. Fuente: (Montgomery, Peck, & Vining, 2002)

- ✓ Por otro lado, si se rechaza, $H_0: \beta_1 = 0$, eso implica que x sí tiene valor para explicar la variabilidad de y .

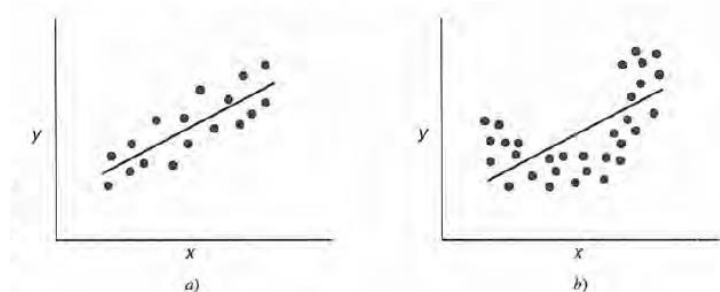


Figura 69 Casos en los que sí se rechaza la hipótesis $H_0: \beta_1 = 0$. Fuente: (Montgomery et al., 2002)

Rechazar $H_0: \beta_1$ Podría equivaler a que el modelo de línea recta es adecuado o que, aunque hay un efecto lineal de x se podrían obtener mejores resultados agregando términos polinomiales en x .

Con el uso y resultados del paquete estadístico, RStudio, se obtienen los errores estándar de la pendiente, junto con el estadístico t para probar $H_0: \beta_1=0$ y $H_0: \beta_0=0$. En RStudio se usa el método del valor p para pruebas de hipótesis.

Las pequeñas desviaciones respecto a la hipótesis de normalidad no afectan mucho al modelo, pero una no normalidad grande es potencialmente más seria, porque los estadísticos t o F y los intervalos de confianza y de predicción dependen de la suposición de normalidad. Además, si los errores provienen de una distribución con colas más gruesas que la normal, el ajuste por mínimos cuadrados será sensible a un subconjunto menor de datos.

Las distribuciones de error con "colas" gruesas generan con frecuencia valores atípicos que "jalan" demasiado en su dirección el ajuste por mínimos cuadrados. Un método muy sencillo de comprobar la suposición de normalidad es trazar una gráfica de probabilidad normal de los residuales. Es una gráfica diseñada para que al graficarse la distribución normal acumulada parezca una línea recta. (Montgomery et al., 2002).

La Figura 70 muestra la gráfica de probabilidad posible, tomado de (Montgomery et al., 2002). La Figura 70 (a) muestra una gráfica de probabilidad normal "idealizada", los puntos caen aproximadamente sobre una recta. Las partes b a e de la gráfica muestran otros problemas característicos. La parte b muestra una curva que va bruscamente hacia arriba y hacia abajo en los dos extremos, lo que indica que las colas de esta distribución son demasiado gruesas para poder considerarla como normal. Al contrario, la parte c muestra un aplanamiento en los extremos, que es un comportamiento característico de las muestras tomadas de una distribución con colas más delgadas que la normal. Las partes d y e de la gráfica muestran patrones asociados con asimetría positiva y negativa, respectivamente.

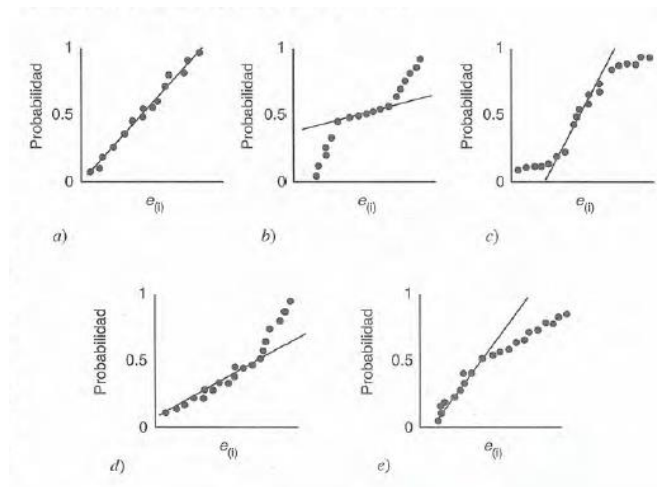


Figura 70 Gráficas de probabilidad normal: a) ideal; b) distribución con colas gruesas; c) distribución con colas delgadas; d) Asimetría positiva; e) asimetría negativa. Fuente: (Montgomery et al., 2002)

Según Daniel y Wood [1980], con frecuencia, los tamaños pequeños de muestra ($n \sim 16$) producen gráficas de probabilidad normal que se desvían bastante de la linealidad. Para muestras mayores ($n \sim 32$), las gráficas se comportan mucho mejor. Por lo general, se requieren unos 20 puntos para producir gráficas de probabilidad suficientemente estables como para poder interpretarse con facilidad. Un defecto común que aparece en la gráfica de probabilidad normal es la ocurrencia de uno o dos residuales grandes. A veces esto es indicativo de que las observaciones correspondientes son atípicas. (Montgomery et al., 2002).

El Histograma de residuos muestra la distribución de los residuos para todas las observaciones. Se utiliza el histograma de los residuos para determinar si los datos son asimétricos o incluyen valores atípicos. Los patrones en la siguiente tabla pueden indicar que el modelo no cumple con las premisas del modelo.

Tabla 16. Histograma de residuos

| Patrón | Lo que el patrón indica |
|--|-------------------------|
| Una larga cola en una dirección | Asimetría |
| Una barra se encuentra muy alejada de las otras barras | Un valor atípico |

Fuente: Paquete estadístico, Minitab

5.3.2 Residuales en función de los valores ajustados

Es útil una gráfica de los residuales ε_i , en función de los valores ajustados correspondientes \hat{Y}_i para detectar algunos tipos frecuentes de inadecuaciones del modelo i . Los modelos, según su patrón pueden indicar lo siguiente (Figura 71):

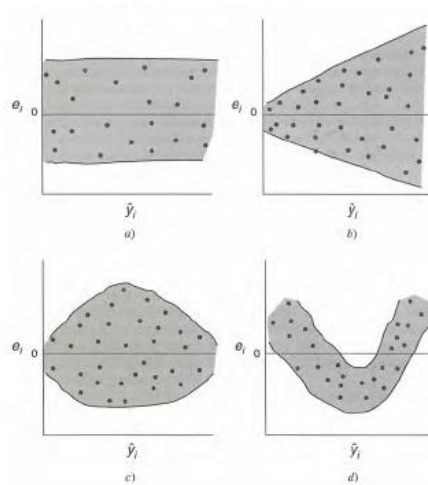


Figura 71 Patrones en las gráficas residuales: a) satisfactorio; b) en embudo; c) en doble arco; d) no lineal. Fuente: (Montgomery et al., 2002)

La parte a de la Figura 71, indica que los residuales se pueden encerrar en una banda horizontal, entonces no hay defectos obvios del modelo. Las gráficas de e_i en función de Y_i que se parezcan a cualquiera de los patrones de las partes b a d son síntomas de deficiencias del modelo.

El método común para manejar la no constancia de la varianza es aplicar una transformación adecuada ya sea a la variable regresora o a la de respuesta o usar el método de mínimos cuadrados ponderados. En la práctica, se emplean en general las transformaciones de la variable de respuesta para estabilizar la varianza. Una gráfica en curva, como la de la parte d, indica no linealidad. Esto podría indicar que se necesitan otras variables regresoras en el modelo. Por ejemplo, podría ser necesario un término al cuadrado. Las transformaciones de la variable regresora y/o la de respuesta también podrían ayudar en estos casos. Una gráfica de los residuales en función de y_i también puede revelar uno o más residuales anormalmente grandes. Esos puntos son, es natural,

valores atípicos potenciales, los residuales grandes que están en los valores extremos de y_i también podrían indicar que la varianza no es constante, o bien que la relación real entre y y x no es lineal. Se deben investigar esas posibilidades antes de considerar los puntos como atípicos

5.4 Modelo de análisis de regresión lineal generalizado

En este trabajo de investigación, buscando mejorar las correlaciones presentadas en el numeral 5.2, se intenta aplicar un modelo lineal generalizado para caracterizar el valor del CBR a partir de mediciones de deflectometría y posibles parámetros índice de suelo (según numeral 5.2.4) utilizando un enfoque estadístico. Este modelo de regresión está dado por la siguiente función:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon$$
$$\frac{1}{f(y)} = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon$$

Ecuación 37

Donde:

- β_0 : Ordenada al origen
- β_1 : Pendiente
- ε : Componente aleatorio de error
- x : Variable independiente o predictora
- y : Variable dependiente o de respuesta

Específicamente para esta investigación, se emplea el paquete estadístico R y RStudio, el cual es un software de libre uso y distribución bajo Licencia Pública General de GNU, para programar análisis estadístico y gráfico. R fue creado en 1993 por Robert Gentleman y Ross Ihaka del Departamento de Estadística de la Universidad de Auckland-Nueva Zelanda y desde 1997 se desarrolla con aportes de diversas partes del mundo, bajo la coordinación del equipo principal de desarrollo de R (R Core Team Development) (R Project).

Con el uso de esta herramienta, se desarrolla el modelo de regresión lineal generalizada, así como el análisis de la validación del modelo.

5.4.1 Empleando los parámetros obtenidos por la metodología AASHTO - 93

5.4.1.1 Modelos de regresión para suelos finos, CBR muestra inalterada humedad natural

Utilizando los parámetros dr , r , humedad natural (HN), porcentaje de finos (w) e índice de plasticidad (IP) para crear el modelo de regresión lineal generalizado, en una función de enlace Inversa y con el modelo perteneciente a una familia de distribución Gamma, se obtiene los siguientes resultados:

Empleando los Betas del modelo, se tiene la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{f(x)} = 0.0489844 + 0.0012682 * dr * r + 0.0022392 * HN$$

| Coefficients: | | | | |
|---|-----------|------------|---------|--------------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| (Intercept) | 0.0489844 | 0.0113397 | 4.320 | 2.06e-05 *** |
| `dr*r` | 0.0012682 | 0.0001241 | 10.217 | < 2e-16 *** |
| HN | 0.0022392 | 0.0004629 | 4.838 | 2.01e-06 *** |
| --- | | | | |
| Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | |

$$rsq (R^2) = 0.39$$

Ecuación 38

Como se puede apreciar, los dos parámetros son significativos dentro del modelo ya que su p-value es menor a 0.05; sin embargo, se presenta un nuevo modelo que vincula las dos variables, para reducir la ecuación:

$$\frac{1}{f(x)} = 0.1186 + 0.00004087 * dr * r * HN$$

| Coefficients: | | | | |
|---|-----------|------------|---------|------------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| (Intercept) | 1.186e-01 | 6.073e-03 | 19.53 | <2e-16 *** |
| `dr*r*HN` | 4.087e-05 | 3.442e-06 | 11.87 | <2e-16 *** |
| --- | | | | |
| Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | |

$$rsq (R^2) = 0.41$$

Ecuación 39

$$\frac{1}{f(x)} = 0.1327 + 0.0000413 * dr * r * HN - 0.000669 wPI$$

| Coefficients: | | | | |
|---|------------|------------|---------|------------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| (Intercept) | 1.327e-01 | 8.848e-03 | 15.003 | <2e-16 *** |
| `dr*r*HN` | 4.130e-05 | 3.692e-06 | 11.185 | <2e-16 *** |
| wPI | -6.690e-04 | 4.191e-04 | -1.596 | 0.111 |
| --- | | | | |
| Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | |

$$rsq (R^2) = 0.42$$

Ecuación 40

La diferencia entre los R^2 entre los dos últimos modelos es casi que despreciable; por tanto, su definición será determinada a partir del siguiente análisis de verificación de los modelos planteados con las variables $dr*r*HN$ y $dr*r*HN+wPI$.

De acuerdo con el análisis de la hipótesis planteada, se comprueba que x sí tiene valor para explicar la variabilidad de y, por tanto, se rechaza la hipótesis $H_0:\beta_1=0$.

La prueba de Shapiro-Wilk, publicada en 1965 por Samuel Shapiro y Martin Wilk, se emplea para contrastar la normalidad de un conjunto de datos.

La prueba de Kolmogorov-Smirnov (con la corrección Lilliefors) se utiliza para contrastar si un conjunto de datos se ajusta o no a una distribución normal. Es similar en este caso al test de Shapiro Wilk, pero la principal diferencia con éste radica en el número de muestras. Mientras que la prueba de Shapiro Wilk se puede utilizar con hasta 50 datos, la prueba de Kolmogorov Smirnov es recomendada con más de 50 observaciones. Para conocer los resultados de esta prueba, se hace uso del software estadístico RStudio.

La prueba utiliza el contraste de hipótesis para rechazar la normalidad de la muestra. La hipótesis nula asume que la muestra proviene de una población distribuida normalmente. Si el valor p (valor de probabilidad) es menor al nivel de significación establecido (0.05) se rechaza la hipótesis nula y se considera que hay evidencia para concluir que la muestra no proviene de una distribución normal. Por el contrario, si el valor de probabilidad es mayor a 0.05, la muestra de datos en estudio sigue una distribución normal. En la Figura 72 se puede ver la dispersión respecto de la recta para cada valor predicho (cuánto se alejan de nuestro ajuste).

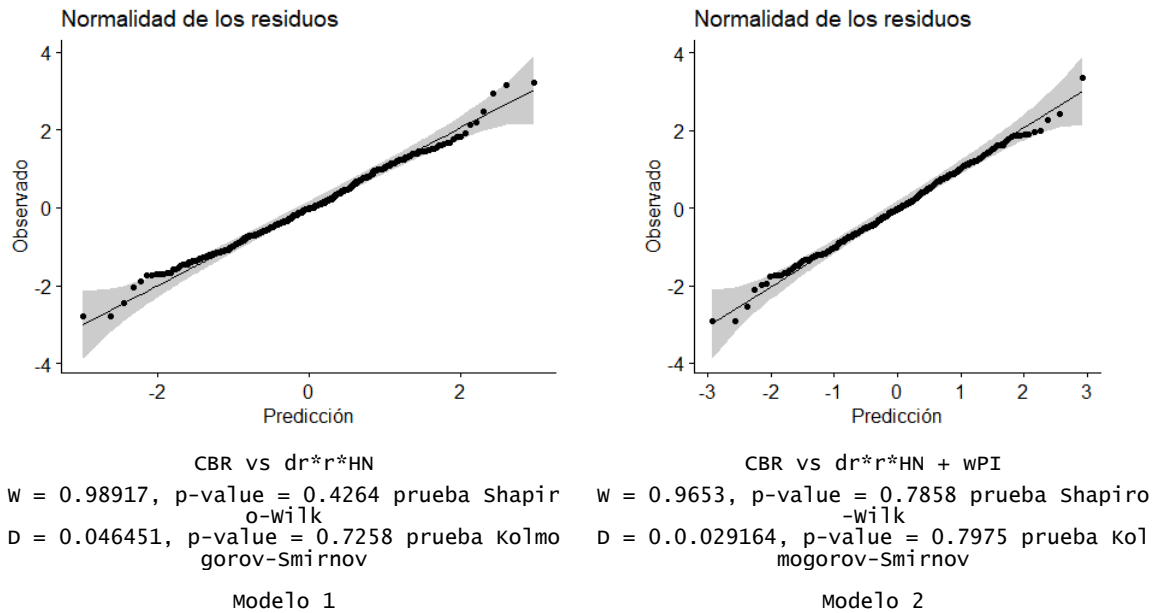
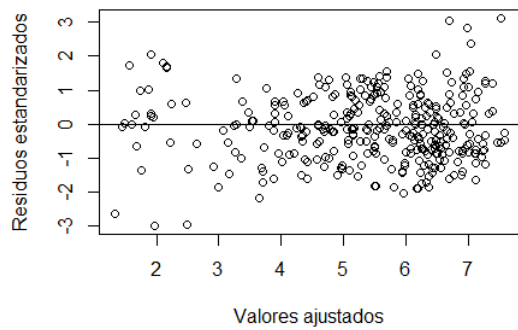


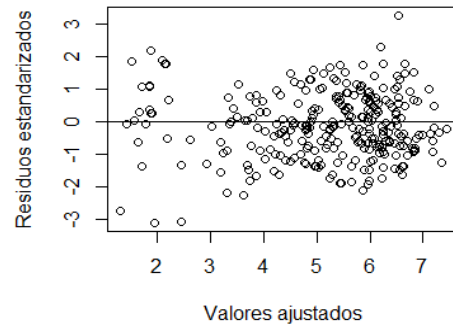
Figura 72 Gráfica de normalidad de residuos, suelos finos, CBR W_n

En los dos modelos, el valor de probabilidad $p\text{-value}$ es mayor a 0.05, por tanto, los datos siguen una distribución normal.

Por otro lado, la Figura 73 presenta las gráficas de residuos estandarizados vs los valores ajustados, de los modelos CBR W_n vs $dr \cdot r + HN$ y CBR W_n vs $dr \cdot r \cdot HN + wPI$ para suelos finos; lo importante de estas graficas es observar la dispersión de los residuos y que la variabilidad se mantenga constante a lo largo de todo el dominio y esta se puede encerrar en una banda horizontal; por consiguiente, no se ven síntomas de deficiencia en el modelo y esto descarta el incumplimiento del modelo por heterocedasticidad, con mejor variabilidad en el modelo 1.



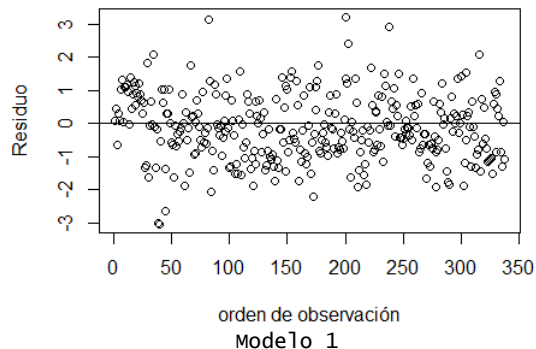
Modelo 1



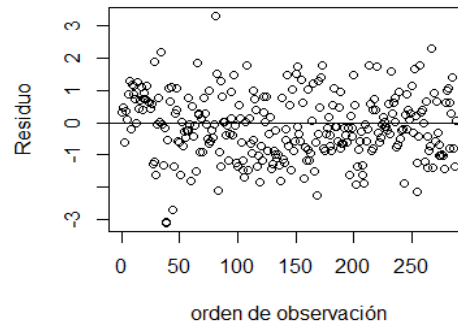
Modelo 2

Figura 73 Graficas análisis de residuos estandarizados vs valores ajustados, suelos finos CBR Wn

También se presenta las gráficas de residuos vs orden de observaciones. Se aprecia que los errores no presentan un patrón; están distribuidos de manera aleatoria, lo que implica que son independiente.



Modelo 1



Modelo 2

Figura 74 Graficas análisis de residuos vs orden de observación, suelos finos CBR Wn

El Test de Durbin-Watson permite evaluar si existe autocorrelación en una Regresión lineal, sea simple o múltiple. Con ello se pretende ver si los valores presentan algún tipo de dependencia en cuanto al orden de obtención. Si fuera así, se estaría incumpliendo una de las condiciones del modelo y cuando se incumplen las condiciones de un modelo de Regresión lineal (normalidad, homogeneidad de varianzas, independencia de los datos) las estimaciones de los parámetros del modelo (los coeficientes del modelo) no tienen los criterios de calidad establecidos, en menor incidencia la homogeneidad de varianza para el caso de los modelos MLG.

El contraste de hipótesis tiene como Hipótesis nula que la autocorrelación es cero versus la alternativa que afirma que es distinta de cero:

En una regresión la noción de residuo es la diferencia entre el valor de la variable dependiente de un valor muestral y el valor estimado, mediante el modelo construido mediante esa regresión.

Mediante la prueba de Durbin-Watson, se puede detectar si los residuos de la regresión estimada están auto correlacionados o no. Mediante el uso de RStudio, obtenemos los siguientes resultados:

Tabla 17. Test Durbin – Watson, suelos finos CBR Wn

| | |
|--|--|
| <pre>lag Autocorrelation D-w Statistic p-value 1 0.2443187 1.507774 0.666 Alternative hypothesis: rho != 0 Modelo 1</pre> | <pre>lag Autocorrelation D-w Statistic p-value 1 0.1770726 1.645518 0.9 Alternative hypothesis: rho != 0 Modelo 2</pre> |
|--|--|

Puesto que el valor p-value es mayor que el nivel de significación (5%), la hipótesis nula no puede ser rechazada; por tanto, se considera que los datos de la muestra son independientes.

Para medir la autocorrelación, también se puede emplear otra función del programa RStudio denominada ACF; los gráficos generados a partir de esta función se denominan correlogramas, los cuales contienen bandas con un intervalo de confianza del 95%, que son representación gráfica de las auto correlaciones de una muestra consigo misma. Sirve en una regresión lineal para ver como los residuales; se van comparando ε_t y $\varepsilon_{(t-1)}$ para su autocorrelación y rechazar o no el supuesto de correlación cero entre los errores.

La autocorrelación toma medidas en el intervalo cerrado [-1,1]:

- Los valores de -1 o 1 indican autocorrelación fuerte
- Los valores cercanos a 0, indican autocorrelación débil o correlación 0.
- Los valores negativos indican inversa y los valores positivos, una relación directa

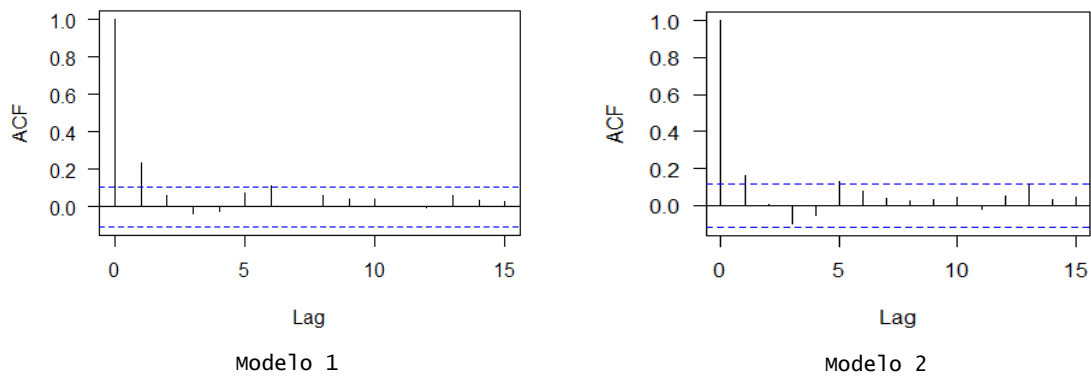


Figura 75 Graficas de autocorrelación, suelos finos CBR Wn

Para ambos modelos se omite la primera barra, ya que corresponde a la autocorrelación con la misma observación, retraso/lag =0. La mayoría de las líneas, a excepción de la segunda, se encuentra entre el intervalo de confianza (95%, líneas azules), indicando una autocorrelación cero; sin embargo, como se presenta una línea fuera del intervalo se indicaría que los residuos no presentan una independencia, que por el análisis de la prueba de Durbin-Watson, analizada anteriormente, sí se cumple el supuesto de que los residuos son independientes (no se rechaza la hipótesis nula).

Esta dependencia de la segunda línea podría estar asociada a valores atípicos dentro de la muestra de datos empleada para los suelos finos y por ende en la determinación de la regresión. Con la ayuda del programa RStudio, se mide aquellas observaciones que suelen tener un peso específico mayor en la estimación de los coeficientes de regresión (sobrestimados), por lo que se trata de valores atípicos, con la gráfica de distancia de Cook, la cual nos proporciona un medio adicional para detectar observaciones que pesan excesivamente en las ecuaciones de regresión.

Se calcula una distancia de Cook para cada observación. Estas distancias se hacen máximas cuando se dan dos circunstancias: la observación es un valor atípico (outlier) en una o más de las variables predictoras y, además, cuando se aleja de la nube de puntos de la regresión; para ello es recomendable detectar aquellos valores que tengan una distancia de Cook superior a 1.

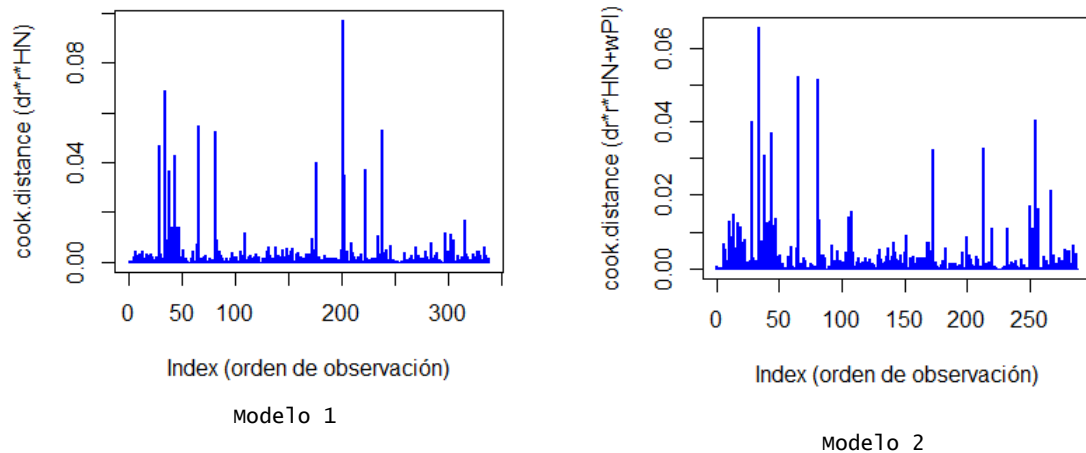


Figura 76 Gráficas distancia de Cook, suelos finos CBR W_n

Como se puede observar en la Figura 76, ninguna de las líneas de distancia Cook supera el umbral de 1.0, llegando a un rango máximo de 0.10, lo que indica que no se cuenta con muchos valores atípicos que afectan el modelo de regresión con respecto a las observaciones, por tanto, el modelo predice de forma adecuada la variable CBR con respecto al CBR observado para las dos ecuaciones planteadas.

La Tabla 18, muestra resultados del análisis de regresión para los suelos finos, correlacionando el CBR en condiciones de humedad natural:

Tabla 18. Resultados del análisis del modelo, Suelos finos CBR humedad natural (CBR Wn)

| Modelo | Variable | Coeficientes | Error estándar | t value | Pr (> t) | rsq (R ²) | Normalidad de residuos | | | Autocorrelación de los residuos | |
|---|---|--------------|----------------|---------|---|-----------------------|------------------------|--------------------|--|---------------------------------|---|
| | | | | | | | Shapiro-Wilk | Kolmogorov-Smirnov | Observación | Durbin-Watson | Observación |
| | | | | | | | P-value | | | P-value | |
| 1 | Intercepto | 0.1186 | 0.006073 | 19.53 | < 2e-16 | 0.41 | 0.4264 | 0.7258 | Los datos siguen una distribución normal | 0.666 | Los datos de la muestra son independientes. |
| | dr*r*HN | 0.00004087 | 0.000003442 | 11.87 | < 2e-16 | | | | | | |
| | $\frac{1}{f(x)} = 0.1186 + 0.00004087 dr * r * HN$ $CBR_{Wn} = \frac{1}{0.1186 + 0.00004087 * dr * r * HN}$ | | | | | | | | | | |
| <p>Dónde: CBR Wn: capacidad de soporte de la subrasante (%), muestra inalterada en condiciones de humedad natural dr: deflexión medida a la distancia r (mm) r: distancia del sensor r (mm) HN: humedad natural (%)</p> | | | | | | | | | | | |
| 2 | Intercepto | 0.1327 | 0.008848 | 16.003 | < 2e-16 | 0.47 | 0.1034 | 0.2937 | Los datos siguen una distribución normal | 0.542 | Los datos de la muestra son independientes. |
| | dr*r*HN | 0.0000413 | 0.000003692 | 11.185 | < 2e-16 | | | | | | |
| | wPI | -0.000669 | 0.0004194 | -1.596 | 0.111 | | | | | | |
| $\frac{1}{f(x)} = 0.1327 + 0.0000413 * dr * r * HN - 0.00043194 wPI$ $CBR_{Wn} = \frac{1}{0.1327 + 0.0000413 * dr * r * HN - 0.0004194 wPI}$ | | | | | <p>Dónde: CBR Wn: capacidad de soporte de la subrasante (%), muestra inalterada en condiciones de humedad natural dr: deflexión medida a la distancia r (mm) r: distancia del sensor r (mm) HN: humedad natural (%) w: % que pasa el tamiz 0.075 mm PI: índice de plasticidad (%)</p> | | | | | | |

5.4.1.2 Modelos de regresión para suelos arenosos

5.4.1.2.1 Correlación CBR muestra inalterada, humedad natural

Para el caso de los suelos arenosos, se tiene el análisis para el CBR de muestra inalterada en condición de humedad natural y CBR compactado en laboratorio, en inmersión. Utilizando los parámetros deflexión (dr), localización del sensor (r) y humedad natural (HN) para crear el modelo de regresión lineal generalizado, al igual que para los suelos finos, se empleó una función de enlace Inversa y con el modelo perteneciente a una familia de distribución Gamma, se obtiene los siguientes resultados:

Empleando los Betas del modelo, se tiene las siguientes ecuaciones:

$$\frac{1}{f(x)} = 0.095929 + 0.019219 * dr * HN$$

| Coefficients: | | | | |
|---|----------|------------|---------|--------------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| (Intercept) | 0.095929 | 0.013820 | 6.941 | 4.55e-08 *** |
| `dr*HN` | 0.019219 | 0.008085 | 2.377 | 0.023 * |
| --- | | | | |
| Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | |

$$rsq (R^2) = 0.20$$

Ecuación 41

$$\frac{1}{f(x)} = 0.009045 + 0.00002654 * dr * r * HN$$

| Coefficients: | | | | |
|---|-----------|------------|---------|--------------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| (Intercept) | 9.045e-02 | 1.373e-02 | 6.589 | 1.31e-07 *** |
| `dr*r*HN` | 2.654e-05 | 9.809e-06 | 2.705 | 0.0105 * |
| --- | | | | |
| Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | |

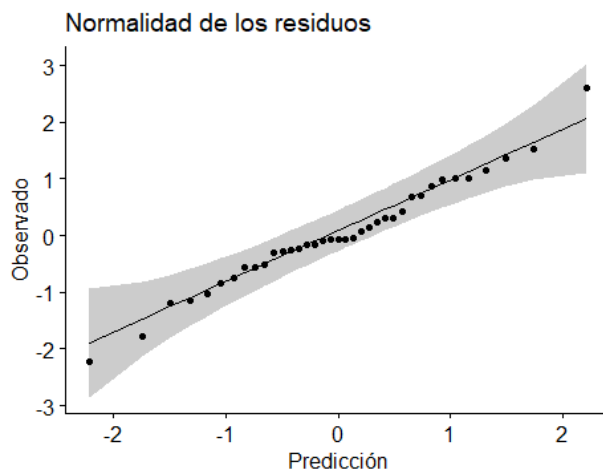
$$rsq (R^2) = 0.25$$

Ecuación 42

Como se puede apreciar, los dos modelos planteados, su p-value es menor a 0.05, por lo que las variables empleadas son significativa dentro del modelo. Por otro lado, su coeficiente de determinación, R², es pobre, 0.20 y 0.25 respectivamente.

La diferencia entre los R^2 entre los dos modelos es de 0.05, por tanto, su definición será determinada a partir del siguiente análisis de verificación del modelo planteado, que vincula la variable dr^*r^*HN .

A continuación, se ilustra la gráfica de normalidad de los residuos y los resultados del test de Shapiro Wilk y Kolmogorov-Smirnov. En el modelo, el valor de probabilidad p-value es mayor a 0.05, por lo que se puede indicar que los datos siguen una distribución normal.



CBR W_n vs dr^*r^*HN

$w = 0.97719$, p-value = 0.6338 prueba Shapiro-wilk
 $D = 0.087013$, p-value = 0.682 prueba Kolmogorov-Smirnov

Figura 77 Gráfica de normalidad de residuos, suelos arenosos, CBR W_n

Por otro lado, la Figura 78 presenta la gráfica de residuos estandarizados vs los valores ajustados, del modelo CBR W_n vs dr^*r^*HN para suelos arenosos, y esta se puede encerrar en una banda horizontal, por tanto, no se ve síntomas de deficiencia en el modelo, esto descarta el incumplimiento del modelo por heterocedasticidad, sin embargo, los datos se concentran más hacia el lado derecho.

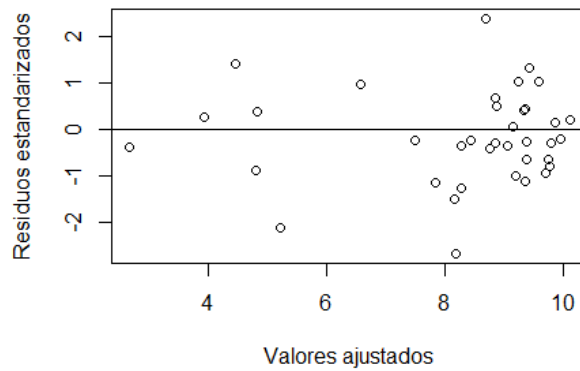


Figura 78 Graficas análisis de residuos estandarizados vs valores ajustados, suelos arenosos CBR Wn

Basados en la gráfica de residuos o errores vs orden de observación, se observa que los errores presentan cierto patrón, sin tener un componente aleatorio, lo que implica que pueden ser dependientes (correlacionados).

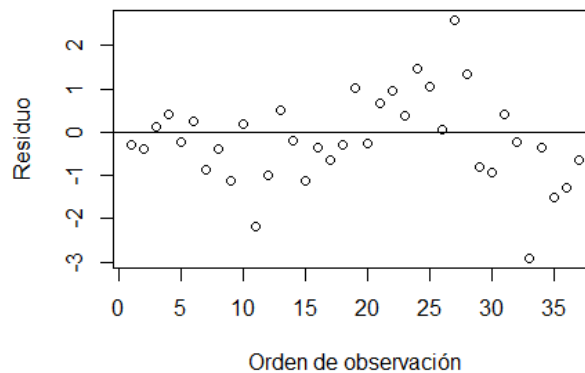


Figura 79 Graficas análisis de residuos vs orden de observación, suelos arenosos CBR Wn

Mediante la prueba de Durbin-Watson, el valor p-value es menor que el nivel de significación (5%), la hipótesis nula es rechazada, se considera que los datos de la muestra están correlacionados o presentan una dependencia.

Tabla 19. Test Durbin – Watson, suelos arenosos CBR Wn

| lag | Autocorrelation | D-w | Statistic | p-value |
|----------------------------------|-----------------|----------|-----------|---------|
| 1 | 0.2811115 | 1.422881 | 0.006 | |
| Alternative hypothesis: rho != 0 | | | | |

Basados en el análisis de autocorrelación, la mayoría de las líneas, a excepción de la tercera, se encuentran entre el intervalo de confianza (95%, líneas azules), indicando una autocorrelación cero, sin embargo, como se presenta una línea fuera del intervalo se

indicaría que los residuos no presentan una independencia, al igual que la prueba de Durbin-Watson, analizada anteriormente.

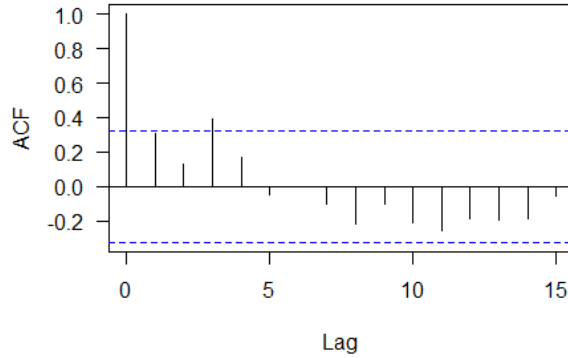


Figura 80 Graficas de autocorrelación, suelos arenosos CBR Wn

Como se puede observar en la Figura 81 ninguna de las líneas de distancia Cook superar el umbral de 1.0, llegando a una rango máximo de 0.25 aproximadamente, lo que nos indica que no se cuenta con muchos valores atípicos que afectan el modelo de regresión con respecto a las observaciones. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, los residuos no presentan una independencia, lo que indicaría que la aproximación de los valores predichos no es válida, ya que se incumple la condición de independencia

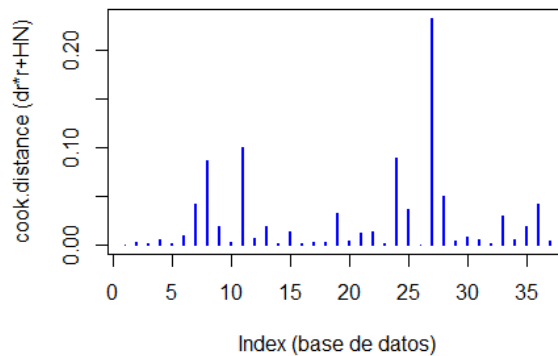


Figura 81 Graficas distancia de Cook, suelos arenosos CBR Wn

La Tabla 20 muestra resultados del análisis de regresión para los suelos arenosos correlacionando el CBR en condiciones de humedad natural:

Tabla 20. Resultados del análisis del modelo, Suelos arenosos CBR humedad natural (CBR Wn)

| Modelo | Variable | Coeficientes | Error estándar | t value | Pr (> t) | rsq (R2) | Normalidad de residuos | | | Autocorrelación de los residuos | |
|--|------------|--------------|----------------|---------|-------------|----------|------------------------|-------------------|--|---------------------------------|--|
| | | | | | | | Shapiro-Wilk | Kolmogorov-Smirno | Observación | Durbin-Watson | Observación |
| | | | | | | | P-value | | | P-value | |
| 1 | Intercepto | 0.095929 | 0.01382 | 6.941 | 4.55E-08 | 0.20 | | | | | |
| | dr*HN | 0.019219 | 0.008085 | 2.377 | 0.023 | | | | | | |
| 2 | Intercepto | 0.009045 | 0.01373 | 6.59 | 0.000000131 | 0.25 | 0.6338 | 0.682 | Los datos siguen una distribución normal | 0.006 | Los datos de la muestra no son independientes. |
| | dr*r*HN | 0.00002654 | 0.000009809 | 2.705 | 0.0105 | | | | | | |
| <p>Basados en la prueba de Durbin, se considera que los datos están correlacionados o presentan cierta dependencia, lo que indicaría que la aproximación de los valores predichos no es válida, ya que se incumple la condición de independencia.</p> | | | | | | | | | | | |

5.4.1.2.2 Correlación CBR muestra compactada en laboratorio, en inmersión

Por otro lado, para el caso de los suelos arenosos en cuanto al análisis para el CBR compactado en laboratorio, este se relacionara con los parámetros de porcentaje de finos, deflexión (dr), localización del sensor (r) y humedad natural (HN) para crear el modelo de regresión lineal generalizado, al igual que para los demás análisis, se emplea una función de enlace Inversa y con el modelo perteneciente a una familia de distribución Gamma, se obtiene los siguientes resultados:

Empleando los Betas del modelo, se tiene las siguientes ecuaciones:

$$\frac{1}{f(x)} = 0.0210714 + 0.0011776 * dr * r * \% finos$$

| Coefficients: | | | | | |
|---|-----------|------------|---------|----------|-----|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) | |
| (Intercept) | 0.0210714 | 0.0035869 | 5.874 | 6.53e-07 | *** |
| `dr*r*%finos` | 0.0011776 | 0.0002886 | 4.080 | 0.000202 | *** |
| --- | | | | | |
| Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | | |

rsq (R²) = 0.35
Ecuación 43

$$\frac{1}{f(x)} = 0.0125363 + 0.0005092 * dr * r$$

| Coefficients: | | | | | |
|---|-----------|------------|---------|----------|-----|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) | |
| (Intercept) | 0.0125363 | 0.0048433 | 2.588 | 0.0133 | * |
| `dr*r` | 0.0005092 | 0.0001145 | 4.446 | 6.53e-05 | *** |
| --- | | | | | |
| Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | | |

rsq (R²) = 0.45
Ecuación 44

$$\frac{1}{f(x)} = 0.02064 + 0.00003704 * dr * r * HN$$

| Coefficients: | | | | | |
|---|-----------|------------|---------|----------|-----|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) | |
| (Intercept) | 2.064e-02 | 3.079e-03 | 6.703 | 4.33e-08 | *** |
| `dr*r*HN` | 3.704e-05 | 7.543e-06 | 4.911 | 1.49e-05 | *** |
| --- | | | | | |
| Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | | |

rsq (R²) = 0.47
Ecuación 45

$$\frac{1}{f(x)} = 0.05661 - 0.0000677 * MR$$

| Coefficients: | | | | |
|--|------------|------------|---------|--------------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| (Intercept) | 5.661e-02 | 6.311e-03 | 8.971 | 3.21e-11 *** |
| MR | -6.771e-05 | 1.477e-05 | -4.585 | 4.22e-05 *** |
| --- Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | |

$$rsq (R^2) = 0.3027$$

Ecuación 46

Como se puede apreciar, para los cuatro modelos planteados el parámetro p-value es menor a 0.05, por lo que las variables empleadas son significativas dentro del modelo. Por otro lado, su coeficiente de determinación, R^2 , son de 0.35, 0.45, 0.47 y 0.30 respectivamente, siendo para los modelos 2 y 3 una correlación aceptable.

La diferencia entre los R^2 entre los modelos 2 y 3, es despreciable, por lo que su definición será determinada a partir del siguiente análisis de verificación del modelo que vincula las variables $dr*r$ y $dr*r*HN$.

A continuación, se ilustra la gráfica de normalidad de los residuos y los resultados del test de Shapiro Wilk y Kolmogorov-Smirnov. En el modelo, el valor de probabilidad p-value es mayor a 0.05, por tanto, los datos siguen una distribución normal.

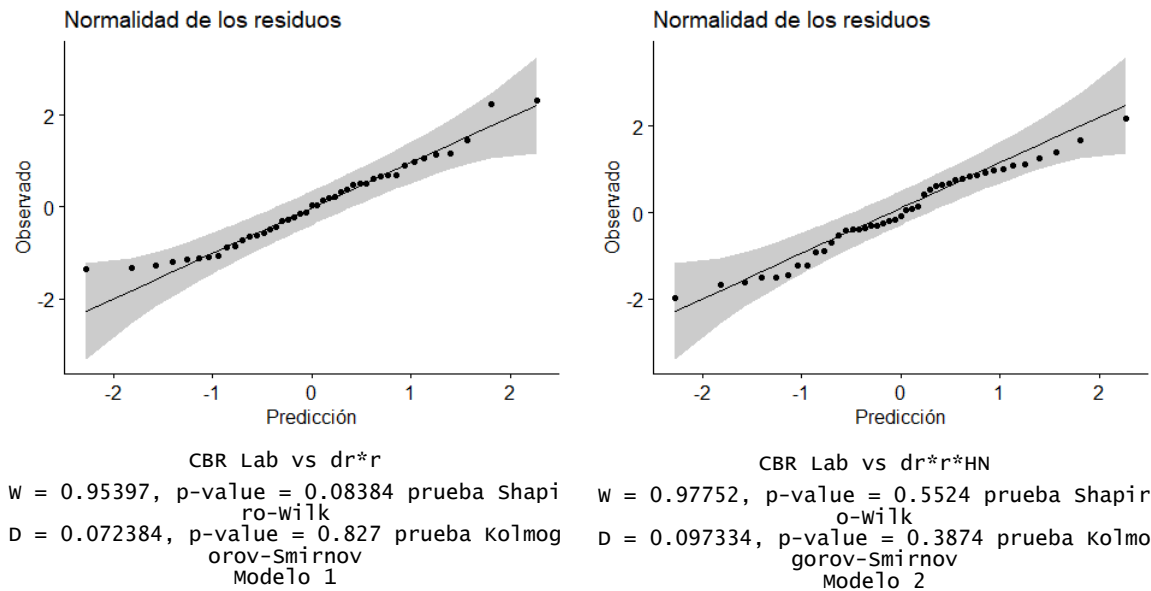


Figura 82 Gráfica de normalidad de residuos, suelos arenosos, CBR Lab.

La Figura 83 presenta las gráficas de residuos estandarizados vs los valores ajustados, del modelo CBR Lab vs dr^*r^*HN para suelos arenosos, y esta se puede encerrar en una banda horizontal, lo que nos indica que no se ve síntomas de deficiencia en el modelo, por el incumplimiento del modelo por heterocedasticidad.

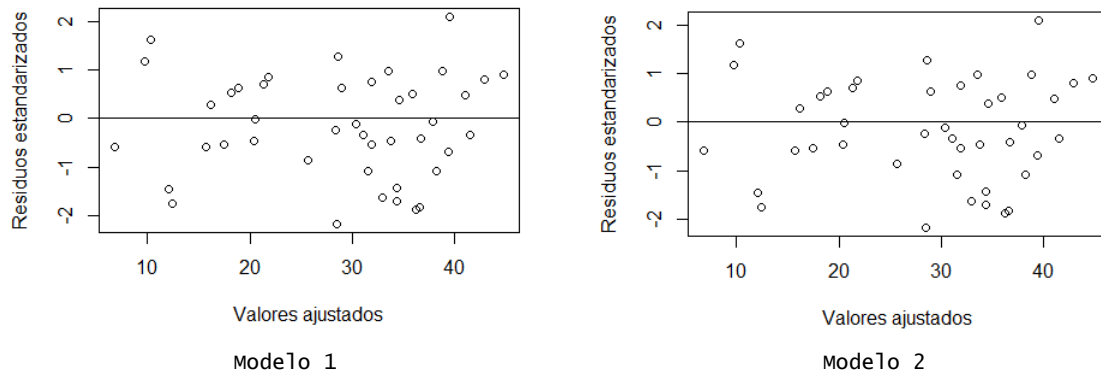


Figura 83 Gráficas análisis de residuos estandarizados vs valores ajustados, suelos arenosos CBR Lab

Basados en la gráfica de residuos o errores vs orden de observación, se observa que los errores no presentan un patrón, están distribuidos de manera aleatoria lo que implica que son independientes (no correlacionados).

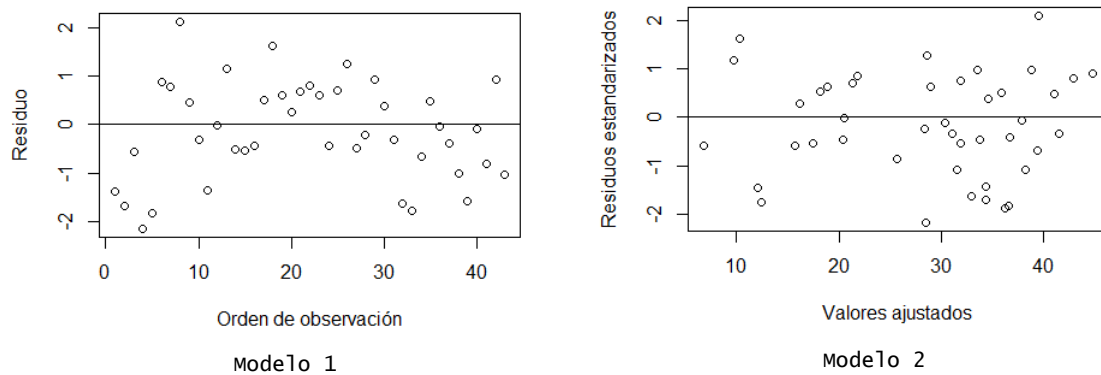


Figura 84 Gráficas análisis de residuos vs orden de observación, suelos arenosos CBR Lab

Basados en la prueba de Durbin-Watson, se detecta si los residuos de la regresión estimada están auto correlacionados o no. Mediante el uso de RStudio, obtenemos los siguientes resultados:

Tabla 21. Test Durbin – Watson, suelos arenosos CBR Lab

| lag | Autocorrelation | D-w | Statistic | p-value |
|----------------------------------|-----------------|----------|-----------|---------|
| 1 | 0.3108181 | 1.307912 | 0.168 | |
| Alternative hypothesis: rho != 0 | | | | |

Modelo 1

| lag | Autocorrelation | D-w | Statistic | p-value |
|----------------------------------|-----------------|----------|-----------|---------|
| 1 | 0.4012401 | 1.128277 | 0 | |
| Alternative hypothesis: rho != 0 | | | | |

Modelo 2

Para el caso del modelo que vincula la variable dr^*r , el valor de p-value es mayor que el nivel de significancia (5%), por tanto, se considera que los datos de la muestra no están correlacionados o presentan una independencia, caso contrario ocurre con el modelo con las variables dr^*r^*HN , el valor p-value es menor que el nivel de significación (5%), la hipótesis nula es rechazada, se considera que los datos de la muestra están correlacionados o presentan una dependencia.

Del análisis de autocorrelación, para el primero modelo, las líneas se encuentran entre el intervalo de confianza (95%, líneas azules), indicando una autocorrelación cero, para el modelo 2, sin embargo, como se presenta una línea fuera del intervalo se indicaría que los residuos no presentan una independencia, al igual que la prueba de Durbin-Watson, analizada anteriormente.

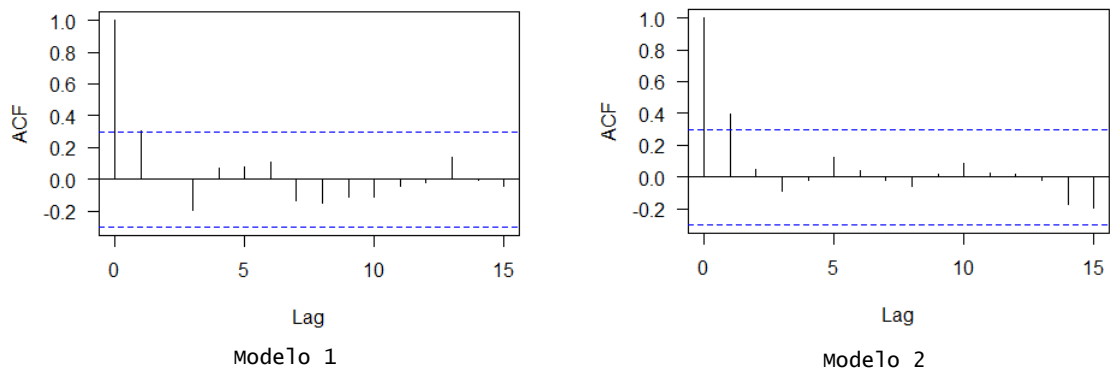


Figura 85 Graficas de autocorrelación, suelos arenosos CBR Lab

Con la gráfica de distancia de Cook, como se puede observar en la Figura 86, ninguna de las líneas de distancia Cook superar el umbral de 1.0, llegando a una rango máximo de 0.60 aproximadamente, lo que nos indica que no se cuenta con muchos valores atípicos que afectan el modelo de regresión con respecto a las observaciones, especialmente en el modelo con la variable dr^*r . Sin embargo, como se mencionó anteriormente, para el caso

del modelo 2 (dr^*r^*HN) los residuos no presentan una independencia, lo que indicaría que la aproximación de los valores predichos no es válida, ya que se incumple la condición de independencia.

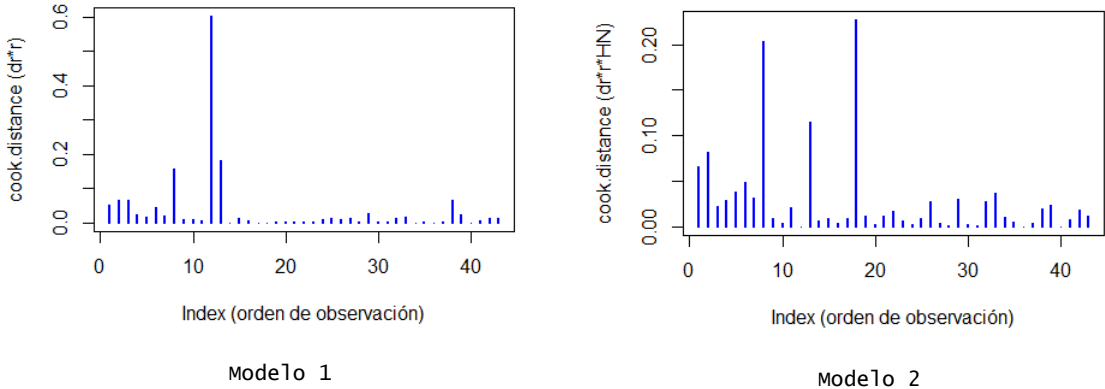


Figura 86 Graficas distancia de Cook, suelos arenosos CBR Lab

La Tabla 22 muestra resultados del análisis de regresión para los suelos arenosos correlacionando el CBR compactado en laboratorio.

Tabla 22. Resultados del análisis del modelo, Suelos arenosos CBR muestra compactada en laboratorio (CBR Lab)

| Modelo | Variable | Coeficientes | Error estándar | t value | Pr (> t) | rsq (R2) | Normalidad de residuos | | | Autocorrelación de los residuos | |
|--------|--|--------------|----------------|---------|-----------|----------|------------------------|--------------------|--|---------------------------------|--|
| | | | | | | | Shapiro-Wilk | Kolmogorov-Smirnov | Observación | Durbin-Watson | Observación |
| | | | | | | | P-value | | | P-value | |
| 1 | Intercepto | 0.0125363 | 0.0048433 | 2.588 | 1.33E-02 | 0.45 | 0.08384 | 0.827 | Los datos siguen una distribución normal | 0.168 | Los datos de la muestra son independientes. |
| | dr*r | 0.0005092 | 0.0001145 | 4.446 | 6.53E-05 | | | | | | |
| | $\frac{1}{f(x)} = 0.0125363 + 0.0005092 * dr * r \quad CBR_{LAB} = \frac{1}{0.0125363 + 0.0005092 * dr * r}$ <p>Dónde: CBR Lab: capacidad de soporte de la subrasante (%), Compactado en laboratorio, inmersión dr: deflexión medida a la distancia r (mm) r: distancia del sensor r (mm)</p> | | | | | | | | | | |
| 2 | Intercepto | 0.02064 | 3.08E-03 | 6.70 | 4.33E-08 | 0.47- | 0.5524 | 0.3874 | Los datos siguen una distribución normal | 0 | Los datos de la muestra no son independientes. |
| | dr*r*HN | 0.00003704 | 7.54E-06 | 4.911 | 1.49E-05 | | | | | | |

5.4.1.3 Modelos de regresión para suelos tipo grava, CBR muestra compactada en laboratorio, en inmersión

Por último, para los suelos tipo grava, se quiere correlacionar el CBR compactado en laboratorio con las variables dr , r y % de finos, basados en el comportamiento de correlación presentada en la Figura 65.

Empleando los Betas del modelo, se tiene la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{f(x)} = 0.0167611 + 0.0009627 * dr * r * \% finos$$

| Coefficients: | | | | |
|---|-----------|------------|---------|--------------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| (Intercept) | 0.0167611 | 0.0014827 | 11.305 | < 2e-16 *** |
| `dr*r*%finos` | 0.0009627 | 0.0002179 | 4.418 | 3.06e-05 *** |
| --- | | | | |
| Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | |

$$rsq (R^2) = 0.23$$

Ecuación 47

Como se puede apreciar, los dos parámetros son significativos dentro del modelo ya que su p-value es menor a 0.05; sin embargo, se crea un nuevo modelo con las variables independientes, con el fin de evaluar su R^2 .

$$\frac{1}{f(x)} = 0.0094791 + 0.0001647 * dr * r + 0.0456150 \% finos$$

| Coefficients: | | | | |
|---|-----------|------------|---------|--------------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| (Intercept) | 0.0094791 | 0.0026011 | 3.644 | 0.000475 *** |
| `dr*r` | 0.0001647 | 0.0000517 | 3.186 | 0.002059 ** |
| finos | 0.0456150 | 0.0144726 | 3.152 | 0.002284 ** |
| --- | | | | |
| Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | |

$$rsq (R^2) = 0.27$$

Ecuación 48

Como se puede apreciar, para los dos modelos planteados el parámetro p-value es menor a 0.05, por lo que las variables empleadas son significativas dentro del modelo. Por otro lado, su coeficiente de determinación, R^2 son de 0.23 y 0.27 respectivamente.

La definición del modelo será definida a partir del siguiente análisis de verificación estadístico.

A continuación, se ilustra la gráfica de normalidad de los residuos y los resultados del test de Shapiro Wilk y Kolmogorov-Smirnov. En el modelo, el valor de probabilidad p-value es mayor a 0.05, siguiendo una distribución normal los datos.

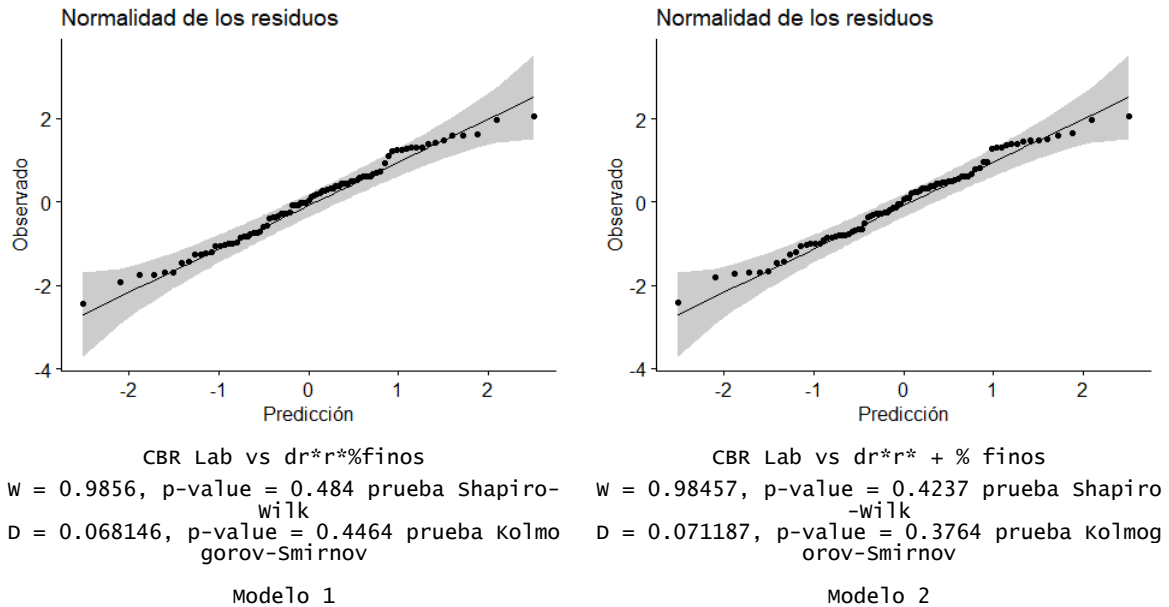


Figura 87 Gráfica de normalidad de residuos, suelos tipo grava, CBR Lab.

La Figura 88 presenta las gráfica de residuos estandarizados vs los valores ajustados, de los modelos analizados para suelos tipo grava, y estos se pueden encerrar en una banda horizontal, lo que nos indica que no se ve síntomas de deficiencia en el modelo, por el incumplimiento del modelo por heterocedasticidad, como mejor distribución en el modelo 2.

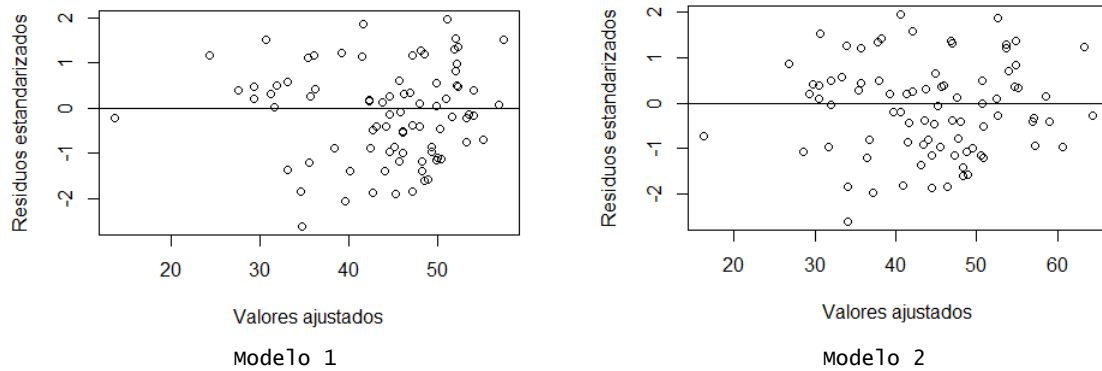


Figura 88 Graficas análisis de residuos estandarizados vs valores ajustados, suelos tipo grava CBR Lab

Basados en la gráfica de residuos o errores vs orden de observación, se observa que los errores no presentan un patrón, están distribuidos de manera aleatoria lo que implica que son independientes (no correlacionados).

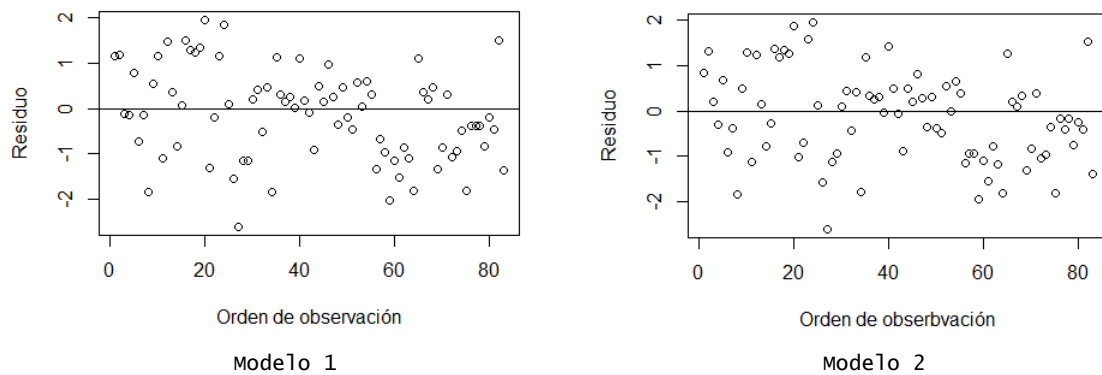


Figura 89 Graficas análisis de residuos vs orden de observación, suelos tipo grava CBR Lab

Para los dos modelos planteados los valores de p-value son menores que el nivel de significancia (5%), por tanto, se considera que los datos de la muestra están correlacionados o presentan una dependencia, evaluado por el test de Durbin-Watson.

Tabla 23. Test Durbin – Watson, suelos tipo grava CBR Lab

| | |
|--|--|
| <pre>lag Autocorrelation D-w Statistic p-value 1 0.259591 1.44408 0 Alternative hypothesis: rho != 0</pre> | <pre>lag Autocorrelation D-w Statistic p-value 1 0.2651609 1.438018 0 Alternative hypothesis: rho != 0</pre> |
|--|--|

Según el análisis de auto correlación, para los dos modelos, las líneas se encuentran entre el intervalo de confianza (95%, líneas azules), indicando una autocorrelación cero, a pesar de que el test de Durbin, indican una dependencia.

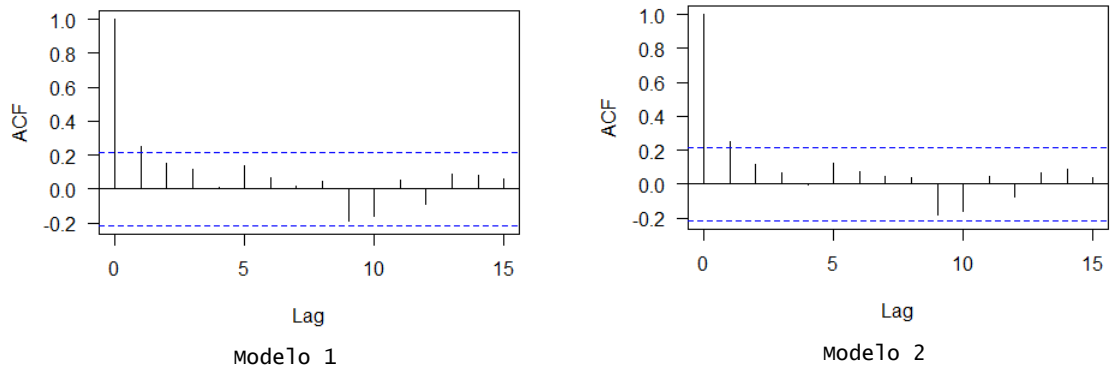


Figura 90 Graficas de autocorrelación, suelos tipo grava CBR Lab

Como se puede observar en la Figura 91 ninguna de las líneas de distancia Cook superar el umbral de 1.0, llegando a un rango máximo de 0.08 aproximadamente, lo que nos indica que no se cuenta con muchos valores atípicos que afectan el modelo de regresión con respecto a las observaciones.

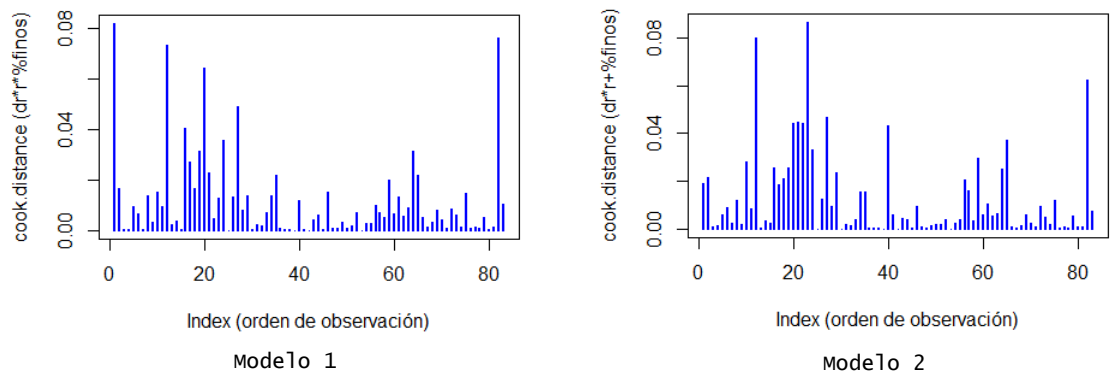


Figura 91 Graficas distancia de Cook, suelos tipo grava CBR Lab

La Tabla 24 muestra resultados del análisis de regresión para los suelos tipo grava correlacionando el CBR compactados en laboratorio:

Tabla 24. Resultados del análisis del modelo, Suelos tipo grava CBR muestra compactada en laboratorio (CBR Lab)

| Modelo | Variable | Coeficientes | Error estándar | t value | Pr (> t) | rsq (R2) | Normalidad de residuos | | | Autocorrelación de los residuos | |
|---|--------------|--------------|----------------|---------|-----------|----------|------------------------|--------------------|--|---------------------------------|--|
| | | | | | | | Shapiro-Wilk | Kolmogorov-Smirnov | Observación | Durbin-Watson | Observación |
| | | | | | | | P-value | | | P-value | |
| 1 | Intercepto | 0.0167611 | 0.0014827 | 11.305 | 2.00E-16 | 0.23 | 0.484 | 0.4464 | Los datos siguen una distribución normal | 0 | Los datos de la muestra son dependientes |
| | dr*r *%Finos | 0.0009627 | 0.0002179 | 4.418 | 3.06E-05 | | | | | | |
| $\frac{1}{f(x)} = 0.0167611 + 0.0009627 * dr * r * \% finos \quad CBR_{LAB} = \frac{1}{0.0167611 + 0.0009627 * dr * r * \% finos}$ <p>Dónde: CBR Lab: capacidad de soporte de la subrasante (%), compactado en laboratorio, en inmersión dr: deflexión medida a la distancia r (mm) r: distancia del sensor r (mm) %Finos: porcentaje de finos</p> | | | | | | | | | | | |
| 2 | Intercepto | 0.0094791 | 0.0026011 | 3.644 | 4.75E-04 | 0.27 | 0.4237 | 0.3764 | Los datos siguen una distribución normal | 0 | Los datos de la muestra son dependientes |
| | dr*r | 0.0001647 | 0.0000517 | 3.186 | 2.06E-03 | | | | | | |
| | % Finos | 0.045615 | 0.0144726 | 3.152 | 2.28E-03 | | | | | | |
| $\frac{1}{f(x)} = 0.0094791 + 0.0001647 * dr * r + 0.0456152 \% finos \quad CBR_{LAB} = \frac{1}{0.0094791 + 0.0001647 * dr * r + 0.0456152 \% finos}$ <p>Dónde: CBR Lab: capacidad de soporte de la subrasante (%), compactado en laboratorio, en inmersión dr: deflexión medida a la distancia r (mm) r: distancia del sensor r (mm) %Finos: porcentaje de finos</p> <p>Basados en la prueba de Durbin, para los dos modelos, se considera que los datos están correlacionados o presentan cierta dependencia, lo que indicaría que la aproximación de los valores predichos no es válida, ya que se incumple la condición de independencia.</p> | | | | | | | | | | | |

5.4.1.4 Modelos de regresión adicionales para suelos tipo grava y arenas, CBR muestra compactada en laboratorio en inmersión

Dadas las condiciones encontradas para los modelos de los suelos tipo grava, en donde la correlación evaluada presenta un R² categorizado como pobre y, adicionalmente, se detecta que los valores presentan una dependencia evaluada a partir de la prueba Durbin-Watson, se evalúa un último modelo donde se analiza los datos de CBR compactados en laboratorio de suelos arenosos y tipo gravas en conjunto versus la deflexión, la distancia del sensor y el % de finos.

Se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{f(x)} = 0.005543 + 0.0002796 * dr * r + 0.05183 \% finos$$

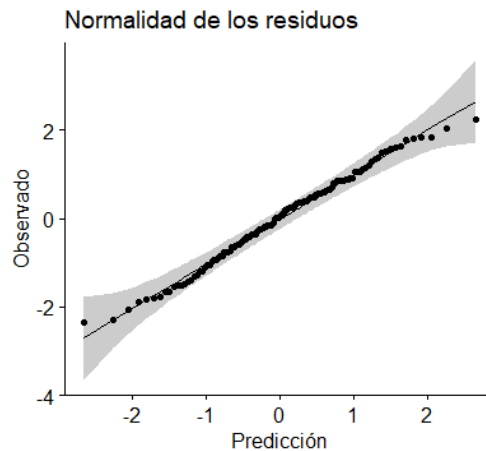
| Coefficients: | | | | |
|---|-----------|------------|---------|--------------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| (Intercept) | 5.543e-03 | 2.288e-03 | 2.423 | 0.0169 * |
| `dr*r` | 2.796e-04 | 4.884e-05 | 5.724 | 7.50e-08 *** |
| finos | 5.183e-02 | 1.054e-02 | 4.917 | 2.75e-06 *** |
| --- | | | | |
| Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | |

$$rsq (R^2) = 0.42$$

Ecuación 49

Como se puede apreciar, los dos parámetros son significativos dentro del modelo ya que su p-Value es menor a 0.05, obteniendo un coeficiente de determinación, R², de 0.42, mucho mayor al obtenido solo para los datos de suelo tipo grava.

Seguidamente, se ilustra la gráfica de normalidad de los residuos y los resultados del test de Shapiro Wilk y Kolmogorov-Smirnov. En el modelo, el valor de probabilidad p-value es mayor a 0.05, por tanto, los datos siguen una distribución normal.



CBR Lab vs $d_r \cdot r + \% \text{finos}$
 $w = 0.99142$, $p\text{-value} = 0.6324$ prueba Shapiro-wilk
 $D = 0.050088$, $p\text{-value} = 0.6127$ prueba Kolmogorov-Smirnov

Figura 92 Gráfica de normalidad de residuos, suelos tipo grava y arenas, CBR Lab.

La gráfica de residuos estandarizados vs los valores ajustados, del modelo analizado para suelos tipo grava y arenas, se pueden encerrar en una banda horizontal, lo que nos indica que no se ve síntomas de deficiencia en el modelo, por el incumplimiento del modelo por heterocedasticidad.

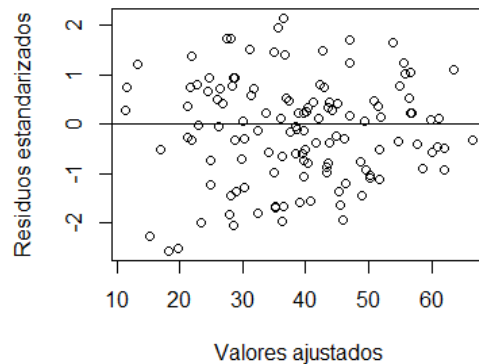


Figura 93 Graficas análisis de residuos estandarizados vs valores ajustados, suelos tipo grava y arenas, CBR Lab

Por otro lado, la gráfica de residuos o errores vs orden de observación se observa que los errores no presentan un patrón, están distribuidos de manera aleatoria lo que implica que son independientes (no correlacionados).

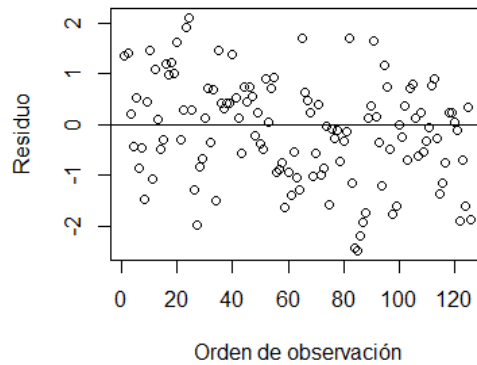


Figura 94 Graficas análisis de residuos vs orden de observación, suelos tipo grava y arenas, CBR Lab

A partir del test de Durbin-Watson, para los dos modelos planteados, los valores de p-value son menores que el nivel de significancia (5%), por tanto, se considera que los datos de la muestra están correlacionados o presentan una dependencia,

Tabla 25. Test Durbin – Watson, suelos tipo grava y arenas, CBR Lab

| lag | Autocorrelation | D-w statistic | p-value |
|-----|-----------------|---------------|---------|
| 1 | 0.3843806 | 1.189548 | 0 |

Alternative hypothesis: rho != 0

Según el análisis de autocorrelación, para el modelo analizado, en general, las líneas se encuentran entre el intervalo de confianza (95%, líneas azules), sin embargo, una de las líneas se encuentra fuera del intervalo de confianza, al igual que el test de Durbin, indican una dependencia.

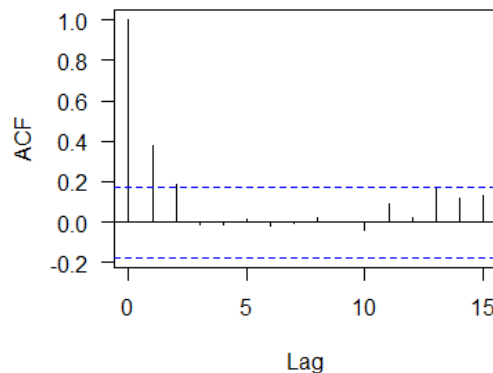


Figura 95 Graficas de autocorrelación, suelos tipo grava y arenas, CBR Lab

La Tabla 26 muestra resultados del análisis de regresión para los suelos tipo grava correlacionando el CBR compactados en laboratorio:

Tabla 26. Resultados del análisis del modelo, Suelos tipo grava y arenas, CBR muestra compactada en laboratorio (CBR Lab)

| Modelo | Variable | Coeficientes | Error estándar | t value | Pr (> t) | rsq (R2) | Normalidad de residuos | | | Autocorrelación de los residuos | |
|--|--------------|--------------|----------------|---------|-----------|----------|------------------------|--------------------|--|---------------------------------|--|
| | | | | | | | Shapiro-Wilk | Kolmogorov-Smirnov | Observación | Durbin-Watson | Observación |
| | | | | | | | P-value | | | P-value | |
| 1 | Intercepto | 0.005543 | 0.002288 | 2.423 | 0.0169 | 0.42 | 0.6324 | 0.6127 | Los datos siguen una distribución normal | 0 | Los datos de la muestra son dependientes |
| | dr*r | 0.0002796 | 0.00004884 | 5.724 | 7.50E-08 | | | | | | |
| | dr*r +%Finos | 0.05183 | 0.01054 | 4.917 | 2.75E-06 | | | | | | |
| $\frac{1}{f(x)} = 0.005543 + 0.0002796 * dr * r + 0.05183 \% finos \quad CBR_{LAB} = \frac{1}{0.005543 + 0.0002796 * dr * r + 0.05183 \% finos}$ <p>Dónde: CBR Lab: capacidad de soporte de la subrasante (%), compactado en laboratorio, en inmersión dr: deflexión medida a la distancia r (mm) r: distancia del sensor r (mm) %Finos: porcentaje de finos (mm)</p> <p>Basados en la prueba de Durbin, para los dos modelos, se considera que los datos están correlacionados o presentan cierta dependencia, lo que indicaría que la aproximación de los valores predichos no es válida, ya que se incumple la condición de independencia.</p> | | | | | | | | | | | |

5.4.2 Empleando los parámetros obtenidos por el método directo

5.4.2.1 Modelos de regresión para suelos finos, CBR muestra inalterada humedad natural

Utilizando los parámetros dr , r_{50} y humedad natural (HN) para crear los modelos de regresión lineal generalizado, se tiene las siguientes ecuaciones empleando lo betas del modelo:

$$\frac{1}{f(x)} = 0.0520434 + 0.0010484 * dr * r_{50} + 0.0024452 * HN$$

| Coefficients: | | | | | |
|---|-----------|------------|---------|----------|-----|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) | |
| (Intercept) | 0.0520434 | 0.0113799 | 4.573 | 6.77e-06 | *** |
| `dr*r` | 0.0010484 | 0.0001085 | 9.662 | < 2e-16 | *** |
| HN | 0.0024452 | 0.0004633 | 5.278 | 2.35e-07 | *** |
| --- | | | | | |
| Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | | |

$$rsq (R^2) = 0.37$$

Ecuación 50

$$\frac{1}{f(x)} = 0.1201 + 0.00003658 * dr * r_{50} * HN$$

| Coefficients: | | | | | |
|---|-----------|------------|---------|----------|-----|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) | |
| (Intercept) | 1.201e-01 | 6.044e-03 | 19.86 | <2e-16 | *** |
| `dr*r*HN` | 3.658e-05 | 3.117e-06 | 11.73 | <2e-16 | *** |
| --- | | | | | |
| Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | | |

$$rsq (R^2) = 0.40$$

Ecuación 51

$$\frac{1}{f(x)} = 0.1321 + 0.00003696 * dr * r_{50} * HN - 0.000517 wPI$$

| Coefficients: | | | | | |
|---|------------|------------|---------|----------|-----|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) | |
| (Intercept) | 1.321e-01 | 8.879e-03 | 14.872 | <2e-16 | *** |
| `dr*r*HN` | 3.696e-05 | 3.371e-06 | 10.963 | <2e-16 | *** |
| wPI | -5.170e-04 | 4.157e-04 | -1.244 | 0.215 | |
| --- | | | | | |
| Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | | |

$$rsq (R^2) = 0.40$$

Ecuación 52

Como se puede apreciar, los tres parámetros son significativos dentro de los modelos ya que su p-value es menor a 0.05.

La diferencia entre los R^2 entre los dos modelos es casi que despreciable, por tanto, su definición será determinada a partir del siguiente análisis de verificación de los modelos planteados.

En el **Anexo 5** se presenta los resultados de verificación de los modelos analizados para los parámetros del método directo.

La Tabla 27, muestra resultados del análisis de regresión para los suelos finos correlacionando el CBR en condiciones de humedad natural:

Tabla 27. Resultados del análisis del modelo, Suelos finos CBR humedad natural (CBR Wn)

| Modelo | Variable | Coeficientes | Error estándar | t value | Pr (> t) | rsq (R2) | Normalidad de residuos | | | Autocorrelación de los residuos | |
|--|---|--------------|----------------|---------|--|----------|------------------------|--------------------|--|---------------------------------|---|
| | | | | | | | Shapiro-Wilk | Kolmogorov-Smirnov | Observación | Durbin-Watson | Observación |
| | | | | | | | P-value | | | P-value | |
| 1 | Intercepto | 0.1201 | 0.006044 | 19.86 | < 2e-16 | 0.40 | 0.0871 | 0.6002 | Los datos siguen una distribución normal | 0.946 | Los datos de la muestra son independientes. |
| | dr*r ₅₀ *HN | 0.00003658 | 0.000003117 | 11.73 | < 2e-16 | | | | | | |
| | $\frac{1}{f(x)} = 0.1201 + 0.00003658 * dr * r_{50} * HN$ $CBR_{Wn} = \frac{1}{0.1201 + 0.00003658 * dr * r_{50} * HN}$ | | | | | | | | | | |
| <p>Dónde: CBR Wn: capacidad de soporte de la subrasante (%), muestra inalterada en condiciones de humedad natural dr: deflexión medida a la distancia r (mm) r₅₀: distancia del sensor r (mm) HN: humedad natural (%)</p> | | | | | | | | | | | |
| 2 | Intercepto | 0.1321 | 0.008879 | 14.872 | < 2e-16 | 0.40 | 0.5215 | 0.6601 | Los datos siguen una distribución normal | 0.962 | Los datos de la muestra son independientes. |
| | dr*r ₅₀ *HN | 0.00003696 | 0.000003371 | 10.963 | < 2e-16 | | | | | | |
| | wPI | -0.000517 | 0.0004157 | -1.244 | 0.214 | | | | | | |
| $\frac{1}{f(x)} = 0.1321 + 0.00003696 * dr * r_{50} * HN + 0.000517 wPI$ $CBR_{Wn} = \frac{1}{0.1321 + 0.00003696 * dr * r_{50} * HN - 0.000517 wPI}$ | | | | | <p>Dónde: CBR Wn: capacidad de soporte de la subrasante (%), muestra inalterada en condiciones de humedad natural dr: deflexión medida a la distancia r (mm) r₅₀: distancia del sensor r (mm) HN: humedad natural (%) w: % que pasa el tamiz 0.075 mm IP: índice de plasticidad</p> | | | | | | |

5.4.2.2 Modelos de regresión para suelos arenosos

5.4.2.2.1 Correlación CBR inalterado, muestra inalterada humedad natural

Para el caso de los suelos arenosos, se tiene el análisis para el CBR inalterado en condición de humedad natural y CBR compactado en laboratorio. Utilizando los parámetros deflexión (dr), localización del sensor (r_{50}) y humedad natural (HN), se presenta a continuación los modelos planteados:

$$\frac{1}{f(x)} = 0.083774 + 0.020200 * dr * HN$$

| Coefficients: | | | | |
|---|----------|------------|---------|-------------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| (Intercept) | 0.083774 | 0.014307 | 5.855 | 1.2e-06 *** |
| `dr*HN` | 0.020200 | 0.006821 | 2.961 | 0.00547 ** |
| --- | | | | |
| Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | |

$$rsq (R^2) = 0.27$$

Ecuación 53

$$\frac{1}{f(x)} = 0.08578 + 0.00002904 * dr * r_{50} * HN$$

| Coefficients: | | | | |
|---|-----------|------------|---------|-------------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| (Intercept) | 8.578e-02 | 1.403e-02 | 6.112 | 5.5e-07 *** |
| `dr*r50*HN` | 2.901e-05 | 9.982e-06 | 2.907 | 0.0063 ** |
| --- | | | | |
| Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | |

$$rsq (R^2) = 0.28$$

Ecuación 54

Para los dos modelos las variables dr , r_{50} y HN son significativas ya que su p-value es menor de 0.05, según la hipótesis nula planteada, aunque su valor tiene una significancia baja. También se puede observar valores de R^2 pobre, de 0.27 y 0.28 respectivamente.

La diferencia entre los R^2 entre los dos modelos es de 0.01, por tanto, su definición será determinada a partir del siguiente análisis de verificación de los modelos planteados, analizado solo para el modelo 2 que vincula la variable $dr*r_{50}*HN$.

La Tabla 28 muestra resultados del análisis de regresión para los suelos arenosos correlacionando el CBR en condiciones de humedad natural:

Tabla 28. Resultados del análisis del modelo, Suelos arenosos CBR humedad natural (CBR Wn)

| Modelo | Variable | Coeficientes | Error estándar | t value | Pr (> t) | rsq (R2) | Normalidad de residuos | | | Autocorrelación de los residuos | |
|--|------------------------|--------------|----------------|---------|-----------|----------|------------------------|-------------------|--|---------------------------------|--|
| | | | | | | | Shapiro-Wilk | Kolmogorov-Smirno | Observación | Durbin-Watson | Observación |
| | | | | | | | P-value | | | P-value | |
| 1 | Intercepto | 0.083774 | 0.014307 | 5.855 | 1.20E-06 | 0.27 | | | | | |
| | dr*HN | 0.020200 | 0.006821 | 2.961 | 0.00547 | | | | | | |
| 2 | Intercepto | 0.08578 | 0.01403 | 6.112 | 5.5E-07 | 0.28 | 0.0873 | 0.6002 | Los datos siguen una distribución normal | 0.014 | Los datos de la muestra no son independientes. |
| | dr*r ₅₀ *HN | 0.00002901 | 0.000009982 | 2.907 | 0.0063 | | | | | | |
| $\frac{1}{f(x)} = 0.08578 + 0.00002901 * dr * r_{50} * HN \qquad CBR_{Wn} = \frac{1}{0.08578 + 0.00002901 * dr * r_{50} * HN}$ <p>Dónde: CBR Wn: capacidad de soporte de la subrasante (%), muestra inalterada en condiciones de humedad natural dr: deflexión medida a la distancia r (mm) r₅₀: distancia del sensor r (mm) HN: humedad natural (%)</p> <p>Basados en la prueba de Durbin, se considera que los datos están correlacionados o presentan cierta dependencia, lo que indicaría que la aproximación de los valores predichos no es válida, ya que se incumple la condición de independencia.</p> | | | | | | | | | | | |

5.4.2.2.2 Correlación CBR muestra compactada en laboratorio, en inmersión

En cuanto al análisis para el CBR de muestras compactadas en laboratorio, en suelos arenosos, este se relacionara con los parámetros de porcentaje de finos, deflexión (dr), localización del sensor (r_{50}) y humedad natural (HN) para crear el modelo de regresión lineal generalizado, al igual que para los demás análisis, se emplea una función de enlace Inversa y con el modelo perteneciente a una familia de distribución Gamma, se obtiene los siguientes resultados:

Empleando los Betas del modelo, se tiene las siguientes ecuaciones:

$$\frac{1}{f(x)} = 0.0243623 + 0.0007642 * dr * r_{50} * \% finos$$

| Coefficients: | | | | |
|--|-----------|------------|---------|--------------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| (Intercept) | 0.0243623 | 0.0036065 | 6.755 | 3.66e-08 *** |
| `dr*r%finos` | 0.0007642 | 0.0002305 | 3.315 | 0.00193 ** |
| --- Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | |

$$rsq (R^2) = 0.26$$

Ecuación 55

$$\frac{1}{f(x)} = 0.01741 + 0.0003541 * dr * r_{50}$$

| Coefficients: | | | | |
|--|-----------|------------|---------|--------------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| (Intercept) | 1.741e-02 | 4.755e-03 | 3.662 | 0.000708 *** |
| `dr*r` | 3.541e-04 | 9.619e-05 | 3.682 | 0.000670 *** |
| --- Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | |

$$rsq (R^2) = 0.35$$

Ecuación 56

$$\frac{1}{f(x)} = 0.02311 + 0.0000266 * dr * r_{50} * HN$$

| Coefficients: | | | | |
|--|-----------|------------|---------|--------------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| (Intercept) | 2.311e-02 | 3.197e-03 | 7.230 | 7.83e-09 *** |
| `dr*r*HN` | 2.660e-05 | 6.427e-06 | 4.139 | 0.000169 *** |
| --- Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | |

$$rsq (R^2) = 0.38$$

Ecuación 57

$$\frac{1}{f(x)} = 0.05552 - 0.00008718 * MR$$

| Coefficients: | | | | | |
|---|------------|------------|---------|----------|-----|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) | |
| (Intercept) | 5.552e-02 | 6.489e-03 | 8.556 | 1.16e-10 | *** |
| MR | -8.718e-05 | 2.006e-05 | -4.346 | 8.92e-05 | *** |
| --- | | | | | |
| Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | | |

$$\text{rsq } (R^2) = 0.28$$

Ecuación 58

Para los cuatro modelos planteados el parámetro p-value es menor a 0.05, por lo que las variables empleadas son significativas dentro del modelo. Por otro lado, su coeficiente de determinación, R^2 son de 0.26, 0.35, 0.38 y 0.28 respectivamente, presentando todos los modelos una correlación pobre.

La diferencia entre los R^2 entre los modelos 2 y 3, es despreciable, por lo que su definición será determinada a partir del siguiente análisis de verificación del modelo que vincula las variables dr^*r_{50} y $dr^*r_{50}^*HN$.

La Tabla 29 muestra resultados del análisis de regresión para los suelos arenosos correlacionando el CBR compactado en laboratorio.

Tabla 29. Resultados del análisis del modelo, Suelos arenosos CBR muestra compactada en laboratorio (CBR Lab)

| Modelo | Variable | Coeficientes | Error estándar | t value | Pr (> t) | rsq (R2) | Normalidad de residuos | | | Autocorrelación de los residuos | |
|--------|--|--------------|----------------|---------|-----------|----------|------------------------|--------------------|--|---------------------------------|--|
| | | | | | | | Shapiro-Wilk | Kolmogorov-Smirnov | Observación | Durbin-Watson | Observación |
| | | | | | | | P-value | | | P-value | |
| 1 | Intercepto | 0.01741 | 0.004755 | 3.662 | 0.000708 | 0.35 | 0.5027 | 0.922 | Los datos siguen una distribución normal | 0 | Los datos de la muestra no son independientes. |
| | dr*r | 0.0003541 | 0.00009619 | 3.682 | 0.000670 | | | | | | |
| | $\frac{1}{f(x)} = 0.01741 + 0.0003541 * dr * r \qquad CBR_{LAB} = \frac{1}{0.01741 + 0.0003541 * dr * r}$ <p>Dónde: CBR Lab: capacidad de soporte de la subrasante (%), Compactado en laboratorio, en inmersión dr: deflexión medida a la distancia r (mm) r₅₀: distancia del sensor r (mm)</p> | | | | | | | | | | |
| 2 | Intercepto | 0.02311 | 2.3118E-02 | 7.230 | 7.83E-09 | 0.38- | 0.2957 | 0.1821 | Los datos siguen una distribución normal | 0 | Los datos de la muestra no son independientes. |
| | dr*r*HN | 0.0000266 | 6.427E-06 | 4.139 | 0.000169 | | | | | | |
| | $\frac{1}{f(x)} = 0.02311 + 0.0000266 * dr * r_{50} * HN \qquad CBR_{LAB} = \frac{1}{0.02311 + 0.0000266 * dr * r_{50} * HN}$ <p>Dónde: CBR Lab: capacidad de soporte de la subrasante (%), Compactado en laboratorio, en inmersión dr: deflexión medida a la distancia r (mm) r₅₀: distancia del sensor r (mm)</p> <p>Basados en la prueba de Durbin, para los dos modelos, se considera que los datos están correlacionados o presentan cierta dependencia, lo que indicaría que la aproximación de los valores predichos no es válida, ya que se incumple la condición de independencia.</p> | | | | | | | | | | |

5.4.2.3 Modelos de regresión para suelos tipo grava, CBR muestra compactada en laboratorio en inmersión

Por último, para los suelos tipo grava, se quiere correlacionar el CBR compactado en laboratorio con las variables dr , r_{50} y % de finos:

Empleando los Betas del modelo, se tiene la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{f(x)} = 0.0173971 + 0.0007776 * dr * r_{50} * \% finos$$

| Coefficients: | | | | |
|--|-----------|------------|---------|--------------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| (Intercept) | 0.0173971 | 0.0014166 | 12.281 | < 2e-16 *** |
| `dr*r%finos` | 0.0007776 | 0.0001827 | 4.255 | 5.57e-05 *** |
| --- Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | |

$$rsq (R^2) = 0.23$$

Ecuación 59

$$\frac{1}{f(x)} = 0.01070 + 0.000127 * dr * r_{50} + 0.04435 \% finos$$

| Coefficients: | | | | |
|--|-----------|------------|---------|--------------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| (Intercept) | 1.070e-02 | 2.508e-03 | 4.266 | 5.41e-05 *** |
| `dr*r` | 1.270e-04 | 4.343e-05 | 2.925 | 0.00448 ** |
| finos | 4.435e-02 | 1.495e-02 | 2.967 | 0.00396 ** |
| --- Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | |

$$rsq (R^2) = 0.25$$

Ecuación 60

Como se puede apreciar, los tres parámetros son significativos dentro del modelo ya que su p-value es menor a 0.05. Por otro lado, su coeficiente de determinación, R^2 son de 0.23 y 0.25 respectivamente, presentando una correlación pobre.

La definición del modelo será definida a partir del siguiente análisis de verificación estadístico.

La Tabla 30 muestra resultados del análisis de regresión para los suelos tipo grava correlacionando el CBR compactados en laboratorio:

Tabla 30. Resultados del análisis del modelo, Suelos tipo grava CBR muestra compactada en laboratorio (CBR Lab)

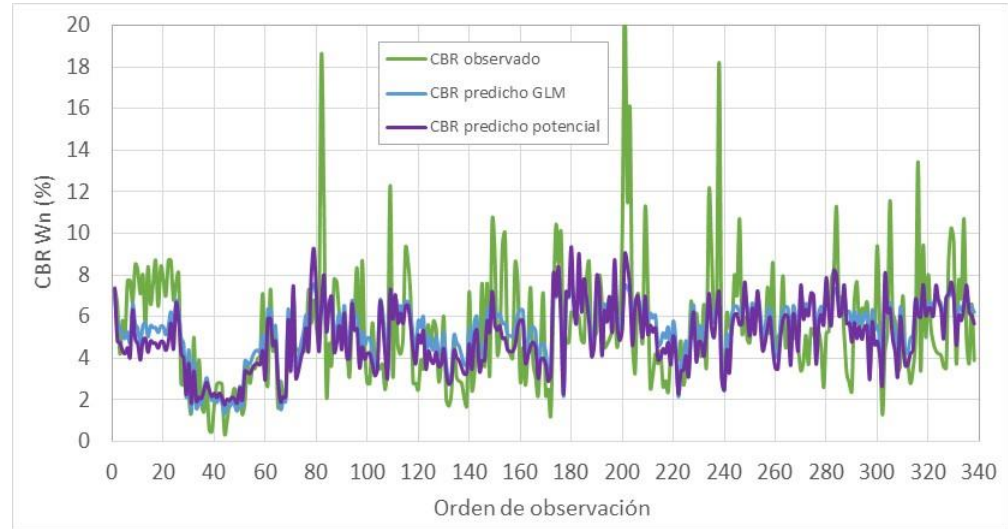
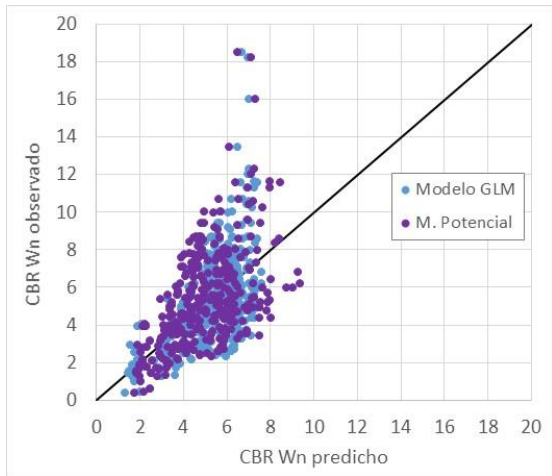
| Modelo | Variable | Coeficientes | Error estándar | t value | Pr (> t) | rsq (R2) | Normalidad de residuos | | | Autocorrelación de los residuos | |
|--------|---|--------------|----------------|---------|-----------|----------|------------------------|--------------------|--|---------------------------------|--|
| | | | | | | | Shapiro-Wilk | Kolmogorov-Smirnov | Observación | Durbin-Watson | Observación |
| | | | | | | | P-value | | | P-value | |
| 1 | Intercepto | 0.0173971 | 0.0014166 | 12.281 | 2.00E-16 | 0.23 | 0.7287 | 0.8522 | Los datos siguen una distribución normal | 0 | Los datos de la muestra son dependientes |
| | dr*r *%Finos | 0.0007776 | 0.0001827 | 4.255 | 5.57E-05 | | | | | | |
| 1 | $\frac{1}{f(x)} = 0.0173971 + 0.0007776 * dr * r_{50} * \% finos \quad CBR_{LAB} = \frac{1}{0.0173971 + 0.0007776 * dr * r_{50} * \% finos}$ <p>Dónde: CBR Lab: capacidad de soporte de la subrasante (%), compactado en laboratorio, en inmersión dr: deflexión medida a la distancia r (mm) r₅₀: distancia del sensor r (mm) %Finos: porcentaje de finos</p> | | | | | | | | | | |
| 1 | Intercepto | 0.01070 | 0.002508 | 4.266 | 5.41E-05 | 0.25 | 0.5094 | 0.3472 | Los datos siguen una distribución normal | 0 | Los datos de la muestra son dependientes |
| | dr*r | 0.000127 | 0.00004343 | 2.925 | 0.00448 | | | | | | |
| | % Finos | 0.04435 | 0.01495 | 2.967 | 0.00396 | | | | | | |
| 1 | $\frac{1}{f(x)} = 0.01070 + 0.000127 * dr * r_{50} + 0.044435 \% finos \quad CBR_{LAB} = \frac{1}{0.01070 + 0.000127 * dr * r_{50} + 0.04435 \% finos}$ <p>Dónde: CBR Lab: capacidad de soporte de la subrasante (%), compactado en laboratorio, en inmersión dr: deflexión medida a la distancia r (mm) r₅₀: distancia del sensor r (mm) %Finos: porcentaje de finos</p> <p>Basados en la prueba de Durbin, para los dos modelos, se considera que los datos están correlacionados o presentan cierta dependencia, lo que indicaría que la aproximación de los valores predichos no es válida, ya que se incumple la condición de independencia.</p> | | | | | | | | | | |

5.5 Discusión de resultados de correlación

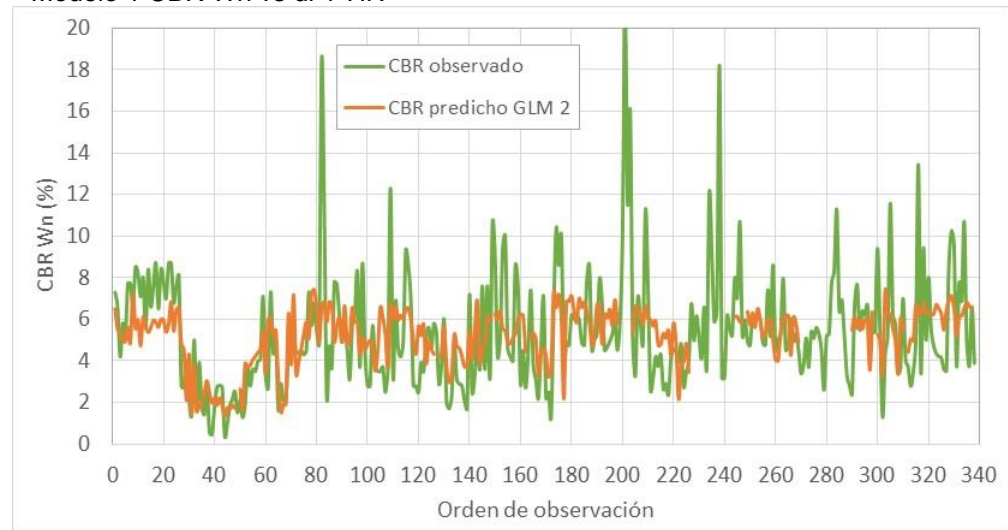
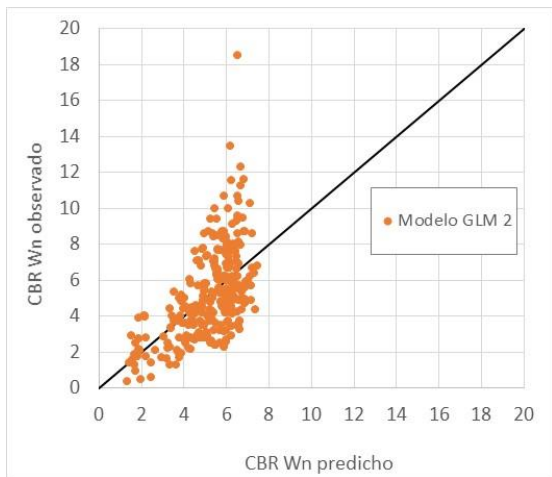
Los siguientes gráficos se generan para analizar la aproximación de los modelos desarrollados de mejor ajuste, entre los valores observados y los predichos, como se muestra en la Figura 96, Figura 97 y Figura 98, según los modelos presentados en el numeral 5.2 y lo presentado en el análisis de ANOVA para las variables de los parámetros del suelo, empleando la deflexión (d_r) y distancia del sensor (r) establecidos por la metodología AASHTO-93. Lo anterior, debido a que los resultados de análisis estadístico indican que los modelos analizados con los parámetros del método directo (d_r y r_{50}) para las arenas y gravas tienen resultados deficientes, analizados a partir del coeficiente de determinación R^2 y del análisis de dependencia de los residuos.

Para el caso de la correlación entre el CBR muestra inalterada en condiciones de humedad natural de los suelos arenosos, todos los modelos analizados presentan deficiencia en la predicción; por tanto, se descarta plantear una correlación para estas condiciones de CBR en suelos arenosos.

Para el caso de los suelos tipo grava, la predicción de los valores del CBR de muestras compactadas en laboratorio, presentan cierta dependencia de los residuos, por lo que se debe analizar este efecto en los valores predichos; por consiguiente, se muestra un modelo donde se agrupan los datos de los suelos arenosos y tipo grava, el cual logra mejorar el coeficientes de determinación R^2 de 0.27 a 0.42 (rango aceptable), sin embargo, sigue presentando resultados de dependencia según la prueba de Durbin-Watson.

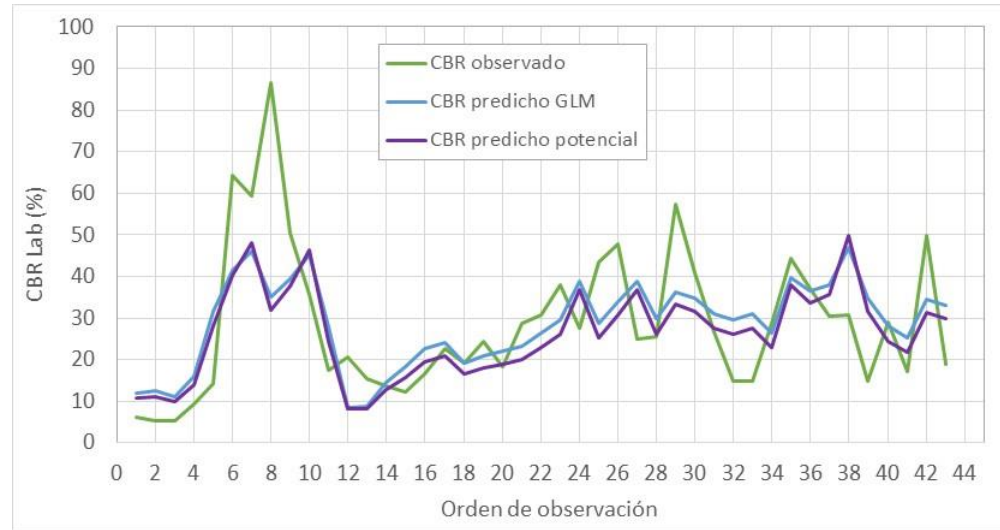
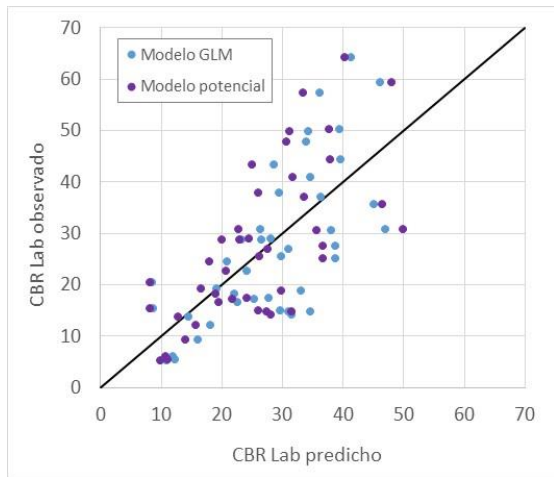


Modelo 1 CBR Wn vs dr^*r^*HN



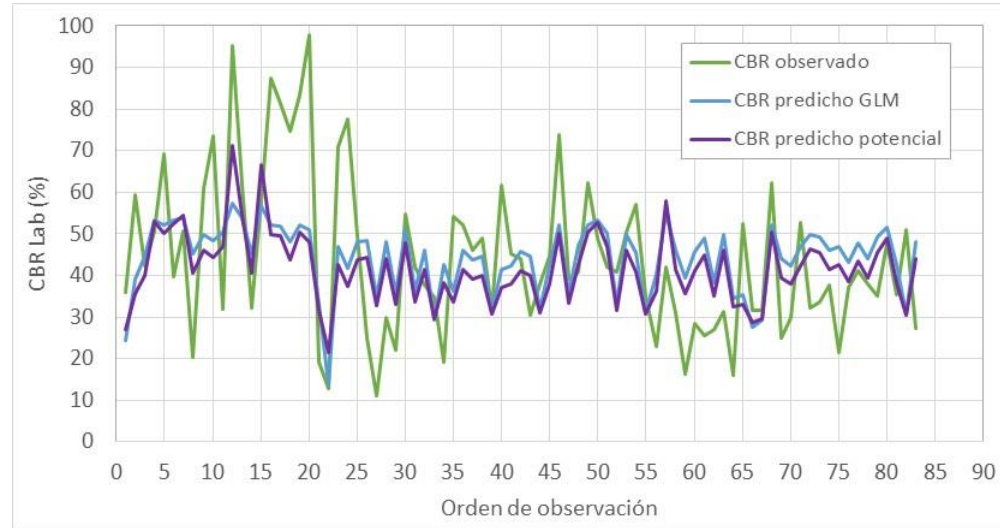
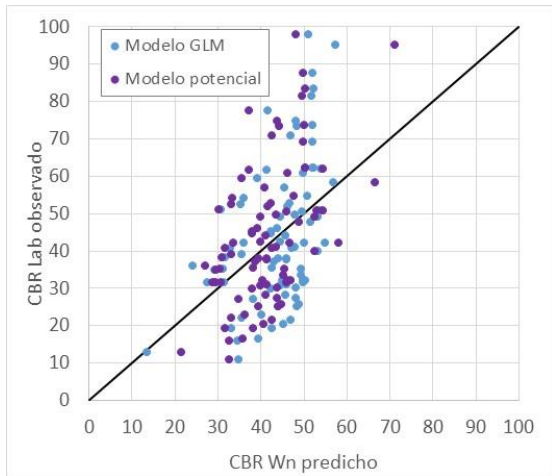
Modelo 2 CBR Wn vs $dr^*r^*HN + wPI$

Figura 96 Comparación entre el valor de CBR Wn observado y el CBR Wn predicho, suelos finos

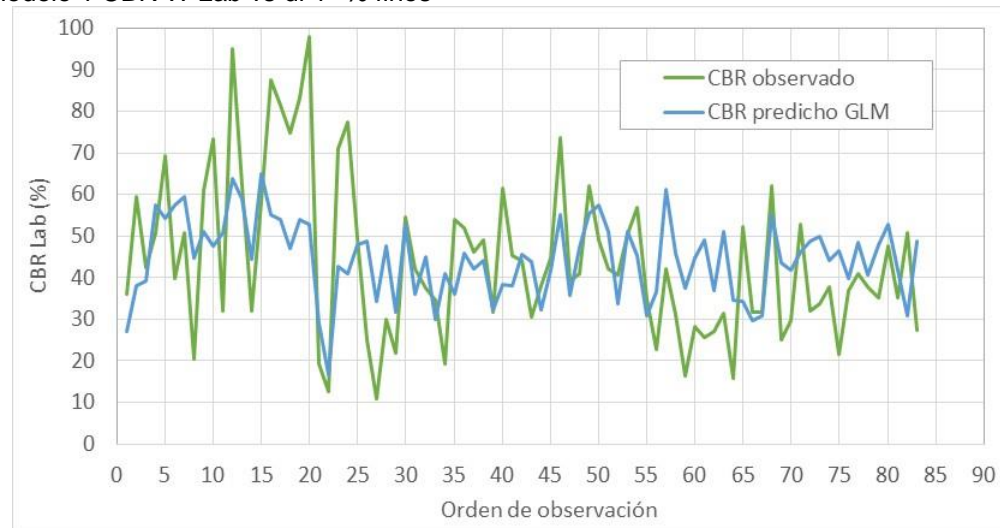
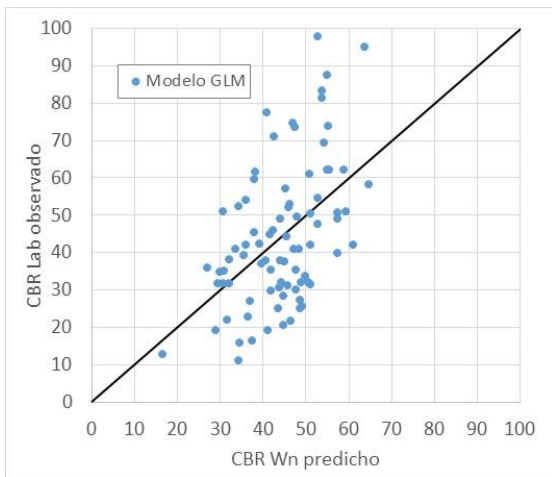


Modelo 1 CBR Lab vs dr*r

Figura 97 Comparación entre el valor de CBR LAB observado y el CBR LAB predicho, suelo arenoso

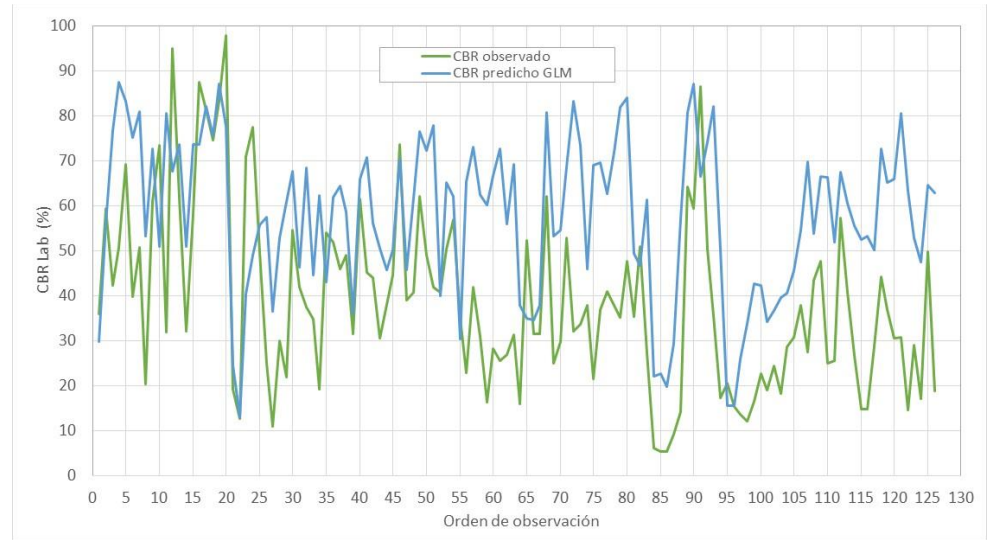
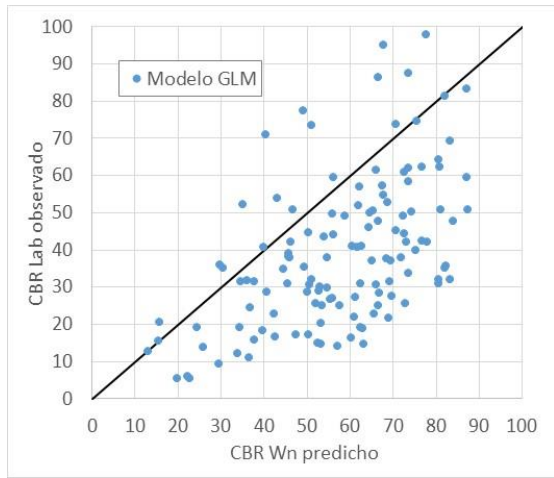


Modelo 1 CBR W Lab vs dr^*r^* % finos



Modelo 2 CBR Lab vs $dr^*r^* +$ % finos

Figura 98 Comparación entre el valor de CBR LAB observado y el CBR LAB predicho, suelo tipo grava



Modelo 1 CBR W Lab vs $d_r^* r^* + \% \text{ finos}$

Figura 99 Comparación entre el valor de CBR LAB observado y el CBR LAB predicho, suelo tipo grava y arenoso

Adicionalmente, se valida el modelo de estimación al comparar los valores observados de CBR y los predichos, por cada modelo, con la ayuda del diagrama de cajas y bigotes. En la Figura 101, se presenta los resultados del análisis.

Este grafico de cajas y bigotes es bastante útil para visualizar la distribución de los datos obtenidos. Allí se presenta información sobre los cuartiles de la distribución, valores atípicos y valores extremos de la variable evaluada, en este caso, el CBR. En la Figura 100 se muestra la media, los cuartiles 1 y 3 (Q1 y Q3) y los valores máximos y mínimos (Max y Min).

La media, la línea negra más gruesa que está dentro de la caja, es el valor del CBR que ocupa el lugar central o medio del conjunto de datos ordenados. Q1, el cuartil Primero, es el valor mayor que el 25% de los valores de la distribución; Q3, el Tercer Cuartil, es el valor que sobrepasa al 75% de los valores de la distribución. Las líneas que sobresalen de la caja se llaman bigotes. Estos bigotes tienen un límite de prolongación (máximo y mínimo), de modo que cualquier dato o caso que no se encuentre dentro de este rango es marcado e identificado individualmente; se caracterizan por ser datos atípicos.

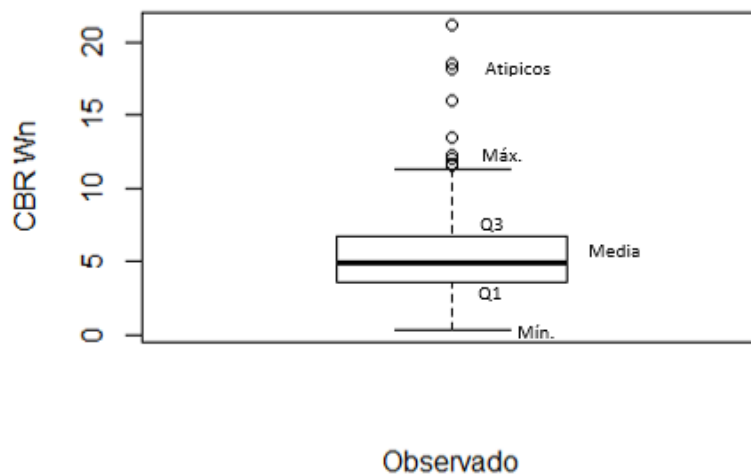


Figura 100 Interpretación diagrama de cajas y bigotes

El análisis de los diagramas de cajas y bigotes se realiza solo para los modelos lineales generalizados determinados.

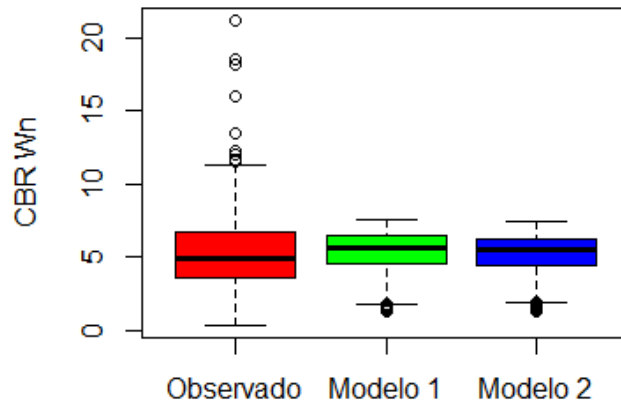


Figura 101 Comparación de los diagramas de cajas y bigotes de los modelos para suelos finos, con CBR Wn

Para el caso de los suelos finos, se obtiene rangos intercuantiles (Q1 – Q3) de valores de CBR Wn, para el modelo 1 entre 4.6 y 6.5 %, para el modelo 2 entre 4.5 y 6.2 %, comparados con el CBR Wn observado entre 3.6 y 6.7 %, existiendo una diferencia del 4% y 8% respectivamente en el rango inferior y del 28% y 26 % respectivamente en el rango superior, de los valores de CBR Wn; sin embargo, esta última diferencia se debe a un valor atípico presentado en la muestra. En cuanto a los valores máximo y mínimos de CBR Wn predichos, para el modelo 1 se tiene valores de 1.3 y 7.6 %, para el modelo 2 de 1.3 y 7.5 %, confrontados con 0.4 y 11.6 % (excluyendo los valores atípicos) de los CBR Wn observados. Se puede concluir que los dos modelos se asemejan a los datos para valores CBR bajos y el modelo 1 a los valores más altos de CBR Wn.

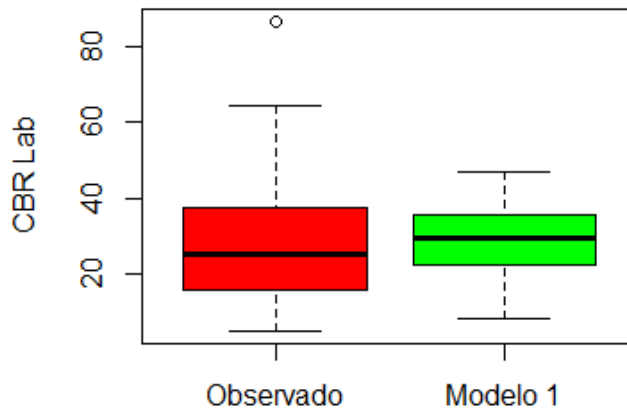


Figura 102 Comparación de los diagramas de cajas y bigotes de los modelos para suelos arenosos, con CBR Lab

Como resultados, para los suelos arenosos, el rango intercuartil (Q1 – Q3) de valores de CBR Lab, del modelo 1 propuesto se encuentra entre 22.4 y 35.6 %, contrarrestado con el CBR Lab observado entre 16.0 y 37.5 %, existiendo unas diferencias del 40% y 5% en el rango inferior y superior respectivamente; estos datos corresponden al 50% de la distribución. Esta diferencia del 40 % obedece al comparativo de los valores del 16% (CBR observado) y 22.4% del valor predicho de CBR. En cuanto a los valores máximo y mínimos de CBR Lab predichos, para el modelo 1 se tiene valores de 8.6 y 47.0 %, comparados con 5.3 y 64.3 % (excluyendo el valor atípico de 86.5%) de los CBR Lab observados.

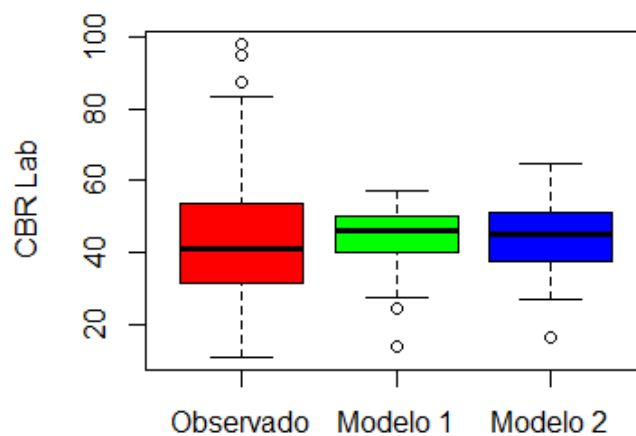


Figura 103 Comparación de los diagramas de cajas y bigotes de los modelos para suelos tipo grava, con CBR Lab

Para los resultados de CBR Lab en suelos tipo grava, de los modelos se puede observar que los modelos propuestos (1 y 2) tienen rangos intercuartiles (Q1-Q3) entre 39.8 – 49.9 % y 37.7 – 51.0 %, comparados con 31.5 – 53.4 % de los valores observados; por tanto, se puede indicar que la variabilidad de los datos en los modelos presentan el mismo comportamiento de los datos observados de CBR Lab, sin embargo, existe una diferencia del 26% y 20% respectivamente en el rango inferior y del 7% y 4% respectivamente en el rango superior, con respecto a los valores de CBR WLab. En cuanto a los valores mínimos y máximos de CBR Lab predichos, para el modelo 1 se tiene valores de 13.7 y 57.4 % y para el modelo 2 de 16.6 y 64.8%, confrontados con 11.0 y 83.3% (excluyendo los valores atípicos) de los CBR Lab observados.

Para el caso del análisis del conjunto de datos de CBR de laboratorio de los suelos arenosos y tipo grava, se tiene el siguiente análisis:

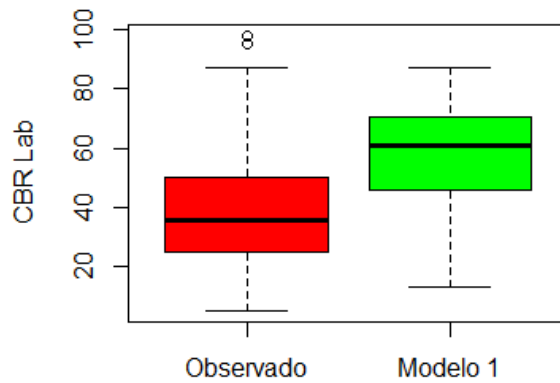


Figura 104 Comparación de los diagramas de cajas y bigotes del modelo para suelos tipo grava-arenas, con CBR Lab

Para este modelo, el rango intercuartil (Q1 – Q3) de valores de CBR Lab, del modelo 1 propuesto se encuentra entre 46.0 y 70.7 %, contrarrestado con el CBR Lab observado entre 25.0 y 50.4 %, existiendo una diferencia del 84% y 40% en el rango inferior y superior respectivamente; estos datos corresponden al 50% de la distribución. A diferencia del modelo analizado solo para los suelos tipo grava, este modelo podría abarcar valores de CBR superiores al 50%; sin embargo, se puede observar que la predicción es mucho mayor a los valores observados, a pesar de que el modelo presenta un mejor coeficiente de determinación R^2 . Por consiguiente, se recomienda el modelo establecido solo con los datos de CBR de laboratorio para suelos tipo grava. En el siguiente diagrama de cajas y bigotes se analiza los dos modelos:

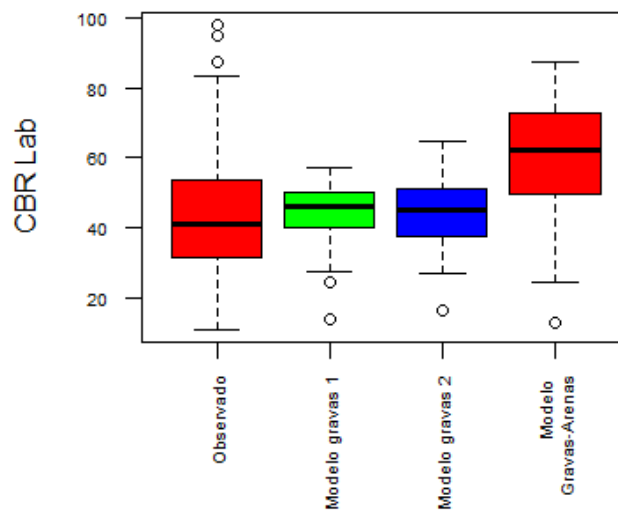


Figura 105 Comparación de los diagramas de cajas y bigotes modelos gravas y grava-arenas, con CBR Lab

En la Tabla 31 se resumen los datos de los diagramas de cajas y bigotes para cada uno de los modelos.

Tabla 31. Resultados diagrama de cajas y bigotes modelos MLG

| | Suelos Finos | | | Suelos Arenosos | | Suelos tipo grava | | | Suelos tipo grava-arenas | |
|--------|------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
| | CBR Wn observado | CBR Wn predicho modelo 1 | CBR Wn predicho modelo 2 | CBR Lab observado | CBR Lab predicho modelo 1 | CBR Lab observado | CBR Lab predicho modelo 1 | CBR Lab predicho modelo 2 | CBR Lab observado | CBR Lab predicho modelo 1 |
| Mínimo | 0.4 | 1.3 | 1.3 | 5.3 | 8.6 | 11.0 | 13.7 | 16.6 | 0.4 | 1.3 |
| Q1 | 3.6 | 4.6 | 4.5 | 16.0 | 22.4 | 31.5 | 39.8 | 37.7 | 3.6 | 4.6 |
| Media | 4.9 | 5.6 | 5.5 | 25.6 | 29.7 | 40.8 | 47.0 | 45.0 | 4.9 | 5.6 |
| Q3 | 6.7 | 6.5 | 6.2 | 37.4 | 35.6 | 53.4 | 49.9 | 51.0 | 6.7 | 6.5 |
| Máximo | 21.2 | 7.6 | 7.5 | 86.5 | 17.0 | 97.9 | 57.4 | 64.8 | 21.2 | 7.6 |

5.6 Comparación entre los modelos propuestos y otras correlaciones

Para realizar la comparación entre los modelos propuestos para cada tipo de suelo y los modelos disponibles de correlación entre FWD, CBR y algunas propiedades del suelo, mencionados en los capítulos 3 y 4, se analizó el cociente entre el CBR predicho y el observado. En la Figura 106 se ilustra los diagramas de cajas y bigotes, en el eje Y se presenta el cociente mencionado y en el eje X los modelos analizados.

5.6.1 Suelo finos

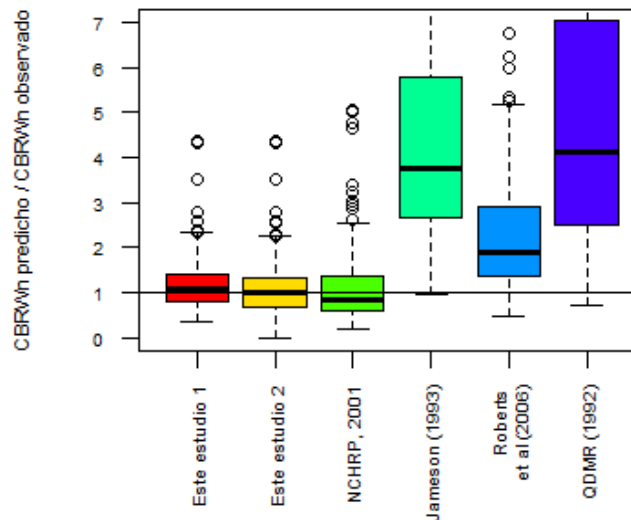


Figura 106 Comparativo modelos propuestos con otras correlaciones, suelos finos

Para suelos finos, en el modelo de la NCHRP 2001, el cual vincula las variables pasa #200 y el IP, la media de la relación CBR Wn predicho / CBR Wn observado es de 0.85. Para el modelo de Jameson es de 3.76, en Roberts et al es de 1.90 y en el de QDMR es de 4.1; estos tres modelos correlacionan el CBR con la deflexión D900. Los resultados de los modelos propuestos en este estudio (1 y 2) presentan las medias más cercanas a 1 (1.07 modelo 1 y 0.98 modelo 2); por tanto, entre los modelos comparados, los parámetros calculados con los modelos de este estudio son los que más se acercan a los parámetros observados. El valor 1 en el eje "y" representa la igualdad entre el CBR predicho y el observado.

La diferencia de la media con los cuartiles 1 y 3 (Q1 y Q3) representa la desviación estándar y a su vez nos indica que tan dispersos están los datos con respecto a la media. En la Figura 106 se observa que la desviación estándar de los modelos propuestos 1 y 2 es de 0.34 para ambos caso y la desviación estándar del modelo (NCHRP, 2001) es de 0.52, para el resto de los modelos comparados, la desviación estándar es mayor a 0.55. Se puede observar que las mayores desviaciones se presentan para valores de CBR mayores.

Adicionalmente, se puede observar que los modelos que correlacionan la deflexión localizada a 900 mm del centro de aplicación de carga se alejan en gran medida a los valores observados de CBR en condiciones de humedad para los suelos clasificados como finos. Por el contrario, el modelo de la (NCHRP, 2001), se asemeja más a los valores predichos a partir de los modelos planteados en el presente estudio.

5.6.2 Suelos arenosos

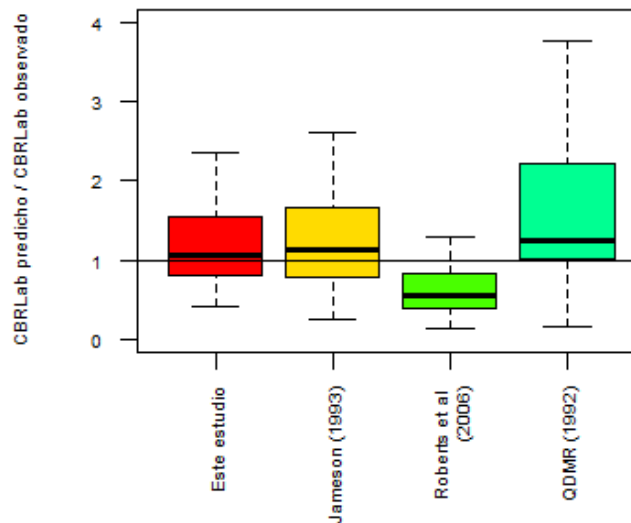


Figura 107 Comparativo modelos propuestos con otras correlaciones, suelos arenosos

Para el caso de los suelos arenosos, el modelo propuesto en este estudio correlaciona el CBR compactado en laboratorio; para la relación entre el CBRLab predicho / CBRLab observado, la media del modelo de Jameson es de 1.12, la de Roberts et al de 0.55 y la de QDMR de 1.24, los cuales correlacionan el CBR con la deflexión D900. Los resultados del modelo propuesto en este estudio presentan la media más cercana a 1 (1.06); por tanto,

entre los modelos comparados, los parámetros calculados con el modelo de este estudio son los que más se acercan a los parámetros observados, seguido del modelo de Jameson y, por último, los dos restantes.

Según lo observado, en el modelo de Roberts et al, los valores predichos son muy inferiores a los CBR observados; por el contrario, en el modelo de QDMR, la predicción del CBR es mucho mayor a los valores de CBR observados.

En la Figura 107 se observa que la desviación estándar del modelo propuesto es de 0.33; la desviación estándar del modelo de Jameson es de 0.53, siendo este modelo el que se asemeja más a los datos de CBR observados de los modelos australianos.

5.6.3 Suelos tipo grava

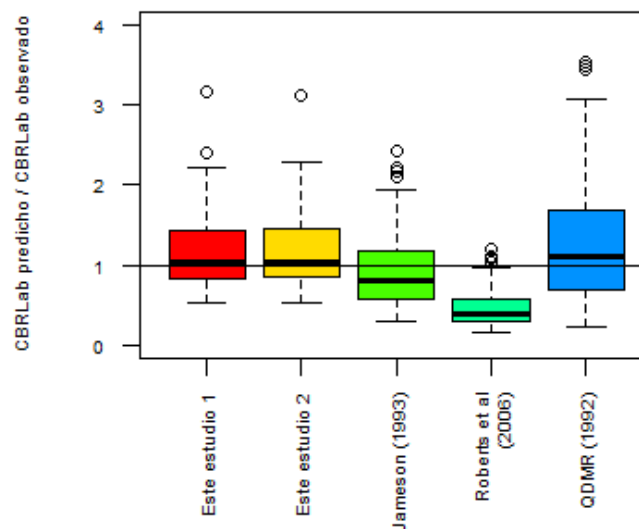


Figura 108 Comparativo modelos propuestos con otras correlaciones, suelos tipo grava

Por último, para los suelos tipo grava, al igual que para los demás suelos, los resultados de los modelos propuestos en este estudio (1 y 2) presentan la media más cercanas a 1 (1.04 y 1.03 respectivamente); por tanto, entre los modelos comparados, los parámetros calculados con el modelo de este estudio son los que el que más se acercan a los parámetros observados, seguido del modelo de QDMR y, por último, los dos restantes.

La desviación estándar de los modelos propuestos 1 y 2 es de 0.40 para ambos casos. La del modelo QDMR es de 0.57 y para los modelos de Jameson y Roberts et al son de 0.38 y 0.19 respectivamente; para este último, los valores de CBR predichos son mucho más bajos a los observados.

5.7 Modelos propuestos

Con base en el análisis realizado de regresiones, análisis estadístico como el coeficiente de determinación R^2 , coeficiente de correlación, r , normalidad de residuos, independencia entre sí de los residuos y homocedasticidad (igualdad de varianza), en menor importancia que los demás parámetros analizados, por el tipo de regresión empleada, regresión lineal generalizada, a continuación se presenta las ecuaciones que mejor permiten estimar el valor del CBR de muestra inalteradas en condiciones de humedad natural y compactadas en laboratorio al 95% de la densidad máxima, en inmersión.

5.7.1 Suelo: finos (arcillas y limos), CBR muestra inalterada humedad natural

$$\begin{array}{c}
 \textit{Modelo MLG} \\
 \\
 CBR_{Wn} = \frac{1}{0.1186 + 0.000041 * dr * r * HN}
 \end{array}$$

$$R^2 = 0.41, r = 0.64$$

Donde:

dr: Deflexión medida a la distancia r (mm)

r : distancia del sensor r (mm)

HN: Humedad natural (%)

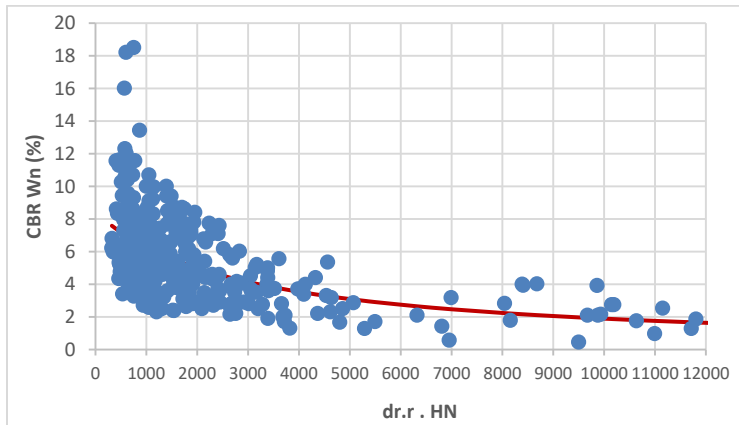


Figura 109 Modelo MLG, CBR Wn versus $dr \cdot r \cdot HN$

Modelo Potencial

$$CBR_{Wn} = 114.14 * (dr * r * HN)^{-0.433}$$

$$R^2 = 0.42, r = 0.65$$

Donde:

dr: Deflexión medida a la distancia r (mm)

r: distancia del sensor r (mm)

HN: Humedad natural (%)

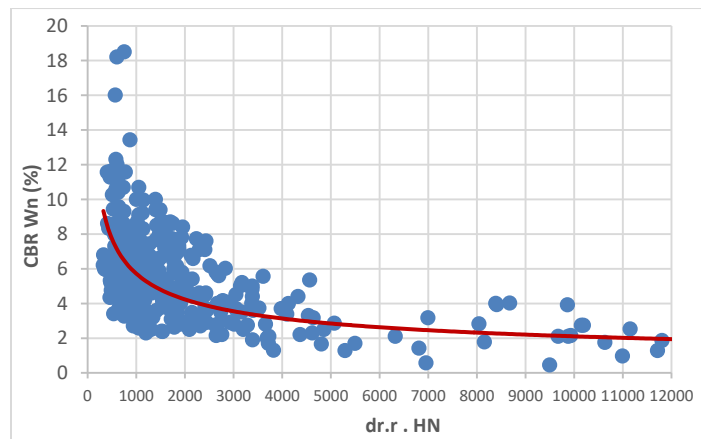


Figura 110 Modelo potencial, CBR Wn versus $dr \cdot r \cdot HN$

Al comparar los modelos de tipo potencial, entre CBR vs $dr \cdot r$ y CBR vs $dr \cdot r \cdot HN$ (vinculando la variable HN), se logra una mejor correlación evaluada a partir del coeficiente de determinación, pasando de un R^2 de 0.35 a un R^2 de 0.42.

5.7.2 Suelos: arenas, CBR muestra compactada en laboratorio, en inmersión

Modelo MLG

$$CBR_{LAB} = \frac{1}{0.0125 + 0.00051 * dr * r}$$

$$R^2 = 0.52, r = 0.72$$

Donde:

dr: Deflexión medida a la distancia r (mm)

r: distancia del sensor r (mm)

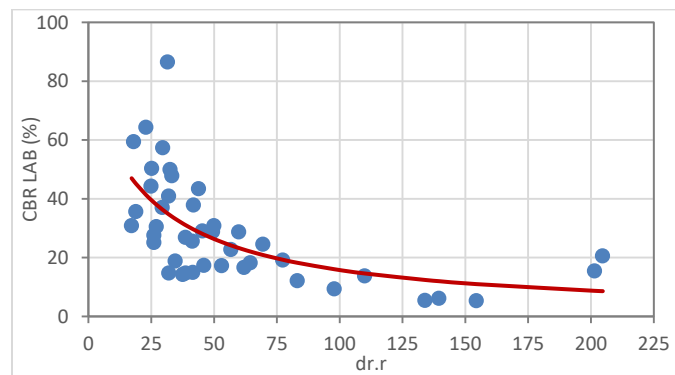


Figura 111 Modelo MLG, CBR Lab versus dr*r

Modelo Potencial

$$CBR_{LAB} = 401.09 * (dr * r)^{-0.733}$$

$$R^2 = 0.52, r = 0.72$$

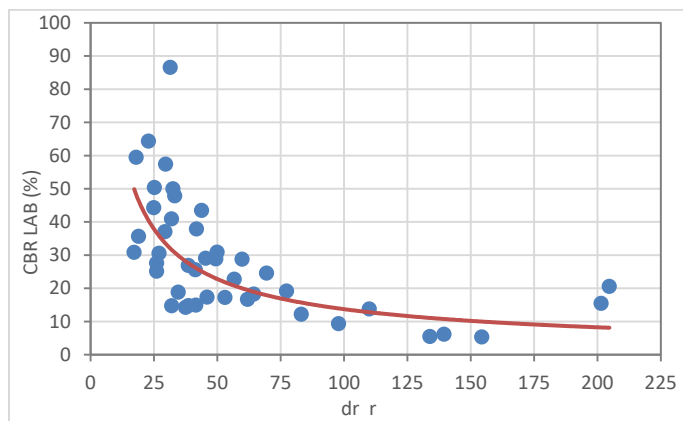


Figura 112 Modelo potencial, CBR Lab versus $dr \cdot r$

Para los suelos arenosos con CBR de muestras compactadas en laboratorio en inmersión, la mejor correlación se presenta para la relación entre el CBR vs $dr \cdot r$, con un R^2 de 0.52.

5.7.3 Suelos: gravas, CBR muestras compactadas en laboratorio, en inmersión

Modelo MLG

$$CBR_{LAB} = \frac{1}{0.0095 + 0.00016 * dr * r + 0.04562 \% finos}$$

$$R^2 = 0.27, r = 0.52$$

Donde:

dr: Deflexión medida a la distancia r (mm)

r: distancia del sensor r (mm)

%finos: Porcentaje de finos del suelo (mm)

Modelo Potencial

$$CBR_{LAB} = 67.962 * (dr * r * \% finos)^{-0.311}$$

$$R^2 = 0.27, r = 0.52$$

Donde:

dr: Deflexión medida a la distancia r (mm)

r: distancia del sensor r (mm)
%finos: Porcentaje de finos del suelo (mm)

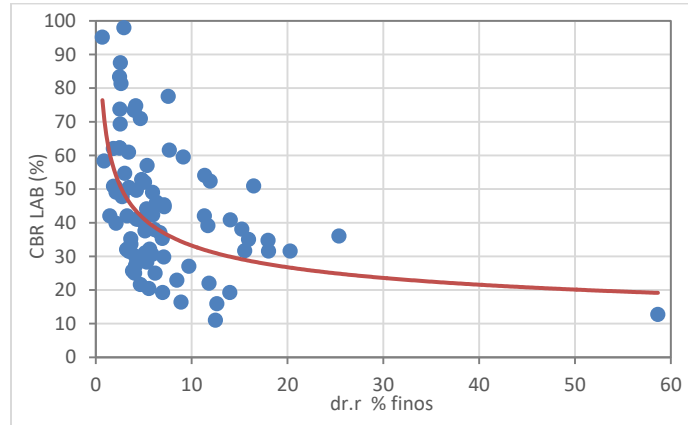


Figura 113 Modelo potencial, CBR Lab versus $dr \cdot r \cdot \% \text{ finos}$

En los suelos tipo grava, la mejor correlación entre CBR y la deflectometría se logra vinculando la variable % finos, pasando de un R^2 de 0.17 (CBR vs $dr \cdot r$) a un R^2 de 0.27 (CBR vs $dr \cdot r \cdot \% \text{ finos}$). Sin embargo, aún se obtiene una correlación pobre, debido a la gran dispersión que presenta los datos.

Conclusiones y Recomendaciones

El objetivo principal de esta investigación es determinar la correlación entre el CBR de la subrasante y deflexiones medidas con FWD en Colombia. Para tal fin, se contó con una base de datos de 501 puntos en donde se tiene información simultánea de deflectometría y CBR de muestras inalteradas y suelos compactados en laboratorio.

Para tal fin, se determinaron los módulos de la subrasante mediante las metodologías AASHTO 1993 y método directo (INVIAS, 2008), siendo las metodologías de diseño más común empleadas en Colombia para la evaluación de pavimentos flexibles existentes, empleando resultados de mediciones de deflexiones con deflectómetro de impacto.

En cuanto al análisis del CBR, se agruparon los resultados por tipo de suelo, clasificándolos en suelos finos (arcillas y limos) con CBR de muestra inalterada y humedad natural, suelos arenosos y suelos tipo grava, con CBR compactados en laboratorio al 95% de la densidad máxima, en inmersión.

Con la información disponible de los ensayos de laboratorio, se realizaron gráficas de dispersión entre el CBR y las propiedades relacionadas con la gradación y límites de consistencia, con la finalidad de poder realizar un análisis dimensional para los parámetros de mayor incidencia. Como resultado, se obtiene que la relación del CBR con los parámetros físicos como LL, LP, IP, % gravas, % arenas y % finos, no es tipo lineal, y presenta una gran dispersión en la nube de puntos analizados, lo que indica que, por si solos, no presentan una correlación significativa con el CBR y puede requerirse un análisis multivariantes o correlaciones múltiples para llegar a una buena correlación, tal como se menciona en Rivera Mena, 2013 y Araujo Navarro, 2014.

Existen varias correlaciones para estimar el CBR a partir de las deflexiones medidas a diferentes distancias del centro de aplicación de la carga. Aunque no es el objetivo central de la presente investigación, se analizó si las ecuaciones disponibles reproducen las tendencias de la base de datos empleada; es decir, a las condiciones de suelos típicos existentes a nivel de Colombia.

En muchas de ellas (Jameson (1993), Roberts et al (2006) y Queensland Department of Main Roads (QDMR, 1992)), se pudo observar que para los suelos tipo arena y grava, una de las tres ecuaciones presentadas tiene mejor correlación con la base de datos: para los suelos arenosos, la ecuación 1 (Jameson); para los suelos tipo grava, la ecuación 3 (QDMR). Para el caso de los suelos finos, ninguna de las ecuaciones se ajusta a la base de datos. Todas estas ecuaciones correlacionan entre el CBR con la deflexión a 900 mm del centro de aplicación de carga.

Las correlaciones directas obtenidas entre valores de deflexión y CBR son pobres según el coeficiente de determinación, R^2 , por tanto, se buscó mejorar las correlaciones (disminuir la dispersión) introduciendo otros parámetros del suelo en las mismas, analizadas partir del análisis ANOVA y correlaciones. Se encontró que la humedad natural y el porcentaje de finos, mejora los indicadores estadísticos de correlación; sin embargo, para efectos prácticos, la dispersión de datos no disminuyó significativamente.

Por consiguiente, se plantean los modelos determinados con los parámetros d_r y r establecidos por la metodología AASHTO-93, debido a que los modelos analizados con los parámetros del método directo (d_r y r_{50}), para las arenas y gravas, los resultados de análisis estadístico nos indican resultados deficientes, analizados a partir del R^2 y el análisis de dependencia de los residuos.

Es importante indicar, que el trabajo de investigación se ha desarrollado con una amplia base de datos, de muchos tipos de suelos y muchas condiciones. Por eso la dispersión de las correlaciones puede ser mayor que la reportada por otros autores.

A partir de los resultados del análisis de regresión potencial y lineal generalizado, a continuación se presentan las correlaciones obtenidas:

6.1 Suelo fino (arcillas y limos): CBR muestra inalterada, humedad natural:

Modelo lineal generalizado:

$$CBR_{Wn} = \frac{1}{0.1186 + 0.000041 * d_r * r * HN}$$

$$R^2 = 0.41, r = 0.64$$

Modelo potencial:

$$CBR_{Wn} = 114.14 * (dr * r * HN)^{-0.433}$$

$$R^2 = 0.42, r = 0.65$$

Donde:

dr: Deflexión medida a la distancia r (mm)

r: distancia del sensor r (mm)

HN: Humedad natural (%)

6.2 Suelo arenoso: CBR muestras compactadas en laboratorio, en inmersión:

Modelo lineal generalizado:

$$CBR_{LAB} = \frac{1}{0.0125 + 0.00051 * dr * r}$$

$$R^2 = 0.52, r = 0.72$$

Modelo potencial:

$$CBR_{HN} = 401.09 * (dr * r)^{-0.733}$$

$$R^2 = 0.52, r = 0.72$$

Donde:

dr: Deflexión medida a la distancia r (mm)

r: distancia del sensor r (mm)

6.3 Suelo tipo grava: CBR muestras compactadas en laboratorio, en inmersión:

Modelo lineal generalizado:

$$CBR_{LAB} = \frac{1}{0.0095 + 0.00016 * dr * r + 0.04562 \% \text{ finos}}$$

$$R^2 = 0.27, r = 0.52$$

Donde:

dr: Deflexión medida a la distancia r (mm)

r: distancia del sensor r (mm)
% finos: Porcentaje de finos del suelo (mm)

Los modelos más apropiados para estimar el CBR a partir de las medidas de deflexión, para los tres tipos de suelo, emplean la deflexión determinada a partir de la metodología AASHTO 1993, deflexión superficial del pavimento a una distancia “r” del centro de la placa de carga.

Es importante resaltar que el sensor que se utiliza para la escogencia de la deflexión que evalúa el comportamiento de la subrasante, y que se emplea en el cálculo del módulo en la metodología AASHTO, corresponde en un 42.1% al ubicado a 90 cm y en un 22.6% al ubicado a 120 cm, lo que permite indicar que las deflexiones medidas más allá de los efectos primarios del bulbo de esfuerzos son los que correlacionan con el módulo de la subrasante y el CBR.

Los resultados obtenidos de las correlaciones recomendadas en la presente investigación, pueden llegar a ser muy útil para el ingeniero de pavimentos, tanto en el diseño de pavimentos nuevos como en estudios de rehabilitación de pavimentos existentes; debido a que los análisis estadísticos muestran que hay una fuerte relación entre el CBR y los resultados de las evaluaciones deflectométricas (módulos, deflexiones), aunque, la dispersión obtenida es alta, la variabilidad obtenida está dentro de la variación reportada en otras correlaciones, como la de la Shell, Uzan, NCHRP y Heukelom.

Para el caso de pavimentos nuevos, se puede llegar hacer uso de equipos como el deflectómetro liviano (LWD), comúnmente usado en control de calidad en la etapa de construcción, el cual permite obtener la deflexión d_0 o en algunos casos, deflexiones medidas a sensores adicionales ubicadas a 30 cm y 60 cm del centro de aplicación de carga, que al ser medidas en la capa de fundación del pavimento, se toma como la deflexión que evalúa el comportamiento de la subrasante.

Se considera de gran importancia poder estudiar correlaciones de ensayos de módulos triaxiales con valores de CBR a condiciones típicas de los proyectos viales que se realizan

en Colombia, para diferentes tipos de suelos; así mismo, comprobar la validez de las fórmulas de correlación que tradicionalmente se emplean en los diseños de pavimento nuevo y estudios de rehabilitación de pavimentos existentes.

Finalmente, dada la dispersión de valores en las correlaciones obtenidas, es necesario fortalecer los trabajos de medición directa de los módulos resilientes de la subrasante, por deflectometría en pavimentos existentes y mediante ensayos de laboratorio en el caso de pavimentos nuevos. Así mismo, promover la investigación en el país de relaciones entre módulos resilientes de laboratorio y módulos resilientes de deflectometría.

Bibliografía

- AASHTO. (1993). *AASHTO Guide For Design of Pavemente Structures 1993*. Washington, D.C.
- Ali, N. A., & Khosla, N. P. (1987). Determination of layer moduli using a falling weight deflectometer. *Transportation Research Record*, 1117, 1–10.
- Austrroads 2004, *Pavement Design – A Guide to the Structural Design of Road Pavements*, Austrroads Incorporated, Sydney, New South Wales, Australia.
- Baladi, G., Dawson, T., & Sessions, C. (2009). *Pavement Subgrade MR Design Values for Michigan's Seasonal Changes*.
- Burnham, T., and Johnson, D. (1993). "In-situ characterization using the dynamic cone penetrometer." *Rep. MN-93/05*, Minnesota Dept. of Transportation, Maplewood, Minn.
- Bekele, A. (2017). *Correlation of CBR with Index Properties of Soils in Sululta Town*.
- Bush, A. J., & Alexander, D. R. (1985). Pavement evaluation using deflection basin measurements and layered theory. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1022, 16–29.
- Chai, G., and Roslie, N. (1998). "The structural response and behavior prediction of subgrade soils using falling weight deflectometer in pavement construction." *Proc., 3rd Int. Conf. on Road and Airfield Pavement Technology*, China.
- Chai, G. W., Argadiba, S., Stephenson, G., Condric, I., Oh, E. Y., & Manoharan, S. P. (2013). Prediction of subgrade CBR using FWD for thin bituminous pavements. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 6(4), 280–286. [https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2013.6\(4\).280](https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2013.6(4).280)
- Drumm, B. E. C., Pierce, T. J., & Members, A. (1990). Estimation of subgrade resilient modulus from standard tests. *Manager*, 116(5), 774–789.
- Duarte, S. L. (2016). *Modelos lineales generalizados: regresión de rango reducido y reducción suficiente de dimensiones*.
- Eka Putri, E., V Kameswara Rao, N. S., & Mannan, M. A. (2012). Evaluation of Modulus of Elasticity and Modulus of Subgrade Reaction of Soils Using CBR Test. *Journal of Civil Engineering Research*, 2(1), 34–40. <https://doi.org/10.5923/j.jce.20120201.05>
- FHWA. (2017). *Using Falling Weight Deflectometer Data with Mechanistic-Empirical Design and Analysis* (March 2017). NO. FHWA-HRT-16-010.
- Gopalakrishnan, K. (2009). Backcalculation of Non-Linear Pavement Moduli Using Finite-Element Based Neuro-Genetic Hybrid Optimization. *Open Civil Engineering Journal*, (515), 83–92. Retrieved from <http://mail.benthamscience.com/open/tociej/articles/V003/83TOCIEJ.pdf>
- Guzmán, E. A., & Higuera, C. H. (2016). Comparación entre el módulo resiliente de la subrasante determinado en laboratorio y el retrocalculado, factor de ajuste "C." *Ingenio Magno*, 7(1), 62–83.
- Guzmán Suarez, E. A. (2017). *Factores para el Ajuste de los Módulos de Retrocálculo de Pavimentos Flexibles Adjustment Factors for Backcalculated Modulus of Flexible*

Pavement. III, 73–89.

- Hassan, A. (1996). "The effect of material parameters on dynamic cone penetrometer results for fine-grained soils and granular materials." PhD dissertation, Oklahoma State Univ., Stillwater, Okla.
- Heukelom, W., & Klomp, A. J. G. (1962). *Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements During and After Construction.*
- Horak, E. (2007). *Surface Moduli Determined with the Falling Weight Deflectometer Used as benchmarking Tool.* (July).
- Houston, W. N., Mamlouk, M. S., & Perera, R. W. S. (1992). Laboratory versus Nondestructive Testing for Pavement Design. *Journal of Transportation Engineering*, 118(2), 207–222. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-947x\(1992\)118:2\(207\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-947x(1992)118:2(207))
- IMT. (2001). Módulos de Resiliencia en Suelos Finos y Materiales Granulares. *Publicación Técnica N. 142*, (142), 58.
- INVIAS. (1998). *Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en Vías con Medios y Altos Volúmenes de Tránsito.*
- INVIAS. (2008). Guía Metodológica para el Diseño de Obras de Rehabilitación de Pavimentos Asfálticos de Carreteras. In *Segunda Edición.*
- INVIAS. (2013). *Normas de ensayo para materiales de carreteras. Sección 100.* 798. Retrieved from <http://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos-izq/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>
- Jones, G., 1997. Analysis of beams an elastic foundation. Thomas Telford, United Kingdom.
- J. Roberts, N. Michel & D. Paine, STEP: A New Estimation of Flexible Pavement Configuration & Remaining Structural Life, Road and Transport Research Vol. 15 No. 4, 2006.
- Leal Noriega, M. H. (2010). Relación entre el módulo resiliente hallado por retrocalculo y el encontrado en ensayos de laboratorio. *Universidad Nacional De Colombia*, 131.
- Limaymanta, F., & Gutiérrez, W. (2003). *Ensayo de módulo de resiliencia.*
- Lopez Gonzalez, E., & Ruiz Soler, M. (2011). *Análisis de datos con el Modelo Lineal Generalizado . Una aplicación con R.* 59–80.
- Maher, A., Bennert, T., Gucunski, N., & Papp, W. (2000). *Resilient Modulus Properties of New Jersey Subgrade Soils.* (September).
- Mamlouk, M. S., Houston, W. N., Houston, S. L., & Zaniewski, J. P. (1988). *AZ254 Rational characterization of pavement structures using deflection analysis Mamel.pdf.*
- Michelow, J. (1963). *Analysis of Stresses and Displacements in N-layered Elastic System Under a Load Uniformly Distributed on a Circular Area.*
- Montgomery, D., Peck, E., & Vining, G. (2002). *Introducción al Análisis de Regresión Lineal (Tercera).*
- Nazarian, S., and Feliberti, M. "Methodology for Resilient Modulus Testing of Cohesionless Subgrades," Transportation Research Record 1406, TRB, National Research Council,

- Washington D.C., 1993, pp. 108-115
- NCHRP. (2001). *Guide for Mechanistic-Empirical Design Correlation of CBR Values with Soil Index*. (March).
- NCHRP. (2004). *Guide For Mechanistic - Empirical Design of New And Rehabilitated Pavement Structures* (March 2004). Illinois: ARA, Inc., ERES Consultants Division 505 Wes University Avenue Champaign, Illinois 61820.
- NCHRP. (2014). *Guide For Mechanistic - Empirical Design of New And Rehabilitated Pavement Structures*. In *National Cooperative Highway Research Program Transportation Research Board National Research Council* (March 2014, Vol. 91, pp. 1–85). Illinois: ARA, Inc., ERES Consultants Division 505 Wes University Avenue Champaign, Illinois 61820.
- Newcomb, D. E. (1987). "Comparison of field and laboratory estimated resilient moduli of pavement materials." *Asphalt Paving Technol.*, 56, 91–106.
- Oh, J. H., Fernando, E. G., Holzschuher, C., & Horhota, D. (2011). *International Journal of Pavement Engineering Comparison of resilient modulus values for Florida flexible mechanistic-empirical pavement design*. (May 2015), 37–41. <https://doi.org/10.1080/10298436.2011.633170>
- Pérez, N., Garnica, P., & Mestas, N. (2016). *El Módulo de Resiliencia: Cómo fluctúa después de la construcción del pavimento y cómo estimar estas fluctuaciones*. (478).
- Petersen, M., Wahr, C., Palma, G., Castro, L., & Albornoz, J. (n.d.). *Relación entre módulo resiliente determinado mediante deflectómetro de impacto y el de laboratorio*.
- Pezo, R.F., Kim, D.S., Stokoe II, K.H., and Hudson, W.R. "A Reliable Resilient Modulus Testing System" *Transportation Research Record* 1307, TRB, National Research Council, Washington D.C., 1991, pp. 90 - 98.
- Powell, W.D., Potter, J.F., Mayhew, H.C., and Nunn, M.E. 1984. The structural design of bituminous roads. TRRL Re-port LR 1132,62pp.
- Rahim, A., & George, K. P. (2003). Falling Weight Deflectometer for Estimating Subgrade Elastic Moduli. *Journal of Transportation Engineering*, 129(1), 100–108. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2003\)129:1\(100\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2003)129:1(100))
- Rondón, H., & Reyes, F. (2007). Metodologías De Diseño De Pavimentos Flexibles : Tendencias , Alcances Y Limitaciones Design Methodologies of Flexible Pavements : Tendencias , Reaches and Limitations. *Design*, 17, 41–65.
- SHELL International Petroleum Company. (1978). *SHELL pavement design manual* (1978th ed.). London.
- THE ASPHALT INSTITUTE. (1991). In *Thickness design. Asphalt pavements for highways and streets*. Lexington, KY.
- Rowntree, D. (1984). *Introducción a la estadística: un enfoque matemático* (1ra Edición). Bogotá.
- Uzan, J. (1985). *Characterization of Granular Material*. 52–59.
- WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. (1995). In *WSDOT pavement guide. Volume 2. Pavement notes for design, evaluation and rehabilitation*

ANEXO 1. BASE DE DATOS, DEFLECTOMETRÍA Y GEOTECNIA

| DEFLECTOMETRÍA | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | GEOTECNIA | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|---------------------------------------|-------------|------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|---------------------------------------|-------|-------|---------------|--------|--------|----|-------------------------|-----------|--------|-----------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------|---------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-------|--|----|----|
| Punto | Deflexiones: Datos Obtenidos en Campo | | | | | | | | | | | Deflexiones Corregidas por Carga (µm) | | | | | | | Espesores de Estructura | | | | Profundidad exploración (m) | Clasificación Suelo subrasante | | Humedad Natural (%) | Límites de Atterberg (%) | | | Granulometría (%) | | | CBR, Muestra inalterada | | CBR, muestra compactada en laboratorio | | |
| | Carga | Temperatura | | Deflexiones Medidas (µm) | | | | | | | | Capa Asfáltica | MG-1 | MG-2 | Espesor Total | AASTHO | USCS | LL | LP | IP | Gravas | Arenas | | Finos | Humedad natural | | Inmersión | | | | | | | | | | |
| | | Pav. | Aire | d ₀ | d ₁ | d ₂ | d ₃ | d ₄ | d ₅ | d ₆ | d _{0c} | | | | | | | | | | | | | | | | | d _{1c} | d _{2c} | d _{3c} | d _{4c} | d _{5c} | d _{6c} | cm | | cm | cm |
| # | kN | °C | °C | 0 cm | 30 cm | 60 cm | 90 cm | 120 cm | 150 cm | 180 cm | 0 cm | 30 cm | 60 cm | 90 cm | 120 cm | 150 cm | 180 cm | cm | cm | cm | cm | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 39 | 25 | 25 | 785 | 467 | 182 | 85 | 55 | 43 | 37 | 797 | 474 | 185 | 86 | 56 | 44 | 38 | 15 | 35 | | 50 | 0.6 | A-2-7 | SP | 4.8 | 23.7 | 14.9 | 8.8 | 42.10 | 54.20 | 3.70 | 7.50 | | | | | |
| 2 | 40 | 25 | 25 | 530 | 260 | 56 | 22 | 14 | 10 | 8 | 531 | 261 | 56 | 22 | 14 | 10 | 8 | 18 | 20 | | 38 | 0.6 | A-4 | ML | 16.6 | 33.0 | 27.7 | 5.3 | 9.50 | 38.30 | 52.20 | 7.30 | | | | | |
| 3 | 39 | 27 | 27 | 605 | 411 | 155 | 84 | 49 | 32 | 22 | 621 | 422 | 159 | 86 | 50 | 33 | 23 | 14 | 22 | | 36 | 0.4 | | GC | 5.9 | 24.9 | 14.9 | 10.0 | 38.80 | 34.60 | 26.60 | | | | 36.00 | | |
| 4 | 41 | 26 | 21 | 319 | 208 | 123 | 71 | 47 | 37 | 26 | 308 | 201 | 119 | 69 | 45 | 36 | 25 | 15 | 63 | | 78 | 0.78-1.53 | A-7-6 | CH | 24.0 | 55.0 | 29.0 | 26.0 | 3.24 | 27.68 | 69.08 | 6.60 | 5.00 | | | | |
| 5 | 41 | 26 | 20 | 343 | 257 | 193 | 147 | 118 | 101 | 81 | 338 | 253 | 190 | 145 | 116 | 100 | 80 | 20 | 45 | | 66 | 1.00-1.50 | A-3 | SW-SP | 12.0 | NP | NP | NP | 0.94 | 87.27 | 11.79 | | | | 6.10 | | |
| 6 | 41 | 14 | 14 | 303 | 247 | 201 | 154 | 116 | 92 | 72 | 294 | 240 | 195 | 150 | 113 | 89 | 70 | 28 | 69 | | 97 | 0.98-1.50 | A-3 | SW-SP | 12.0 | NP | NP | NP | 15.50 | 61.38 | 23.12 | | | | 5.40 | | |
| 7 | 41 | 16 | 15 | 286 | 238 | 200 | 157 | 127 | 105 | 84 | 280 | 233 | 196 | 154 | 125 | 103 | 82 | 29 | 65 | | 94 | 0.95-1.50 | A-2-7 | SC-SM | 22.0 | 42.0 | 27.0 | 15.0 | 10.17 | 56.63 | 33.20 | | | | 5.30 | | |
| 8 | 41 | 25 | 20 | 282 | 222 | 172 | 122 | 83 | 60 | 45 | 277 | 218 | 169 | 120 | 82 | 59 | 44 | 23 | 50 | | 73 | 0.73-1.50 | A-2-7 | SC-SM | 4.0 | 27.0 | 8.0 | 19.0 | 49.66 | 30.88 | 19.46 | | | | 9.30 | | |
| 9 | 41 | 21 | 21 | 147 | 107 | 77 | 49 | 32 | 21 | 13 | 144 | 105 | 75 | 48 | 31 | 21 | 13 | 23 | 50 | | 73 | 0.79-1.50 | A-2-7 | SC-SM | 5.0 | 33.0 | 21.0 | 12.0 | 35.87 | 35.57 | 28.56 | | | | 14.20 | | |
| 10 | 39 | 32 | 31 | 184 | 120 | 79 | 52 | 34 | 26 | 19 | 187 | 122 | 80 | 53 | 35 | 26 | 15 | 19 | 25 | | 115 | 0.5-0.70 | A-1-b | GM | 4.3 | 20.0 | 17.0 | 3.0 | 46.70 | 30.30 | 23.00 | | | | 59.50 | | |
| 11 | 40 | 29 | 29 | 253 | 124 | 60 | 30 | 18 | 13 | 11 | 255 | 125 | 60 | 30 | 18 | 13 | 11 | 25 | 90 | | 115 | 0.5-0.8 | A-2-4 | GM-GC | 3.8 | 20.0 | 16.0 | 4.0 | 44.60 | 28.10 | 27.30 | | | | 42.30 | | |
| 12 | 40 | 27 | 27 | 136 | 59 | 34 | 21 | 15 | 12 | 10 | 137 | 60 | 34 | 21 | 15 | 12 | 10 | 12 | 85 | | 97 | 0.30-0.97 | A-1-a | GP-GM | 3.0 | 19.0 | 14.0 | 5.0 | 57.00 | 32.30 | 10.70 | | | | 50.70 | | |
| 13 | 40 | 27 | 26 | 161 | 73 | 41 | 23 | 16 | 12 | 8 | 162 | 73 | 41 | 23 | 16 | 12 | 8 | 20 | 70 | | 90 | 0.50-0.90 | A-1-a | GC | 5.0 | 21.0 | 15.0 | 6.0 | 46.90 | 40.80 | 12.30 | | | | 69.30 | | |
| 14 | 40 | 27 | 27 | 163 | 92 | 55 | 29 | 15 | 13 | 11 | 164 | 92 | 55 | 29 | 15 | 13 | 11 | 17 | 56 | | 73 | 0.39-0.73 | A-1-a | GP-GM | 3.2 | 21.0 | 17.0 | 4.0 | 56.80 | 35.10 | 8.10 | | | | 39.80 | | |
| 15 | 40 | 27 | 26 | 192 | 93 | 50 | 30 | 19 | 16 | 13 | 192 | 93 | 50 | 30 | 19 | 16 | 13 | 15 | 88 | | 103 | 0.45-1.03 | A-1-a | NP | NP | NP | NP | 63.60 | 28.30 | 8.10 | | | | 50.80 | | | |
| 16 | 40 | 26 | 27 | 129 | 73 | 49 | 31 | 19 | 12 | 8 | 130 | 73 | 49 | 31 | 19 | 12 | 8 | 14 | 90 | | 104 | 0.24-1.04 | A-1-b | SP-SM | 2.0 | NP | NP | NP | 34.80 | 56.70 | 8.50 | | | | 64.30 | | |
| 17 | 41 | 27 | 26 | 238 | 145 | 90 | 56 | 38 | 27 | 20 | 235 | 143 | 89 | 55 | 38 | 27 | 20 | 16 | 91 | | 107 | 0.36-0.90 | A-1-a | GC-GM | 3.6 | 20.0 | 16.0 | 4.0 | 57.80 | 29.90 | 12.30 | | | | 20.40 | | |
| 18 | 40 | 29 | 25 | 254 | 105 | 52 | 30 | 22 | 19 | 16 | 254 | 105 | 52 | 30 | 22 | 19 | 16 | 16 | 54 | | 70 | 0.70-0.93 | A-1-a | GC-GM | 17.0 | 18.0 | 14.0 | 4.0 | 45.00 | 42.30 | 12.70 | | | | 60.90 | | |
| 19 | 40 | 29 | 25 | 277 | 134 | 68 | 44 | 35 | 31 | 27 | 278 | 135 | 68 | 44 | 35 | 31 | 27 | 23 | 130 | | 153 | 0.93-1.53 | A-3 | GW-GC | 4.0 | NP | NP | NP | 50.50 | 41.30 | 8.20 | | | | 73.40 | | |
| 20 | 40 | 31 | 29 | 362 | 146 | 51 | 24 | 15 | 13 | 12 | 365 | 147 | 51 | 24 | 15 | 13 | 12 | 18 | 90 | | 108 | 0.41-0.66 | A-1-a | GM | 5.0 | NP | NP | NP | 47.00 | 38.20 | 14.80 | | | | 32.00 | | |
| 21 | 40 | 27 | 26 | 148 | 56 | 28 | 19 | 15 | 13 | 11 | 148 | 56 | 28 | 19 | 15 | 13 | 11 | 18 | 120 | | 138 | 0.68-1.38 | A-3 | SC-SM | 4.0 | NP | NP | NP | 18.60 | 64.40 | 17.00 | | | | 59.40 | | |
| 22 | 40 | 30 | 25 | 225 | 112 | 62 | 36 | 24 | 19 | 17 | 227 | 113 | 62 | 36 | 24 | 19 | 17 | 19 | 45 | | 64 | 0.64-0.80 | A-1-a | GP | 4.0 | NP | NP | NP | 50.80 | 47.10 | 2.10 | | | | 95.10 | | |
| 23 | 40 | 30 | 25 | 232 | 123 | 63 | 34 | 23 | 19 | 16 | 231 | 123 | 63 | 34 | 23 | 19 | 16 | 11 | 100 | | 111 | 0.71-1.11 | A-1-a | GP-GM | 3.0 | NP | NP | NP | 59.50 | 33.80 | 6.70 | | | | 62.00 | | |
| 24 | 40 | 30 | 26 | 248 | 132 | 64 | 35 | 24 | 20 | 16 | 248 | 132 | 64 | 35 | 24 | 20 | 16 | 18 | 41 | | 59 | 0.59-0.89 | A-2-4 | SC | 4.0 | 21.0 | 14.0 | 7.0 | 40.70 | 45.90 | 13.40 | | | | 86.50 | | |
| 25 | 40 | 24 | 26 | 195 | 103 | 56 | 32 | 21 | 19 | 14 | 195 | 103 | 56 | 32 | 21 | 19 | 14 | 18 | 102 | | 120 | 0.80-1.20 | A-3 | SP-SM | 4.0 | NP | NP | NP | 40.60 | 42.70 | 16.70 | | | | 50.30 | | |
| 26 | 40 | 25 | 27 | 265 | 142 | 79 | 53 | 39 | 35 | 28 | 267 | 143 | 80 | 53 | 39 | 35 | 28 | 12 | 56 | | 68 | 0.68-0.88 | A-2-4 | GC | 5.0 | 20.0 | 12.0 | 8.0 | 53.80 | 34.50 | 11.70 | | | | 32.10 | | |
| 27 | 40 | 25 | 27 | 190 | 79 | 37 | 21 | 14 | 12 | 10 | 190 | 79 | 37 | 21 | 14 | 12 | 10 | 19 | 62 | | 81 | 0.81-1.11 | A-3 | SP-SM | 5.0 | NP | NP | NP | 38.20 | 36.30 | 25.50 | | | | 35.60 | | |
| 28 | 40 | 26 | 26 | 234 | 106 | 56 | 31 | 22 | 17 | 13 | 236 | 107 | 57 | 31 | 22 | 17 | 13 | 18 | 49 | | 67 | 0.67-0.92 | A-1-a | GP | 4.0 | NP | NP | NP | 56.40 | 40.50 | 3.10 | | | | 58.30 | | |
| 29 | 40 | 27 | 26 | 196 | 97 | 50 | 30 | 22 | 19 | 16 | 196 | 97 | 50 | 30 | 22 | 19 | 16 | 17 | 57 | | 74 | 0.74-0.94 | A-1-a | GP-GM | | NP | NP | NP | 54.20 | 36.30 | 9.50 | | | | 87.50 | | |
| 30 | 40 | 27 | 27 | 247 | 131 | 77 | 51 | 38 | 31 | 27 | 248 | 131 | 77 | 51 | 38 | 31 | 27 | 18 | 64 | | 82 | 0.82-1.05 | A-3 | SP-SM | 5.0 | NP | NP | NP | 37.30 | 34.30 | 28.40 | | | | 17.30 | | |
| 31 | 40 | 24 | 26 | 185 | 86 | 43 | 24 | 18 | 15 | 13 | 184 | 86 | 43 | 24 | 18 | 15 | 13 | 17 | 50 | | 67 | 0.67-0.97 | A-1-a | GC-GM | 3.0 | 19.0 | 14.0 | 5.0 | 55.60 | 32.10 | 12.30 | | | | 81.30 | | |
| 32 | 40 | 25 | 26 | 177 | 100 | 50 | 27 | 18 | 15 | 12 | 177 | 100 | 50 | 27 | 18 | 15 | 12 | 14 | 70 | | 84 | 0.14-0.84 | A-1-b | GC-GM | 4.0 | 19.0 | 13.0 | 6.0 | 51.10 | 31.70 | 17.20 | | | | 74.70 | | |
| 33 | 40 | 25 | 26 | 299 | 144 | 53 | 21 | 12 | 9 | 6 | 296 | 143 | 52 | 21 | 12 | 9 | 6 | 13 | 78 | | 91 | 0.13-0.91 | A-1-a | GC-GM | 4.0 | 18.0 | 13.0 | 5.0 | 53.60 | 33.10 | 13.30 | | | | 83.30 | | |
| 34 | 41 | 23 | 26 | 171 | 97 | 48 | 27 | 18 | 14 | 11 | 168 | 95 | 47 | 27 | 18 | 14 | 11 | 17 | 48 | | 65 | 0.65-0.95 | A-2-4 | GC | 5.8 | 18.0 | 14.0 | 4.0 | 50.00 | 37.70 | 12.30 | | | | 97.90 | | |
| 35 | 41 | 28 | 24 | 326 | 209 | 126 | 79 | 53 | 41 | 34 | 321 | 206 | 124 | 78 | 52 | 40 | 33 | 13 | 59 | | 71 | 0.90-1.50 | A-7-5 | CL | 22.0 | 47.0 | 17.0 | 30.0 | 6.00 | 39.15 | 54.85 | 4.20 | 2.70 | | | | |
| 36 | 40 | 25 | 23 | 168 | 112 | 79 | 60 | 46 | 39 | 32 | 166 | 111 | 78 | 59 | 46 | 39 | 32 | 12 | 52 | | 64 | 1.10-1.50 | A-7-5 | SC | 16.0 | 41.0 | 20.0 | 21.0 | 15.00 | 46.20 | 38.80 | 6.90 | 3.90 | | | | |
| 37 | 40 | 24 | 23 | 188 | 133 | 107 | 83 | 68 | 58 | 48 | 188 | 133 | 107 | 83 | 68 | 58 | 48 | 12 | 49 | | 61 | 0.80-1.50 | A-7-5 | CL | 23.0 | 44.0 | 17.0 | 27.0 | 3.00 | 34.43 | 62.57 | 5.80 | 3.50 | | | | |
| 38 | 40 | 22 | 23 | 247 | 178 | 131 | 95 | 68 | 54 | 46 | 246 | 178 | 131 | 95 | 68 | 54 | 46 | 25 | 41 | | 66 | 1.10-1.50 | A-7-5 | CL | 25.0 | 48.0 | 21.0 | 27.0 | 0.00 | 26.42 | 73.58 | 5.10 | 3.30 | | | | |
| 39 | 41 | 25 | 23 | 250 | 146 | 70 | 29 | 10 | 7 | 4 | 247 | 144 | 69 | 29 | 10 | 7 | 4 | 29 | 41 | | 70 | 1.10-1.50 | A-2-4 | SC-SM | 10.0 | 24.0 | 17.0 | 7.0 | 30.00 | 54.09 | 15.91 | 10.60 | 5.50 | | | | |
| 40 | 40 | 25 | 23 | 290 | 197 | 117 | 65 | 37 | 24 | 19 | 287 | 195 | 116 | 64 | 37 | 24 | 19 | 25 | 45 | | 70 | 1.10-1.50 | A-1-b | SC-SM | 9.0 | 22.0 | 16.0 | 6.0 | 39.00 | 47.14 | 13.86 | 11.70 | 6.40 | | | | |
| 41 | 40 | 20 | 18 | 295 | 182 | 125 | 93 | 72 | 63 | 55 | 292 | 180 | 124 | 92 | 71 | 62 | 54 | 19 | 68 | | 88 | 1.00-1.50 | A-7-6 | SC | 27.4 | 73.0 | 31.1 | 41.9 | 14.67 | 37.13 | 48.20 | 6.50 | 3.77 | | | | |
| 42 | 40 | 21 | 19 | 251 | 144 | 84 | 50 | 37 | 31 | 28 | 252 | 144 | 84 | 50 | 37 | 31 | 28 | 22 | 61 | | 82 | 0.80-1.50 | A-7-6 | MH | 38.7 | | | | | | | | | | | | |

| DEFLECTOMETRÍA | | | | | | | | | | | | | | | | | | GEOTECNIA | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|---------------------------------------|-------------|------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|---------------------------------------|-------|-------|---------------|--------|--------|-----------|-------------------------|----|--------|-----------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------|---------------------|--------------------------|-----------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-----------------|--|--|
| Punto | Deflexiones: Datos Obtenidos en Campo | | | | | | | | | | | Deflexiones Corregidas por Carga (µm) | | | | | | | Espesores de Estructura | | | | Profundidad exploración (m) | Clasificación Suelo subrasante | | Humedad Natural (%) | Límites de Atterberg (%) | | | Granulometría (%) | | | CBR, Muestra inalterada | | CBR, muestra compactada en laboratorio | |
| | Carga | Temperatura | | Deflexiones Medidas (µm) | | | | | | | | Capa Asfáltica | MG-1 | MG-2 | Espesor Total | AASTHO | USCS | LL | LP | IP | Gravas | Arenas | | Finos | Humedad natural | | Inmersión | Inmersión | | | | | | | | |
| | | Pav. | Aire | d ₀ | d ₁ | d ₂ | d ₃ | d ₄ | d ₅ | d ₆ | d _{0c} | | | | | | | | | | | | | | | | | | d _{1c} | d _{2c} | d _{3c} | d _{4c} | d _{5c} | d _{6c} | | |
| # | kN | °C | °C | 0 cm | 30 cm | 60 cm | 90 cm | 120 cm | 150 cm | 180 cm | 0 cm | 30 cm | 60 cm | 90 cm | 120 cm | 150 cm | 180 cm | cm | cm | cm | cm | | | | | | | | | | | | | | | |
| 80 | 41 | 19 | 19 | 418 | 322 | 245 | 174 | 138 | 94 | 84 | 408 | 314 | 239 | 170 | 135 | 92 | 82 | 16 | 53 | | 69 | 0.67-1.20 | A-7-5 | CH-MH | 50.5 | 64.0 | 40.4 | 23.6 | 2.20 | 10.80 | 87.00 | 1.78 | 1.21 | | | |
| 81 | 42 | 12 | 14 | 387 | 320 | 243 | 176 | 135 | 107 | 90 | 373 | 308 | 234 | 170 | 130 | 103 | 87 | 17 | 47 | | 64 | 0.64-1.50 | A-7-5 | CH-MH | 65.0 | 68.0 | 38.0 | 30.0 | 2.00 | 30.00 | 68.00 | 2.74 | 2.15 | | | |
| 82 | 42 | 12 | 14 | 366 | 317 | 248 | 195 | 148 | 119 | 98 | 353 | 306 | 239 | 188 | 143 | 115 | 94 | 16 | 54 | | 70 | 0.70-1.50 | A-7-5 | CH-MH | 47.0 | 85.0 | 54.0 | 31.0 | 1.30 | 38.70 | 60.00 | 2.82 | 1.37 | | | |
| 83 | 40 | 14 | 13 | 1042 | 663 | 367 | 245 | 185 | 137 | 113 | 1032 | 656 | 363 | 243 | 183 | 136 | 112 | 18 | 49 | 67 | 134 | 0.67-1.40 | A-7-6 | CH | 50.1 | 53.0 | 28.3 | 24.7 | 0.90 | 14.90 | 84.20 | 2.74 | 2.13 | | | |
| 84 | 39 | 14 | 13 | 2776 | 1805 | 730 | 382 | 260 | 185 | 145 | 2833 | 1842 | 745 | 390 | 265 | 189 | 148 | 14 | 56 | 70 | 140 | 0.90-1.30 | A-7-5 | CH-MH | 48.4 | 58.0 | 30.6 | 27.4 | 0.00 | 18.90 | 81.10 | 0.38 | 0.28 | | | |
| 85 | 41 | 14 | 14 | 563 | 451 | 310 | 211 | 154 | 116 | 95 | 553 | 443 | 305 | 207 | 151 | 114 | 93 | 13 | 47 | 60 | 120 | 0.60-1.30 | A-6 | CL | 64.3 | 35.0 | 17.0 | 18.0 | 2.00 | 26.90 | 71.10 | 0.97 | 0.49 | | | |
| 86 | 41 | 14 | 14 | 858 | 627 | 397 | 257 | 184 | 143 | 116 | 841 | 615 | 389 | 252 | 180 | 140 | 114 | 10 | 60 | 70 | 140 | 0.70-1.50 | A-1-b | SM | 3.7 | NP | NP | NP | 33.90 | 41.80 | 24.30 | | | 20.50 | | |
| 87 | 40 | 14 | 14 | 796 | 628 | 420 | 271 | 183 | 133 | 112 | 788 | 622 | 416 | 268 | 181 | 132 | 111 | 20 | 30 | 50 | 100 | 0.50-1.30 | A-7-5 | CH-MH | 54.3 | 81.0 | 46.3 | 34.7 | 1.50 | 12.20 | 86.30 | 1.86 | 1.29 | | | |
| 88 | 41 | 14 | 14 | 555 | 466 | 353 | 252 | 184 | 134 | 107 | 540 | 454 | 344 | 245 | 179 | 130 | 104 | 12 | 48 | 60 | 120 | 0.60-1.30 | A-7-5 | CH-MH | 53.0 | 60.0 | 48.0 | 12.0 | 0.80 | 31.10 | 68.10 | 2.15 | 1.14 | | | |
| 89 | 41 | 14 | 14 | 674 | 499 | 337 | 222 | 158 | 117 | 100 | 661 | 489 | 330 | 218 | 155 | 115 | 98 | 16 | 24 | 40 | 80 | 0.40-1.20 | A-7-5 | CH-MH | 60.0 | 64.0 | 34.0 | 30.0 | 7.50 | 38.10 | 54.40 | 2.53 | 1.70 | | | |
| 90 | 40 | 14 | 13 | 1165 | 889 | 572 | 358 | 223 | 157 | 126 | 1171 | 893 | 575 | 360 | 224 | 158 | 127 | 15 | 55 | 70 | 140 | 0.70-1.50 | A-4 | ML | 56.9 | | | | 5.40 | 27.10 | 67.50 | 1.51 | 0.47 | | | |
| 91 | 41 | 14 | 14 | 406 | 384 | 267 | 187 | 123 | 94 | 77 | 394 | 373 | 259 | 182 | 124 | 91 | 75 | 13 | 57 | 70 | 140 | 0.70-1.50 | A-7-5 | CH-MH | 47.0 | 55.0 | 32.0 | 23.0 | 1.60 | 9.30 | 89.10 | 2.10 | 0.55 | | | |
| 92 | 40 | 14 | 14 | 1205 | 783 | 473 | 296 | 202 | 147 | 125 | 1208 | 785 | 474 | 297 | 203 | 147 | 125 | 12 | 58 | 70 | 140 | 1.10-1.50 | A-6 | CL | 53.0 | 32.0 | 17.0 | 15.0 | 2.50 | 9.60 | 87.90 | 1.28 | 0.63 | | | |
| 93 | 40 | 12 | 14 | 1537 | 962 | 512 | 291 | 185 | 134 | 111 | 1541 | 964 | 513 | 292 | 185 | 134 | 111 | 11 | 59 | 70 | 140 | 0.70-1.50 | A-2-4 | SC-SM | 11.0 | 23.0 | 17.0 | 6.0 | 18.90 | 34.40 | 46.70 | | | 15.40 | | |
| 94 | 40 | 12 | 14 | 1643 | 1008 | 492 | 275 | 175 | 132 | 107 | 1664 | 1021 | 498 | 278 | 177 | 134 | 108 | 11 | 29 | 40 | 80 | 0.40-1.40 | A-2-6 | GC | 11.0 | 33.0 | 21.0 | 12.0 | 47.00 | 29.60 | 23.40 | | | 12.70 | | |
| 95 | 42 | 16 | 17 | 304 | 256 | 187 | 138 | 96 | 77 | 64 | 290 | 244 | 178 | 131 | 91 | 73 | 61 | 8 | 90 | | 98 | 0.98-1.50 | A-2-4 | SC-SM | 9.0 | 23.0 | 17.0 | 6.0 | 23.80 | 31.80 | 44.40 | | | 13.70 | | |
| 96 | 40 | 20 | 21 | 1153 | 598 | 284 | 170 | 118 | 99 | 79 | 1147 | 598 | 283 | 169 | 117 | 99 | 79 | 10 | 45 | 55 | 99 | 0.94-1.8 | A-7-6 | CH | 20.0 | 60.0 | 29.0 | 31.0 | 2.70 | 30.10 | 67.20 | 1.90 | 0.88 | | | |
| 97 | 40 | 20 | 19 | 553 | 335 | 267 | 207 | 106 | 88 | 73 | 550 | 333 | 266 | 206 | 105 | 88 | 73 | 12 | 46 | | 58 | 0.60-1.00 | A-7-5 | ML | 19.0 | 49.0 | 32.0 | 17.0 | 10.10 | 27.40 | 62.50 | 3.73 | | | | |
| 98 | 43 | 17 | 15 | 495 | 385 | 236 | 145 | 94 | 69 | 57 | 463 | 360 | 221 | 136 | 88 | 64 | 53 | 19 | 51 | | 70 | 0.70-1.50 | A-7-5 | CH | 30.0 | 50.0 | 21.0 | 29.0 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 2.80 | 2.30 | | | |
| 99 | 42 | 18 | 15 | 975 | 660 | 338 | 163 | 85 | 53 | 43 | 926 | 627 | 321 | 155 | 81 | 50 | 41 | 19 | 43 | | 62 | 0.62-1.50 | A-6 | ML-OL | 22.0 | 35.0 | 17.0 | 18.0 | 0.00 | 1.23 | 98.77 | 3.60 | 1.30 | | | |
| 100 | 39 | 23 | 20 | 463 | 351 | 245 | 153 | 97 | 66 | 49 | 477 | 362 | 253 | 158 | 100 | 68 | 51 | 11 | 39 | | 50 | 0.50-1.50 | A-2-4 | SM | 10.4 | NP | NP | NP | 0.00 | 78.68 | 21.32 | 3.80 | 3.60 | | | |
| 101 | 42 | 20 | 19 | 652 | 510 | 263 | 154 | 110 | 85 | 72 | 628 | 492 | 253 | 148 | 106 | 82 | 69 | 14 | 46 | | 58 | 0.46-1.50 | A-6 | CL | 18.0 | 28.0 | 15.0 | 13.0 | 0.00 | 12.94 | 87.06 | 3.50 | 2.60 | | | |
| 102 | 39 | 19 | 18 | 757 | 483 | 240 | 127 | 82 | 60 | 51 | 769 | 490 | 244 | 129 | 83 | 61 | 52 | 9 | 51 | | 60 | 0.60-1.50 | A-7-6 | CL | 23.0 | 46.0 | 20.0 | 26.0 | 0.00 | 11.61 | 88.39 | 4.00 | 3.60 | | | |
| 103 | 41 | 20 | 17 | 683 | 438 | 207 | 97 | 54 | 40 | 35 | 675 | 433 | 204 | 96 | 53 | 40 | 35 | 14 | 50 | | 64 | 0.75-1.50 | A-7-6 | CH | 32.0 | 60.0 | 22.0 | 38.0 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 4.10 | 1.80 | | | |
| 104 | 43 | 17 | 18 | 585 | 316 | 105 | 40 | 28 | 24 | 24 | 545 | 295 | 98 | 37 | 26 | 22 | 22 | 18 | 38 | | 56 | 0.56-1.50 | A-7-6 | CH | 32.0 | 62.0 | 26.0 | 36.0 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 7.10 | 3.20 | | | |
| 105 | 43 | 18 | 16 | 636 | 395 | 250 | 151 | 97 | 66 | 53 | 590 | 367 | 232 | 140 | 90 | 61 | 49 | 16 | 54 | | 70 | 0.70-1.50 | A-7-5 | MH-OM | 36.0 | 60.0 | 24.0 | 36.0 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 3.30 | 2.70 | | | |
| 106 | 39 | 56 | 39 | 123 | 70 | 51 | 32 | 21 | 15 | 11 | 126 | 72 | 52 | 33 | 22 | 15 | 11 | 32 | 38 | | 70 | 0.73-1.50 | A-4 | SM | 6.9 | NP | NP | NP | 0.60 | 54.40 | 45.00 | 11.30 | 1.04 | | | |
| 107 | 40 | 58 | 40 | 158 | 102 | 84 | 57 | 39 | 30 | 20 | 160 | 103 | 85 | 58 | 39 | 30 | 20 | 21 | 49 | | 70 | 0.90-1.50 | A-6 | CL | 19.9 | 28.6 | 17.5 | 11.2 | 0.00 | 40.20 | 59.80 | 2.70 | 1.30 | | | |
| 108 | 39 | 55 | 40 | 139 | 95 | 84 | 61 | 48 | 38 | 31 | 142 | 97 | 86 | 62 | 49 | 39 | 32 | 20 | 50 | | 70 | 1.10-1.50 | A-6 | CL | 16.0 | 29.2 | 13.5 | 15.6 | 0.00 | 39.80 | 60.20 | 7.30 | 6.00 | | | |
| 109 | 40 | 19 | 17 | 360 | 219 | 113 | 43 | 41 | 31 | 23 | 359 | 218 | 113 | 43 | 41 | 31 | 23 | 8 | 20 | 25 | 53 | 0.55-1.50 | A-1-a | GP-GC | 6.7 | 26.0 | 20.0 | 6.0 | 67.20 | 25.90 | 6.90 | | | 70.90 | | |
| 110 | 41 | 21 | 17 | 274 | 171 | 85 | 46 | 25 | 19 | 15 | 271 | 169 | 84 | 45 | 25 | 19 | 15 | 8 | 20 | 25 | 53 | 0.65-1.50 | A-2-4 | GC | 6.5 | 30.0 | 20.0 | 10.0 | 49.10 | 35.90 | 15.00 | | | 77.50 | | |
| 111 | 40 | 22 | 18 | 523 | 310 | 139 | 61 | 43 | 33 | 26 | 522 | 309 | 139 | 61 | 43 | 33 | 26 | 8 | 20 | 25 | 53 | 0.9-1.50 | A-1-b | SM | 14.0 | NP | NP | NP | 13.10 | 73.20 | 13.70 | | | 12.10 | | |
| 112 | 40 | 34 | 30 | 367 | 149 | 70 | 49 | 27 | 14 | 9 | 371 | 151 | 71 | 49 | 27 | 14 | 9 | 9 | 20 | 25 | 54 | 0.53-1.50 | A-1-a | GP-GC | 6.0 | 22.0 | 17.0 | 5.0 | 66.20 | 23.80 | 10.00 | | | 49.60 | | |
| 113 | 40 | 32 | 26 | 258 | 160 | 85 | 69 | 41 | 22 | 12 | 257 | 160 | 85 | 69 | 41 | 22 | 12 | 9 | 20 | 25 | 54 | 0.60-1.50 | A-2-4 | SW-SP | 12.3 | 28.0 | 20.0 | 8.0 | 40.00 | 49.20 | 10.80 | | | 16.60 | | |
| 114 | 40 | 19 | 16 | 1528 | 720 | 125 | 36 | 30 | 22 | 18 | 1540 | 725 | 126 | 36 | 30 | 22 | 18 | 6 | 35 | | 41 | 0.42-0.92 | A-7-6 | CH-MH | 22.0 | 50.0 | 27.0 | 23.0 | 22.60 | 21.70 | 55.70 | 4.37 | 0.38 | | | |
| 115 | 41 | 18 | 16 | 1196 | 427 | 106 | 42 | 28 | 23 | 19 | 1167 | 417 | 103 | 41 | 27 | 22 | 19 | 6 | 35 | | 41 | 0.8-1.10 | A-7-6 | CL | 24.0 | 48.0 | 25.0 | 23.0 | 5.10 | 23.10 | 71.80 | 5.30 | 0.59 | | | |
| 116 | 41 | 18 | 15 | 1397 | 615 | 234 | 93 | 44 | 27 | 12 | 1366 | 601 | 229 | 91 | 43 | 26 | 12 | 6 | 35 | | 41 | 0.67-1.20 | A-7-5 | MH | 35.0 | 82.0 | 43.0 | 39.0 | 5.00 | 24.70 | 70.30 | 1.66 | 0.61 | | | |
| 117 | 41 | 18 | 15 | 1319 | 661 | 284 | 143 | 93 | 62 | 45 | 1277 | 640 | 275 | 138 | 90 | 60 | 44 | 6 | 35 | | 41 | 0.65-1.20 | A-2-7 | SM | 18.0 | 44.0 | 27.0 | 17.0 | 16.70 | 53.30 | 30.00 | 1.23 | 1.01 | | | |
| 118 | 41 | 25 | 23 | 956 | 525 | 301 | 208 | 153 | 113 | 92 | 944 | 519 | 297 | 205 | 151 | 112 | 91 | 30 | 40 | | 70 | 0.70-0.90 | MH | 68.8 | 98.0 | 82.0 | 16.0 | 0.00 | 16.50 | 83.50 | 2.90 | 2.30 | | | | |
| 119 | 40 | 24 | 22 | 704 | 509 | 376 | 247 | 155 | 90 | 74 | 704 | 509 | 376 | 247 | 155 | 90 | 74 | 10 | 70 | | 80 | 0.70-0.90 | MH | 52.0 | 82.0 | 71.0 | 11.0 | 0.00 | 15.90 | 84.10 | 2.10 | 1.80 | | | | |
| 120 | 39 | 21 | 25 | 1095 | 436 | 255 | 173 | 144 | 117 | 103 | 1112 | 443 | 259 | 176 | 146 | 119 | 105 | 5 | 55 | | 60 | 0.60-0.80 | MH | | | | | | | | | | | | | |

| DEFLECTOMETRÍA | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | GEOTECNIA | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|---------------------------------------|-------------|------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|---------------------------------------|-------|-------|---------------|--------|--------|----|-------------------------|-----------|--------|-----------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------|---------------------|--------------------------|-----------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-----------------|--|----|----|----|----|
| Punto | Deflexiones: Datos Obtenidos en Campo | | | | | | | | | | | Deflexiones Corregidas por Carga (µm) | | | | | | | Espesores de Estructura | | | | Profundidad exploración (m) | Clasificación Suelo subrasante | | Humedad Natural (%) | Límites de Atterberg (%) | | | Granulometría (%) | | | CBR, Muestra inalterada | | CBR, muestra compactada en laboratorio | | | | |
| | Carga | Temperatura | | Deflexiones Medidas (µm) | | | | | | | | Capa Asfáltica | MG-1 | MG-2 | Espesor Total | AASTHO | USCS | LL | LP | IP | Gravas | Arenas | | Finos | Humedad natural | | Inmersión | Inmersión | | | | | | | | | | | |
| | | Pav. | Aire | d ₀ | d ₁ | d ₂ | d ₃ | d ₄ | d ₅ | d ₆ | d _{0c} | | | | | | | | | | | | | | | | | | d _{1c} | d _{2c} | d _{3c} | d _{4c} | d _{5c} | d _{6c} | | cm | cm | cm | cm |
| # | kN | °C | °C | 0 cm | 30 cm | 60 cm | 90 cm | 120 cm | 150 cm | 180 cm | 0 cm | 30 cm | 60 cm | 90 cm | 120 cm | 150 cm | 180 cm | cm | cm | cm | cm | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 238 | 40 | 28 | 21 | 554 | 307 | 158 | 102 | 80 | 63 | 54 | 558 | 309 | 159 | 103 | 81 | 63 | 54 | 10 | 50 | | 60 | 0.60-1.20 | A-7-5 | MH | 10.9 | 59.7 | 38.8 | 20.9 | 1.20 | 26.50 | 72.30 | 10.00 | 7.00 | | | | | | |
| 239 | 40 | 29 | 20 | 456 | 287 | 174 | 115 | 81 | 59 | 45 | 457 | 288 | 174 | 115 | 81 | 59 | 45 | 7 | 43 | | 50 | 0.50-1.50 | A-7-5 | SM | 25.3 | 52.4 | 37.9 | 14.5 | 0.30 | 55.60 | 44.10 | 10.80 | 5.90 | | | | | | |
| 240 | 40 | 29 | 21 | 759 | 459 | 258 | 160 | 110 | 84 | 62 | 759 | 459 | 258 | 160 | 110 | 84 | 62 | 7 | 43 | | 50 | 0.50-1.50 | A-6 | SC | 22.3 | 30.9 | 19.5 | 11.4 | 1.50 | 58.00 | 40.50 | 5.90 | 4.30 | | | | | | |
| 241 | 40 | 27 | 20 | 918 | 580 | 332 | 202 | 137 | 95 | 75 | 930 | 587 | 336 | 205 | 139 | 96 | 76 | 10 | 40 | | 50 | 0.50-1.50 | A-2-4 | SM | 19.9 | 34.7 | 24.7 | 10.0 | 1.40 | 72.00 | 26.60 | 8.70 | 5.40 | | | | | | |
| 242 | 40 | 28 | 20 | 161 | 104 | 61 | 40 | 31 | 25 | 19 | 161 | 104 | 61 | 40 | 31 | 25 | 19 | 20 | 50 | | 70 | 0.70-1.00 | A-4 | SM | 11.0 | 31.4 | 23.2 | 8.2 | 9.90 | 45.50 | 44.60 | 16.30 | 9.20 | | | | | | |
| 243 | 40 | 26 | 20 | 189 | 125 | 78 | 48 | 33 | 24 | 17 | 189 | 125 | 78 | 48 | 33 | 24 | 17 | 20 | 75 | | 95 | 0.95-1.50 | A-2-7 | SM | 20.9 | 42.9 | 31.7 | 11.1 | 11.40 | 60.90 | 27.70 | 9.50 | 4.90 | | | | | | |
| 244 | 40 | 21 | 15 | 730 | 429 | 220 | 132 | 93 | 76 | 63 | 734 | 431 | 221 | 133 | 93 | 76 | 63 | 6 | 89 | | 95 | 0.95-1.50 | A-7-5 | MH | 74.8 | 112.2 | 71.4 | 40.8 | 0.10 | 29.20 | 70.70 | 4.00 | 3.00 | | | | | | |
| 245 | 41 | 26 | 23 | 189 | 103 | 60 | 41 | 31 | 24 | 18 | 186 | 101 | 59 | 40 | 30 | 24 | 18 | 19 | 41 | | 60 | 1.10-1.50 | A-7-6 | CL | 16.3 | 48.9 | 25.9 | 23.0 | 8.80 | 17.70 | 73.50 | 4.93 | 4.14 | | | | | | |
| 246 | 41 | 27 | 21 | 84 | 64 | 53 | 43 | 33 | 29 | 23 | 82 | 62 | 52 | 42 | 32 | 28 | 22 | 19 | 41 | | 60 | 1.10-1.50 | A-7-6 | CL | 16.5 | 47.0 | 23.8 | 23.2 | 2.00 | 14.00 | 84.00 | 4.76 | 3.28 | | | | | | |
| 247 | 41 | 26 | 23 | 130 | 82 | 47 | 31 | 14 | 13 | 9 | 127 | 80 | 46 | 30 | 14 | 13 | 9 | 18 | 45 | | 63 | 0.95-1.50 | A-6 | CL | 11.9 | 31.7 | 18.8 | 12.9 | 22.20 | 10.90 | 66.90 | 6.21 | 5.09 | | | | | | |
| 248 | 41 | 26 | 23 | 186 | 109 | 70 | 49 | 37 | 30 | 26 | 181 | 106 | 68 | 48 | 36 | 29 | 25 | 18 | 45 | | 63 | 1.10-1.50 | A-7-6 | CL | 17.4 | 41.1 | 27.0 | 14.1 | 15.80 | 9.80 | 74.40 | 6.02 | 3.73 | | | | | | |
| 249 | 39 | 23 | 20 | 333 | 197 | 111 | 60 | 32 | 21 | 19 | 338 | 200 | 113 | 61 | 32 | 21 | 19 | 18 | 45 | | 63 | 1.30-1.50 | A-4 | CL-ML | 18.5 | 32.0 | 24.4 | 7.6 | 19.50 | 16.70 | 63.80 | 6.21 | 4.60 | | | | | | |
| 250 | 42 | 23 | 19 | 96 | 62 | 42 | 32 | 24 | 20 | 17 | 92 | 59 | 40 | 31 | 23 | 19 | 16 | 20 | 50 | | 70 | 0.80-1.10 | A-4 | CL-ML | 12.7 | 30.0 | 21.0 | 9.0 | 16.00 | 12.70 | 71.30 | 5.98 | 4.01 | | | | | | |
| 251 | 42 | 23 | 19 | 97 | 61 | 45 | 37 | 29 | 22 | 20 | 93 | 58 | 43 | 35 | 28 | 21 | 19 | 20 | 50 | | 70 | 1.06-1.50 | A-7-6 | CH | 24.8 | 51.2 | 22.7 | 28.5 | 6.90 | 17.80 | 75.30 | 4.87 | 3.31 | | | | | | |
| 252 | 41 | 23 | 19 | 119 | 87 | 58 | 37 | 25 | 15 | 13 | 115 | 84 | 56 | 36 | 24 | 14 | 13 | 20 | 50 | | 70 | 1.00-1.30 | A-7-6 | CL-ML | 15.2 | 40.6 | 25.8 | 14.8 | 12.00 | 25.60 | 62.40 | 4.76 | 3.62 | | | | | | |
| 253 | 42 | 23 | 19 | 79 | 55 | 45 | 37 | 26 | 24 | 19 | 76 | 53 | 43 | 36 | 25 | 23 | 18 | 20 | 50 | | 70 | 1.20-1.50 | A-4 | CL-ML | 22.0 | 32.2 | 26.0 | 6.2 | 3.00 | 25.70 | 71.30 | 7.84 | 5.72 | | | | | | |
| 254 | 41 | 22 | 19 | 121 | 92 | 75 | 61 | 48 | 41 | 33 | 117 | 89 | 72 | 59 | 46 | 40 | 32 | 20 | 50 | | 70 | 0.75-1.50 | A-4 | ML | 18.3 | 35.6 | 29.0 | 6.6 | 20.20 | 14.40 | 65.40 | 8.61 | 6.37 | | | | | | |
| 255 | 41 | 22 | 18 | 192 | 147 | 114 | 83 | 60 | 51 | 42 | 187 | 143 | 111 | 81 | 58 | 50 | 41 | 20 | 50 | | 70 | 0.75-1.50 | A-7-5 | MH-CH | 31.5 | 50.9 | 30.4 | 20.5 | 2.70 | 9.00 | 88.30 | 4.51 | 2.75 | | | | | | |
| 256 | 42 | 22 | 18 | 124 | 77 | 60 | 48 | 37 | 31 | 24 | 118 | 73 | 57 | 46 | 35 | 30 | 23 | 20 | 50 | | 70 | 0.75-1.20 | A-7-6 | CL-ML | 39.2 | 42.2 | 23.4 | 18.8 | 0.80 | 1.30 | 97.90 | 5.02 | 3.71 | | | | | | |
| 257 | 41 | 22 | 17 | 100 | 65 | 45 | 31 | 19 | 14 | 11 | 97 | 63 | 44 | 30 | 18 | 14 | 11 | 25 | 45 | | 70 | 0.55-1.10 | A-4 | CL-ML | 17.2 | 27.7 | 20.7 | 7.0 | 16.60 | 23.50 | 59.90 | 5.32 | 4.63 | | | | | | |
| 258 | 41 | 20 | 16 | 200 | 125 | 64 | 38 | 23 | 17 | 12 | 194 | 121 | 62 | 37 | 22 | 16 | 12 | 40 | 30 | | 70 | 0.80-1.50 | A-6 | CL | 16.8 | 30.3 | 18.4 | 11.9 | 3.10 | 28.00 | 68.90 | 7.96 | 6.69 | | | | | | |
| 259 | 41 | 20 | 14 | 186 | 149 | 116 | 89 | 64 | 49 | 39 | 181 | 145 | 113 | 87 | 62 | 48 | 38 | 19 | 43 | | 62 | 0.85-1.50 | A-7-6 | CL | 28.5 | 42.2 | 19.8 | 22.4 | 10.60 | 9.20 | 80.20 | 6.77 | 4.99 | | | | | | |
| 260 | 40 | 24 | 21 | 209 | 143 | 80 | 49 | 31 | 23 | 18 | 207 | 142 | 79 | 49 | 31 | 23 | 18 | 19 | 43 | | 62 | 0.70-1.50 | A-6 | CL | 18.7 | 29.6 | 17.5 | 12.1 | 12.80 | 14.30 | 72.90 | 4.52 | 3.52 | | | | | | |
| 261 | 41 | 20 | 13 | 166 | 127 | 90 | 62 | 43 | 31 | 23 | 161 | 123 | 87 | 60 | 42 | 30 | 22 | 19 | 43 | | 62 | 0.80-1.50 | A-6 | CL | 18.4 | 36.6 | 17.3 | 19.3 | 17.40 | 15.60 | 67.00 | 4.67 | 4.43 | | | | | | |
| 262 | 39 | 24 | 21 | 137 | 86 | 57 | 44 | 35 | 30 | 27 | 140 | 88 | 58 | 45 | 36 | 31 | 28 | 19 | 42 | | 61 | 0.16-0.80 | A-1-b | GM | 8.4 | NP | NP | NP | 48.80 | 41.20 | 10.00 | | | 25.00 | | | | | |
| 263 | 37 | 16 | 15 | 665 | 332 | 114 | 52 | 31 | 20 | 15 | 727 | 363 | 125 | 57 | 34 | 22 | 16 | 22 | 39 | | 61 | 0.95-1.50 | A-2-4 | GC | 9.8 | 21.8 | 14.4 | 7.4 | 55.40 | 27.90 | 16.70 | | | 11.00 | | | | | |
| 264 | 40 | 21 | 18 | 280 | 182 | 92 | 50 | 33 | 23 | 21 | 279 | 182 | 92 | 50 | 33 | 23 | 21 | 18 | 48 | | 66 | 0.70-1.50 | A-4 | CL | 14.2 | 27.1 | 17.9 | 9.2 | 14.40 | 14.70 | 70.90 | 4.94 | 4.20 | | | | | | |
| 265 | 41 | 21 | 18 | 215 | 159 | 100 | 67 | 46 | 36 | 30 | 211 | 156 | 98 | 66 | 45 | 35 | 29 | 18 | 48 | | 66 | 0.70-1.50 | A-6 | CL-ML | 20.6 | 38.0 | 22.3 | 15.7 | 16.30 | 15.30 | 68.40 | 5.30 | 3.74 | | | | | | |
| 266 | 42 | 15 | 15 | 115 | 84 | 52 | 33 | 21 | 14 | 11 | 111 | 81 | 50 | 32 | 20 | 13 | 11 | 18 | 48 | | 66 | 0.65-1.50 | A-4 | CL-ML | 13.2 | 30.8 | 22.2 | 8.6 | 15.30 | 14.80 | 69.90 | 5.95 | 4.56 | | | | | | |
| 267 | 38 | 23 | 17 | 184 | 96 | 65 | 49 | 37 | 29 | 24 | 192 | 100 | 68 | 51 | 39 | 30 | 25 | 18 | 48 | | 66 | 0.27-1.25 | A-1-a | GM | 6.1 | NP | NP | NP | 65.30 | 25.70 | 9.00 | | | 30.00 | | | | | |
| 268 | 41 | 20 | 14 | 163 | 127 | 92 | 65 | 47 | 37 | 31 | 161 | 125 | 91 | 64 | 46 | 36 | 31 | 18 | 48 | | 66 | 0.85-1.50 | A-4 | CL-ML | 19.0 | 26.9 | 20.1 | 6.8 | 12.20 | 14.80 | 73.00 | 4.52 | 3.62 | | | | | | |
| 269 | 41 | 18 | 17 | 745 | 441 | 193 | 120 | 73 | 51 | 38 | 729 | 431 | 189 | 117 | 71 | 50 | 37 | 16 | 104 | | 120 | 0.81-1.50 | | CL | 17.2 | 30.8 | 21.8 | 9.0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 5.87 | 3.48 | | | | | | |
| 270 | 41 | 18 | 16 | 499 | 253 | 82 | 42 | 31 | 24 | 19 | 482 | 244 | 79 | 41 | 30 | 23 | 18 | 15 | 20 | | 35 | 0.35-1.50 | | CL-ML | 24.1 | 42.1 | 25.7 | 16.4 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 9.96 | 6.46 | | | | | | |
| 271 | 42 | 18 | 17 | 194 | 85 | 62 | 46 | 32 | 23 | 13 | 187 | 82 | 60 | 44 | 31 | 22 | 13 | 13 | 20 | | 33 | 0.30-1.30 | | CL | 9.8 | 35.6 | 19.8 | 15.7 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 21.15 | 4.92 | | | | | | |
| 272 | 41 | 25 | 21 | 476 | 118 | 89 | 51 | 45 | 30 | 18 | 466 | 115 | 87 | 50 | 44 | 29 | 18 | 6 | 25 | | 31 | 0.26-0.80 | | ML-OL | 11.8 | 36.8 | 25.9 | 10.9 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 11.56 | 6.78 | | | | | | |
| 273 | 41 | 16 | 13 | 587 | 323 | 147 | 88 | 56 | 41 | 30 | 575 | 317 | 144 | 86 | 55 | 40 | 29 | 14 | 25 | | 39 | 0.90-1.30 | | SP-SM | 6.9 | NP | NP | NP | 27.40 | 64.11 | 8.49 | 26.15 | 8.17 | | | | | | |
| 274 | 42 | 12 | 9 | 266 | 171 | 95 | 57 | 38 | 31 | 26 | 253 | 163 | 90 | 54 | 36 | 30 | 25 | 15 | 25 | | 40 | 0.42-1.00 | | SM | 5.8 | NP | NP | NP | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 18.29 | 3.96 | | | | | | |
| 275 | 41 | 25 | 21 | 347 | 148 | 48 | 33 | 22 | 18 | 15 | 342 | 146 | 47 | 33 | 22 | 18 | 15 | 15 | 25 | | 40 | 0.41-0.96 | | ML-OL | 20.1 | 37.4 | 28.7 | 8.7 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 16.01 | 9.33 | | | | | | |
| 276 | 39 | 24 | 21 | 832 | 429 | 188 | 102 | 75 | 57 | 49 | 856 | 441 | 193 | 105 | 77 | 59 | 50 | 16 | 79 | | 95 | 0.95-1.50 | A-6 | CL | 17.5 | 38.0 | 16.0 | 22.0 | 0.00 | 12.20 | 87.80 | 5.01 | 4.84 | | | | | | |
| 277 | 39 | 25 | 21 | 679 | 320 | 132 | 70 | 53 | 39 | 31 | 700 | 330 | 136 | 72 | 55 | 40 | 32 | 24 | 70 | | 94 | 1.10-1.50 | A-7-6 | CL | 11.6 | 49.0 | 25.0 | 24.0 | 0.00 | 20.70 | 79.30 | 3.26 | 3.06 | | | | | | |
| 278 | 39 | 24 | 21 | 806 | 334 | 124 | 66 | 50 | 37 | 30 | 833 | 345 | 128 | 68 | 52 | 38 | 31 | 27 | 64 | | 91 | 1.10-1.50 | A-6 | CL | 10.2 | 25.0 | 12.0 | 13.0 | 1.40 | 46.10 | 52.50 | 7.04 | 6.87 | | | | | | |
| 279 | 39 | 24 | 21 | 652 | 316 | 130 | 68 | 47 | 35 | 29 | 674 | 327 | 134 | 70 | 49</ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| DEFLECTOMETRÍA | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | GEOTECNIA | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|---------------------------------------|-------------|------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------------------|------|------|---------------|--------|------|----|-------------------------|-----|-----------|-----------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------|---------------------|--------------------------|-----------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-----------------|--|
| Punto | Deflexiones: Datos Obtenidos en Campo | | | | | | | | | | Deflexiones Corregidas por Carga (µm) | | | | | | | Espesores de Estructura | | | | Profundidad exploración (m) | Clasificación Suelo subrasante | | Humedad Natural (%) | Límites de Atterberg (%) | | | Granulometría (%) | | | CBR, Muestra inalterada | | CBR, muestra compactada en laboratorio |
| | Carga | Temperatura | | Deflexiones Medidas (µm) | | | | | | | Capa Asfáltica | MG-1 | MG-2 | Espesor Total | AASTHO | USCS | LL | LP | IP | Gravas | Arenas | | Finos | Humedad natural | | Inmersión | Inmersión | | | | | | | |
| | | Pav. | Aire | d ₀ | d ₁ | d ₂ | d ₃ | d ₄ | d ₅ | d ₆ | | | | | | | | | | | | | | | | | | d _{0c} | d _{1c} | d _{2c} | d _{3c} | d _{4c} | d _{5c} | |
| 318 | 39 | 12 | 15 | 1422 | 620 | 210 | 95 | 55 | 37 | 29 | 1466 | 639 | 216 | 98 | 57 | 38 | 30 | 6 | 91 | 97 | 0.60-1.50 | | MH | 20.8 | 62.5 | 43.2 | 19.3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 6.15 | 2.88 | | |
| 319 | 38 | 20 | 16 | 819 | 403 | 181 | 110 | 81 | 63 | 53 | 853 | 420 | 189 | 115 | 84 | 66 | 55 | 7 | 88 | 95 | 0.50-1.00 | | MH | 35.0 | 71.0 | 48.0 | 23.0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 5.56 | 1.79 | | |
| 320 | 39 | 15 | 18 | 510 | 251 | 84 | 33 | 18 | 12 | 9 | 527 | 259 | 87 | 34 | 19 | 12 | 9 | 8 | 98 | 106 | 0.70-1.50 | | MH | 36.1 | 71.3 | 46.9 | 24.4 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 5.23 | 1.66 | | |
| 321 | 40 | 31 | | 319 | 172 | 85 | 47 | 30 | 21 | 17 | 319 | 172 | 85 | 47 | 30 | 21 | 17 | 17 | 50 | 67 | 0.67-1.50 | A-6 | CL | 20.6 | 29.4 | 17.2 | 12.2 | 0.00 | 35.55 | 64.45 | 7.99 | | | |
| 322 | 40 | 32 | | 358 | 194 | 86 | 49 | 36 | 28 | 21 | 358 | 194 | 86 | 49 | 36 | 28 | 21 | 11 | 65 | 76 | 0.75-1.50 | A-6 | CL | 19.5 | 29.0 | 17.4 | 11.6 | 3.76 | 32.53 | 63.71 | 7.07 | | | |
| 323 | 40 | 40 | | 330 | 193 | 96 | 55 | 35 | 23 | 19 | 330 | 193 | 96 | 55 | 35 | 23 | 19 | 15 | 60 | 75 | 0.75-1.50 | A-4 | CL | 21.3 | 27.7 | 17.9 | 9.8 | 0.09 | 14.16 | 85.75 | 10.69 | | | |
| 324 | 41 | 29 | 20 | 240 | 166 | 107 | 71 | 47 | 33 | 26 | 235 | 163 | 105 | 70 | 46 | 32 | 25 | 30 | 70 | 100 | 1.00-1.50 | A-6 | CL-ML | 18.7 | 34.5 | 23.7 | 10.8 | 8.20 | 20.20 | 71.60 | 5.21 | 4.74 | | |
| 325 | 43 | 29 | 21 | 230 | 178 | 130 | 93 | 68 | 50 | 40 | 215 | 166 | 121 | 87 | 64 | 47 | 37 | 25 | 65 | 90 | 0.95-1.20 | A-4 | ML | 7.3 | | | | 17.80 | 19.00 | 63.20 | 5.98 | 4.54 | | |
| 326 | 41 | 29 | 21 | 316 | 198 | 111 | 67 | 45 | 32 | 26 | 311 | 195 | 109 | 66 | 44 | 32 | 26 | 23 | 87 | 110 | 1.10-1.50 | A-7-6 | CL-ML | 16.3 | 48.9 | 25.9 | 23.0 | 8.80 | 17.70 | 73.50 | 4.93 | 4.14 | | |
| 327 | 42 | 28 | 21 | 389 | 245 | 150 | 93 | 63 | 44 | 34 | 374 | 236 | 144 | 89 | 61 | 42 | 33 | 14 | 56 | 70 | 1.10-1.50 | A-7-6 | CL | 16.5 | 47.0 | 23.8 | 23.3 | 2.00 | 14.00 | 84.00 | 4.76 | 3.28 | | |
| 328 | 41 | 29 | 19 | 335 | 194 | 116 | 74 | 48 | 34 | 30 | 326 | 189 | 113 | 72 | 47 | 33 | 29 | 12 | 63 | 75 | 0.95-1.50 | A-6 | CL | 11.9 | 31.7 | 18.8 | 12.9 | 22.20 | 10.90 | 66.90 | 6.21 | 5.09 | | |
| 329 | 43 | 28 | 20 | 376 | 239 | 132 | 94 | 69 | 52 | 46 | 353 | 224 | 124 | 88 | 65 | 49 | 43 | 13 | 97 | 110 | 1.10-1.50 | A-7-6 | CL-ML | 17.4 | 41.1 | 27.0 | 14.0 | 15.80 | 9.80 | 74.40 | 6.02 | 3.73 | | |
| 330 | 43 | 31 | 21 | 370 | 224 | 99 | 48 | 28 | 18 | 16 | 348 | 211 | 93 | 45 | 26 | 17 | 15 | 18 | 112 | 130 | 1.30-1.50 | A-4 | CL-ML | 18.5 | 32.0 | 24.4 | 7.5 | 19.50 | 16.70 | 63.80 | 6.21 | 4.60 | | |
| 331 | 42 | 30 | 21 | 343 | 199 | 131 | 88 | 65 | 50 | 41 | 329 | 191 | 126 | 84 | 62 | 48 | 39 | 30 | 80 | 80 | 0.80-1.10 | A-4 | CL-ML | 12.7 | 30.0 | 21.0 | 9.0 | 16.00 | 12.70 | 71.30 | 5.98 | 4.01 | | |
| 332 | 43 | 27 | 18 | 349 | 254 | 147 | 88 | 57 | 41 | 33 | 328 | 239 | 138 | 83 | 54 | 39 | 31 | 20 | 35 | 55 | 1.06-1.50 | A-7-6 | CH | 24.8 | 51.2 | 22.7 | 28.5 | 6.90 | 17.80 | 75.30 | 4.87 | 3.31 | | |
| 333 | 42 | 28 | 26 | 387 | 267 | 196 | 136 | 98 | 71 | 56 | 369 | 254 | 187 | 130 | 93 | 68 | 53 | 22 | 78 | 100 | 1.00-1.30 | A-7-6 | CL-ML | 15.2 | 40.6 | 25.8 | 14.7 | 12.00 | 25.60 | 62.40 | 4.76 | 3.62 | | |
| 334 | 42 | 36 | 29 | 168 | 91 | 46 | 29 | 18 | 13 | 12 | 158 | 86 | 43 | 27 | 17 | 12 | 11 | 15 | 70 | 85 | 1.30-1.50 | A-7-5 | MH | 44.8 | 89.1 | 54.9 | 34.2 | 32.80 | 18.30 | 48.90 | 7.42 | 4.75 | | |
| 335 | 42 | 28 | 20 | 229 | 157 | 119 | 87 | 62 | 46 | 39 | 216 | 148 | 112 | 82 | 58 | 43 | 37 | 35 | 15 | 50 | 0.50-1.00 | A-4 | CL-ML | 12.4 | 30.9 | 22.9 | 8.0 | 21.10 | 9.20 | 69.70 | 5.19 | 3.94 | | |
| 336 | 42 | 27 | 22 | 280 | 206 | 139 | 100 | 83 | 70 | 62 | 269 | 198 | 133 | 96 | 80 | 67 | 59 | 20 | 55 | 75 | 0.75-1.50 | A-4 | ML | 18.3 | 35.6 | 29.0 | 6.6 | 20.20 | 14.40 | 65.40 | 8.61 | 6.37 | | |
| 337 | 41 | 25 | 18 | 311 | 234 | 164 | 115 | 83 | 59 | 45 | 302 | 227 | 159 | 112 | 81 | 57 | 44 | 25 | 50 | 75 | 0.75-1.50 | A-7-5 | MH-CH | 31.5 | 50.9 | 30.4 | 20.5 | 2.70 | 9.00 | 88.30 | 4.51 | 2.75 | | |
| 338 | 42 | 27 | 17 | 243 | 172 | 127 | 93 | 70 | 52 | 40 | 232 | 164 | 121 | 89 | 67 | 50 | 38 | 23 | 52 | 75 | 0.75-1.20 | A-7-6 | CL-ML | 39.2 | 42.2 | 23.4 | 18.8 | 0.80 | 1.30 | 97.90 | 5.02 | 3.71 | | |
| 339 | 43 | 24 | 21 | 297 | 232 | 153 | 98 | 66 | 50 | 42 | 280 | 218 | 144 | 92 | 62 | 47 | 40 | 20 | 35 | 55 | 0.55-1.10 | A-4 | CL-ML | 17.2 | 27.7 | 20.8 | 7.0 | 16.60 | 23.50 | 59.90 | 5.32 | 4.63 | | |
| 340 | 42 | 31 | 22 | 373 | 218 | 115 | 65 | 44 | 30 | 25 | 360 | 210 | 111 | 63 | 42 | 29 | 24 | 30 | 50 | 80 | 0.80-1.50 | A-6 | CL | 16.8 | 30.3 | 18.4 | 11.9 | 3.10 | 28.00 | 68.90 | 7.96 | 6.69 | | |
| 341 | 42 | 26 | 20 | 271 | 168 | 91 | 54 | 36 | 25 | 22 | 259 | 161 | 87 | 52 | 34 | 24 | 21 | 17 | 53 | 70 | 0.70-1.50 | A-6 | CL | 18.7 | 29.6 | 17.5 | 12.1 | 12.80 | 14.30 | 72.90 | 4.52 | 3.52 | | |
| 342 | 42 | 28 | 18 | 250 | 157 | 94 | 58 | 42 | 32 | 26 | 239 | 150 | 90 | 55 | 40 | 31 | 25 | 17 | 33 | 50 | 0.80-1.50 | A-6 | CL | 18.4 | 36.6 | 17.3 | 19.3 | 17.40 | 15.60 | 67.00 | 4.67 | 4.43 | | |
| 343 | 43 | 30 | 19 | 354 | 265 | 170 | 104 | 60 | 36 | 23 | 332 | 249 | 160 | 98 | 56 | 34 | 22 | 18 | 42 | 60 | 0.75-1.50 | A-7-5 | MH | 32.2 | 88.3 | 55.5 | 32.8 | 24.40 | 8.80 | 66.80 | 6.02 | 4.01 | | |
| 344 | 41 | 31 | 24 | 358 | 214 | 105 | 56 | 35 | 24 | 23 | 348 | 208 | 102 | 55 | 34 | 23 | 22 | 18 | 22 | 40 | 0.70-1.50 | A-4 | CL | 14.2 | 27.1 | 17.9 | 9.2 | 14.40 | 14.70 | 70.90 | 4.94 | 4.20 | | |
| 345 | 44 | 33 | 21 | 243 | 164 | 104 | 71 | 50 | 40 | 33 | 223 | 150 | 95 | 65 | 46 | 37 | 30 | 18 | 52 | 70 | 0.70-1.50 | A-6 | CL-ML | 20.6 | 38.0 | 22.3 | 15.7 | 16.30 | 15.30 | 68.40 | 5.30 | 3.74 | | |
| 346 | 43 | 23 | 14 | 251 | 190 | 137 | 100 | 85 | 69 | 59 | 236 | 178 | 129 | 94 | 80 | 65 | 55 | 16 | 69 | 85 | 0.85-1.50 | A-4 | CL-ML | 19.0 | 26.9 | 20.1 | 6.9 | 12.20 | 14.80 | 73.00 | 4.52 | 3.62 | | |
| 347 | 45 | 26 | 23 | 162 | 110 | 66 | 42 | 28 | 20 | 18 | 144 | 98 | 59 | 37 | 25 | 18 | 16 | 10 | 64 | 74 | 1 | A-4(5) | CL-ML | 16.0 | 22.0 | 16.0 | 6.0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 3.40 | | | |
| 348 | 44 | 26 | 22 | 279 | 195 | 113 | 70 | 49 | 37 | 30 | 254 | 178 | 103 | 64 | 45 | 34 | 27 | 14 | 83 | 97 | 1 | A-7-6(9) | CL | 17.5 | 47.0 | 24.0 | 23.0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 3.80 | | | |
| 349 | 44 | 26 | 23 | 286 | 197 | 115 | 64 | 36 | 23 | 19 | 261 | 180 | 105 | 58 | 33 | 21 | 17 | 13 | 22 | 35 | 0.4 | A-4(5) | ML | 12.5 | 17.0 | 14.0 | 3.0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 5.10 | | | |
| 350 | 44 | 26 | 23 | 281 | 169 | 89 | 54 | 38 | 30 | 25 | 257 | 155 | 81 | 49 | 35 | 27 | 23 | 14 | 60 | 74 | 0.8 | A-4(3) | ML | 19.8 | 22.0 | 18.0 | 4.0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 3.70 | | | |
| 351 | 43 | 29 | 27 | 439 | 268 | 121 | 59 | 35 | 22 | 19 | 409 | 250 | 113 | 55 | 33 | 21 | 18 | 8 | 19 | 27 | 0.4 | A-4(5) | ML | 8.9 | | | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 5.40 | | | |
| 352 | 44 | 33 | 31 | 244 | 143 | 72 | 37 | 22 | 16 | 13 | 222 | 130 | 65 | 34 | 20 | 15 | 12 | 14 | 116 | 130 | 1.5 | A-6(10) | CL | 26.0 | 39.0 | 24.0 | 15.0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 5.10 | | | |
| 353 | 43 | 31 | 24 | 405 | 265 | 152 | 96 | 62 | 45 | 35 | 380 | 249 | 143 | 90 | 58 | 42 | 33 | 19 | 21 | 40 | 0.4 | A-7-6(13) | CL | 31.5 | 45.4 | 26.4 | 19.0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 5.60 | | | |
| 354 | 44 | 29 | 24 | 195 | 139 | 83 | 48 | 29 | 22 | 15 | 179 | 128 | 76 | 44 | 27 | 20 | 14 | 13 | 47 | 60 | 0.7 | A-6(8) | CL | 26.5 | 38.7 | 24.7 | 14.0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 5.30 | | | |
| 355 | 44 | 34 | 31 | 262 | 173 | 97 | 57 | 34 | 25 | 17 | 241 | 159 | 89 | 52 | 31 | 23 | 16 | 23 | 67 | 90 | 0.9 | A-6(11) | CL | 23.0 | 39.8 | 20.1 | 19.7 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 4.50 | | | |
| 356 | 43 | 33 | 29 | 326 | 211 | 130 | 85 | 56 | 40 | 31 | 301 | 195 | 120 | 79 | 52 | 37 | 29 | 25 | 55 | 80 | 0.8 | A-2-4(0) | SM | 6.5 | NP | NP | NP | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 6.00 | | | |
| 357 | 45 | 27 | 24 | 203 | 135 | 86 | 57 | 39 | 28 | 21 | 180 | 120 | 76 | 51 | 35 | 25 | 19 | 25 | 49 | 74 | 0.8 | A-4(8) | ML | 25.1 | | | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2.60 | | | |
| 358 | 42 | 27 | 23 | 217 | 150 | 88 | 52 | 34 | 23 | 17 | 207 | 143 | 84 | 49 | 32 | 22 | 16 | 16 | 140 | 156 | 1.5 | A-4(8) | CL | 14.6 | 25.6 | 18.3 | 7.3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 5.20 | | | |
| 359 | 44 | 31 | 26 | 226 | 164 | 107 | 70 | 46 | 32 | 24 | 203 | 148 | 96 | 63 | 41 | 29 | 22 | 23 | 53 | 76 | 0.8 | A-6(8) | CL | 17.5 | 30.3 | 17.7 | 12.6 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 5.30 | | | |
| 360 | 45 | 25 | 22 | 142 | 101 | 80 | 57 | 46 | 37 | 27 | 125 | 89 | 71 | 50 | 41 | 33 | 24 | 17 | 72 | 89 | 0.9 | A-7-6(13) | CL | 21.5 | 48.6 | 27.4 | 21.3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 7.78 | | | |
| 361 | 44 | 27 | 23 | 299 | 161 | 66 | 33 | 22 | 19 | 16 | 274 | 148 | 61 | 30 | 20 | 17 | 15 | 5 | 95 | 10 | | | | | | | | | | | | | | |

| DEFLECTOMETRÍA | | | | | | | | | | | | | | | | | | GEOTECNIA | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|---------------------------------------|-------------|------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|---------------------------------------|------|------|---------------|--------|------|-----------|-------------------------|-----|-----------|--------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------|---------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|----|--|
| Punto | Deflexiones: Datos Obtenidos en Campo | | | | | | | | | | | Deflexiones Corregidas por Carga (µm) | | | | | | | Espesores de Estructura | | | | Profundidad exploración (m) | Clasificación Suelo subrasante | | Humedad Natural (%) | Límites de Atterberg (%) | | | Granulometría (%) | | | CBR, Muestra inalterada | | CBR, muestra compactada en laboratorio |
| | Carga | Temperatura | | Deflexiones Medidas (µm) | | | | | | | | Capa Asfáltica | MG-1 | MG-2 | Espesor Total | AASTHO | USCS | LL | LP | IP | Gravas | Arenas | | Finos | Humedad natural | | Inmersión | | | | | | | | |
| | | Pav. | Aire | d ₀ | d ₁ | d ₂ | d ₃ | d ₄ | d ₅ | d ₆ | d _{0c} | | | | | | | | | | | | | | | | | d _{1c} | d _{2c} | d _{3c} | d _{4c} | d _{5c} | d _{6c} | cm | |
| 398 | 40 | 35 | 28 | 310 | 174 | 80 | 49 | 39 | 21 | 14 | 308 | 173 | 80 | 49 | 39 | 21 | 14 | 10 | 50 | 60 | 0.76-1.50 | A-2-6 | SC | 6.6 | 38.1 | 16.8 | 21.3 | 36.30 | 49.40 | 14.30 | | | 43.40 | | |
| 399 | 41 | 34 | 27 | 305 | 178 | 100 | 55 | 34 | 23 | 11 | 300 | 175 | 98 | 54 | 33 | 23 | 11 | 10 | 50 | 60 | 0.40-1.50 | A-2-4 | GC | 7.2 | 21.8 | 14.7 | 7.1 | 49.90 | 35.40 | 14.70 | | | 44.69 | | |
| 400 | 40 | 34 | 28 | 254 | 101 | 56 | 39 | 28 | 24 | 16 | 251 | 100 | 55 | 39 | 28 | 24 | 16 | 10 | 50 | 60 | 0.60-1.50 | A-2-6 | SP | 11.6 | 32.6 | 16.9 | 15.7 | 40.80 | 55.70 | 3.50 | | | 47.78 | | |
| 401 | 41 | 34 | 29 | 236 | 112 | 50 | 36 | 28 | 18 | 12 | 230 | 109 | 49 | 35 | 27 | 18 | 12 | 10 | 50 | 60 | 0.70-1.10 | A-1a | GP-GC | 3.6 | NP | NP | NP | 63.50 | 27.90 | 8.60 | | | 73.69 | | |
| 402 | 41 | 29 | 26 | 385 | 225 | 115 | 61 | 38 | 27 | 13 | 380 | 222 | 114 | 60 | 38 | 27 | 13 | 10 | 50 | 60 | 0.90-1.50 | A-2-6 | GC | 6.4 | 33.0 | 16.1 | 16.9 | 48.70 | 29.70 | 21.60 | | | 39.11 | | |
| 403 | 39 | 32 | 26 | 226 | 128 | 58 | 38 | 28 | 19 | 12 | 232 | 131 | 59 | 39 | 29 | 19 | 12 | 10 | 50 | 60 | 1.20-1.50 | A-2-4 | GC | 4.5 | 24.4 | 15.0 | 9.4 | 57.00 | 30.00 | 13.00 | | | 40.83 | | |
| 404 | 40 | 31 | 28 | 298 | 98 | 42 | 36 | 25 | 18 | 9 | 296 | 97 | 42 | 36 | 25 | 18 | 9 | 10 | 50 | 60 | 0.60-1.50 | A-2-6 | GP-GC | 4.8 | 31.7 | 17.2 | 14.5 | 66.60 | 23.50 | 9.90 | | | 62.17 | | |
| 405 | 40 | 33 | 26 | 238 | 91 | 44 | 31 | 26 | 22 | 13 | 236 | 90 | 44 | 31 | 26 | 22 | 13 | 10 | 50 | 60 | 0.95-1.50 | A-6 | SC | 11.1 | 36.9 | 16.9 | 20.0 | 27.80 | 29.80 | 42.40 | | | 25.08 | | |
| 406 | 40 | 31 | 26 | 357 | 159 | 69 | 41 | 28 | 20 | 12 | 357 | 159 | 69 | 41 | 28 | 20 | 12 | 10 | 50 | 60 | 0.73-1.50 | A-7-5 | SC | 9.5 | 42.0 | 19.1 | 22.9 | 23.00 | 36.30 | 40.70 | | | 25.55 | | |
| 407 | 41 | 20 | 13 | 111 | 59 | 49 | 32 | 24 | 17 | 9 | 109 | 58 | 48 | 31 | 24 | 17 | 9 | 10 | 50 | 60 | 0.60-1.50 | A-1a | GP-GC | 1.9 | NP | NP | NP | 60.90 | 31.60 | 7.50 | | | 49.04 | | |
| 408 | 40 | 19 | 12 | 99 | 52 | 36 | 26 | 17 | 14 | 8 | 99 | 52 | 36 | 26 | 17 | 14 | 8 | 10 | 50 | 60 | 0.73-1.50 | A-2-6 | GC | 3.4 | 28.4 | 13.7 | 14.7 | 67.10 | 19.00 | 13.90 | | | 42.00 | | |
| 409 | 40 | 19 | 13 | 271 | 134 | 67 | 39 | 24 | 18 | 12 | 271 | 134 | 67 | 39 | 24 | 18 | 12 | 10 | 50 | 60 | 0.73-1.50 | A-2-6 | CH | 24.9 | 61.2 | 25.8 | 35.4 | 5.80 | 24.80 | 69.40 | 5.60 | | | | |
| 410 | 40 | 19 | 13 | 311 | 199 | 116 | 72 | 46 | 33 | 20 | 315 | 202 | 117 | 73 | 47 | 33 | 20 | 10 | 50 | 60 | 0.28-1.50 | A-2-6 | GC | 3.8 | 35.7 | 15.7 | 20.0 | 58.10 | 20.50 | 21.40 | | | 40.81 | | |
| 411 | 40 | 21 | 14 | 146 | 85 | 51 | 37 | 28 | 18 | 13 | 145 | 84 | 51 | 37 | 28 | 18 | 13 | 10 | 50 | 60 | 0.80-1.35 | A-2-6 | GP-GC | 5.0 | 27.4 | 16.1 | 11.3 | 54.60 | 34.90 | 10.50 | | | 50.42 | | |
| 412 | 39 | 21 | 14 | 243 | 150 | 76 | 38 | 29 | 20 | 12 | 247 | 153 | 77 | 39 | 30 | 20 | 12 | 10 | 50 | 60 | 0.53-1.40 | A-2-6 | GC | 6.2 | 31.4 | 15.2 | 16.2 | 50.50 | 34.10 | 15.40 | | | 56.97 | | |
| 413 | 40 | 19 | 15 | 139 | 95 | 53 | 33 | 23 | 17 | 13 | 139 | 95 | 53 | 33 | 23 | 17 | 13 | 10 | 50 | 60 | 0.57-1.37 | A-1b | SC | 4.7 | NP | NP | NP | 33.20 | 47.80 | 19.00 | | | 57.33 | | |
| 414 | 39 | 20 | 16 | 148 | 94 | 52 | 35 | 22 | 15 | 11 | 150 | 95 | 53 | 36 | 22 | 15 | 11 | 10 | 50 | 60 | 0.70-1.50 | A-6 | SC | 7.0 | 27.6 | 14.9 | 12.7 | 8.90 | 52.00 | 39.10 | | | 40.87 | | |
| 415 | 41 | 31 | 26 | 165 | 105 | 66 | 44 | 36 | 27 | 22 | 161 | 102 | 64 | 43 | 35 | 26 | 21 | 10 | 50 | 60 | 0.65-1.50 | A-2-6 | SC | 8.1 | 27.7 | 13.9 | 13.8 | 31.20 | 36.70 | 32.10 | | | 26.82 | | |
| 416 | 39 | 21 | 17 | 629 | 328 | 153 | 88 | 59 | 37 | 10 | 647 | 337 | 157 | 90 | 61 | 38 | 10 | 10 | 50 | 60 | 0.36-1.50 | A-2-4 | GC | 5.1 | 22.7 | 14.9 | 7.8 | 52.20 | 30.90 | 16.90 | | | 35.02 | | |
| 417 | 40 | 21 | 18 | 134 | 105 | 48 | 33 | 24 | 14 | 11 | 133 | 104 | 48 | 33 | 24 | 14 | 11 | 10 | 50 | 60 | 0.41-1.00 | A-2-6 | GC | 4.9 | 25.4 | 13.3 | 12.1 | 39.20 | 32.10 | 28.70 | | | 22.87 | | |
| 418 | 40 | 21 | 17 | 128 | 72 | 46 | 31 | 21 | 15 | 9 | 129 | 73 | 46 | 31 | 21 | 15 | 9 | 10 | 50 | 60 | 0.40-1.30 | A-1a | GP-GC | 2.9 | NP | NP | NP | 69.80 | 25.00 | 5.20 | | | 42.00 | | |
| 419 | 40 | 21 | 18 | 95 | 58 | 47 | 38 | 27 | 18 | 10 | 96 | 59 | 48 | 38 | 27 | 18 | 10 | 10 | 50 | 60 | 0.56-1.35 | A-2-4 | GC | 3.2 | 24.3 | 15.4 | 8.9 | 48.20 | 36.90 | 14.90 | | | 31.01 | | |
| 420 | 41 | 23 | 19 | 247 | 136 | 59 | 35 | 26 | 20 | 11 | 243 | 134 | 58 | 34 | 26 | 20 | 11 | 10 | 50 | 60 | 0.30-0.84 | A-2-6 | GC | 6.5 | 28.4 | 14.0 | 14.4 | 41.70 | 32.80 | 25.50 | | | 16.37 | | |
| 421 | 40 | 31 | 28 | 214 | 98 | 51 | 34 | 23 | 18 | 12 | 213 | 98 | 51 | 34 | 23 | 18 | 12 | 10 | 50 | 60 | 0.62-0.98 | A-2-6 | GC | 5.7 | 24.1 | 12.7 | 11.4 | 44.10 | 38.40 | 17.50 | | | 28.27 | | |
| 422 | 40 | 31 | 23 | 239 | 130 | 67 | 46 | 39 | 25 | 16 | 240 | 131 | 67 | 46 | 39 | 25 | 16 | 10 | 50 | 60 | 0.65-1.50 | A-7-5 | SC | 5.5 | 30.2 | 16.4 | 13.8 | 20.30 | 44.00 | 35.70 | | | 14.89 | | |
| 423 | 40 | 25 | 24 | 271 | 116 | 75 | 43 | 28 | 21 | 11 | 271 | 116 | 75 | 43 | 28 | 21 | 11 | 10 | 50 | 60 | 0.37-1.45 | A-6 | SC | 4.7 | 36.2 | 18.1 | 18.1 | 22.20 | 31.90 | 45.90 | | | 14.72 | | |
| 424 | 40 | 24 | 23 | 278 | 169 | 97 | 55 | 31 | 17 | 9 | 278 | 169 | 97 | 55 | 31 | 17 | 9 | 10 | 50 | 60 | 0.38-1.38 | A-1b | SP-SC | 2.6 | NP | NP | NP | 32.10 | 57.50 | 10.40 | | | 28.79 | | |
| 425 | 41 | 25 | 22 | 102 | 72 | 49 | 30 | 21 | 17 | 10 | 101 | 71 | 48 | 30 | 21 | 17 | 10 | 10 | 50 | 60 | 0.27-1.25 | A-2-6 | GC | 2.5 | 26.5 | 14.3 | 12.2 | 51.50 | 34.10 | 14.40 | | | 25.63 | | |
| 426 | 40 | 25 | 24 | 104 | 68 | 43 | 28 | 21 | 16 | 12 | 103 | 67 | 43 | 28 | 21 | 16 | 12 | 10 | 50 | 60 | 0.35-1.50 | A-2-4 | SC | 7.9 | 22.7 | 13.1 | 9.6 | 37.70 | 38.30 | 24.00 | | | 44.24 | | |
| 427 | 40 | 26 | 25 | 140 | 95 | 61 | 44 | 29 | 20 | 16 | 140 | 95 | 61 | 44 | 29 | 20 | 16 | 10 | 50 | 60 | 0.48-1.43 | A-2-6 | GC | 5.2 | 25.6 | 13.5 | 12.1 | 46.50 | 28.90 | 24.60 | | | 27.01 | | |
| 428 | 40 | 27 | 27 | 118 | 73 | 44 | 33 | 25 | 17 | 6 | 117 | 72 | 44 | 33 | 25 | 17 | 6 | 10 | 50 | 60 | 0.63-1.50 | A-2-6 | SC | 5.3 | 26.2 | 13.0 | 13.2 | 18.40 | 51.00 | 30.60 | | | 36.80 | | |
| 429 | 41 | 27 | 24 | 217 | 109 | 46 | 26 | 19 | 15 | 11 | 213 | 107 | 45 | 25 | 19 | 15 | 11 | 10 | 50 | 60 | 0.57-1.50 | A-6 | SC | 6.6 | 26.9 | 13.6 | 13.3 | 22.80 | 38.00 | 39.20 | | | 30.50 | | |
| 430 | 40 | 33 | 29 | 167 | 89 | 43 | 33 | 20 | 17 | 11 | 167 | 89 | 43 | 33 | 20 | 17 | 11 | 10 | 50 | 60 | 0.45-1.47 | A-2-4 | GP-GC | 2.9 | 20.3 | 14.3 | 6.0 | 56.90 | 31.40 | 11.70 | | | 31.44 | | |
| 431 | 43 | 17 | 17 | 416 | 160 | 126 | 73 | 55 | 45 | 25 | 387 | 148 | 118 | 68 | 51 | 42 | 23 | 20 | 50 | 70 | 1.15 | A-7-5 | MH | 26.7 | 51.7 | 34.5 | 17.2 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 5.40 | 3.80 | | | |
| 432 | 41 | 17 | 17 | 322 | 182 | 142 | 81 | 73 | 73 | 51 | 314 | 177 | 139 | 79 | 72 | 71 | 50 | 20 | 50 | 70 | 1 | A-2-4 | GC | 7.3 | 22.2 | 15.2 | 7.0 | 45.10 | 37.20 | 17.70 | | | 15.91 | | |
| 433 | 37 | 17 | 17 | 340 | 217 | 142 | 82 | 75 | 56 | 40 | 368 | 234 | 153 | 88 | 81 | 61 | 43 | 20 | 50 | 70 | 1 | A-2-4 | GC | 5.5 | 31.8 | 21.6 | 10.2 | 59.60 | 25.40 | 15.00 | | | 52.30 | | |
| 434 | 40 | 17 | 17 | 429 | 287 | 183 | 87 | 65 | 51 | 39 | 429 | 287 | 183 | 87 | 65 | 51 | 39 | 20 | 50 | 70 | 1 | A-2-6 | GC | 11.8 | 29.4 | 21.6 | 7.9 | 52.10 | 22.10 | 25.80 | | | 31.56 | | |
| 435 | 42 | 17 | 17 | 399 | 221 | 141 | 82 | 61 | 48 | 31 | 380 | 211 | 135 | 78 | 58 | 45 | 30 | 20 | 50 | 70 | 1 | A-2-4 | GC | 11.8 | 29.4 | 21.6 | 7.9 | 52.10 | 22.10 | 25.80 | | | 31.56 | | |
| 436 | 39 | 19 | 16 | 468 | 246 | 160 | 122 | 85 | 66 | 28 | 480 | 252 | 164 | 125 | 87 | 68 | 29 | 30 | 45 | 75 | 1.10-1.70 | A-4 | CL-ML | 13.2 | 21.9 | 15.8 | 6.1 | 0.00 | 1.40 | 98.60 | 9.40 | 4.30 | | | |
| 437 | 39 | 21 | 16 | 536 | 277 | 110 | 64 | 46 | 35 | 22 | 550 | 284 | 113 | 66 | 47 | 36 | 23 | 25 | 45 | 70 | 1.7 | A-7-5 | CH | 36.4 | 59.3 | 30.0 | 29.3 | 0.00 | 0.10 | 99.90 | 5.40 | 3.60 | | | |
| 438 | 42 | 18 | 14 | 482 | 269 | 181 | 124 | 89 | 68 | 59 | 459 | 256 | 172 | 118 | 85 | 65 | 56 | 22 | 48 | 70 | 0.95-1.50 | A-7-6 | CH | 49.8 | 100.0 | 23.4 | 76.6 | 0.00 | 2.40 | 97.60 | 1.28 | 0.58 | | | |
| 439 | 42 | 19 | 27 | 232 | 176 | 123 | 81 | 76 | 43 | 35 | 219 | 166 | 116 | 76 | 72 | 41 | 33 | 21 | 89 | 110 | 1.1-1.5 | A-2-6 | SC | 33.7 | 32.0 | 17.0 | 15.0 | 32.60 | 59.70 | 7.70 | 1.09 | 0.38 | | | |
| 440 | 43 | 23 | 18 | 101 | 63 | 51 | 33 | 25 | 19 | 11 | 94 | 58 | 47 | 31 | 23 | 18 | 10 | 21 | 89 | 110 | 1.1-5 | A-7-6 | CL | 17.4 | 48.0 | 20.0 | 28.0 | 5.20 | 11.10 | 83.70 | 4.34 | 3.03 | | | |
| 441 | 42 | 23 | 17 | 232 | 118 | 89 | 72 | 52 | 38 | 25 | 220 | 112 | 85 | 68 | 49 | 36 | 24 | 20 | 60 | 36 | 0.6-1.5 | A-6 | CL | 13.5 | 36.0 | 19.0 | 17. | | | | | | | | |

| DEFLECTOMETRÍA | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | GEOTECNIA | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|---------------------------------------|-------------|------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------------------|-------|---------------|--------|--------|--------|--------|-------------------------|--------|-----------|-------|-----------------------------|--------------------------------|-----------|---------------------|--------------------------|----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-----------------|--|-----------------|----|
| Punto | Deflexiones: Datos Obtenidos en Campo | | | | | | | | | | Deflexiones Corregidas por Carga (µm) | | | | | | | Espesores de Estructura | | | | Profundidad exploración (m) | Clasificación Suelo subrasante | | Humedad Natural (%) | Límites de Atterberg (%) | | | Granulometría (%) | | | CBR, Muestra inalterada | | CBR, muestra compactada en laboratorio | | |
| | Carga | Temperatura | | Deflexiones Medidas (µm) | | | | | | Capa Asfáltica | MG-1 | MG-2 | Espesor Total | AASTHO | USCS | LL | LP | IP | Gravas | Arenas | Finos | | Humedad natural | inmersión | | Inmersión | | | | | | | | | | |
| | | Pav. | Aire | d ₀ | d ₁ | d ₂ | d ₃ | d ₄ | d ₅ | | | | | | | | | | | | | | | | | | d ₆ | d _{0c} | d _{1c} | d _{2c} | d _{3c} | d _{4c} | d _{5c} | | d _{6c} | cm |
| # | kN | °C | °C | 0 cm | 30 cm | 60 cm | 90 cm | 120 cm | 150 cm | 180 cm | 0 cm | 30 cm | 60 cm | 90 cm | 120 cm | 150 cm | 180 cm | cm | cm | cm | cm | | | | | | | | | | | | | | | |
| 478 | 42 | 18 | 13 | 114 | 87 | 64 | 45 | 30 | 29 | 21 | 109 | 83 | 61 | 43 | 29 | 28 | 20 | 15 | 95 | | 110 | 1.1-1.5 | A-6 | CL | 14.7 | 37.0 | 18.0 | 19.0 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 8.69 | 3.62 | | | |
| 479 | 42 | 19 | 14 | 191 | 138 | 93 | 50 | 45 | 34 | 28 | 181 | 131 | 88 | 47 | 43 | 32 | 27 | 40 | 30 | | 70 | 0.7-1.5 | A-7-6 | CL | 12.0 | 44.0 | 22.0 | 22.0 | 0.40 | 8.90 | 90.70 | 10.26 | 2.43 | | | |
| 480 | 43 | 19 | 14 | 89 | 51 | 39 | 31 | 26 | 17 | 15 | 83 | 47 | 36 | 29 | 24 | 16 | 14 | 27 | 43 | | 70 | 0.27-1.5 | A-1-a | GM | | NP | NP | NP | 44.40 | 39.50 | 16.10 | | | 21.60 | | |
| 481 | 42 | 22 | 18 | 118 | 91 | 74 | 62 | 56 | 47 | 29 | 113 | 88 | 71 | 60 | 54 | 45 | 28 | 7 | 93 | | 100 | 1-1.5 | A-2-6 | SC | 12.3 | 25.0 | 13.0 | 12.0 | 14.20 | 44.80 | 41.00 | 6.59 | 1.95 | | | |
| 482 | 42 | 23 | 18 | 142 | 93 | 63 | 44 | 35 | 26 | 17 | 136 | 89 | 60 | 42 | 34 | 25 | 16 | 20 | 70 | | 90 | 0.9-1.5 | A-6 | CL | 15.9 | 29.0 | 17.0 | 12.0 | 63.00 | 20.90 | 72.80 | 9.57 | 2.97 | | | |
| 483 | 41.5 | 21 | 16 | 213 | 169 | 85 | 78 | 63 | 28 | 21 | 205 | 163 | 82 | 75 | 61 | 27 | 20 | 25 | 45 | | 70 | 0.7-1.5 | A-6 | CL | 22.5 | 35.0 | 19.0 | 16.0 | 16.50 | 18.00 | 65.60 | 3.74 | 2.10 | | | |
| 484 | 41.8 | 20 | 16 | 135 | 92 | 70 | 47 | 39 | 30 | 20 | 129 | 88 | 67 | 45 | 37 | 29 | 19 | 25 | 45 | | 70 | 0.7-1.5 | A-6 | CL | 19.6 | 29.0 | 16.0 | 13.0 | 10.30 | 30.00 | 59.70 | 7.73 | 2.38 | | | |
| 485 | 42.7 | 21 | 17 | 114 | 71 | 49 | 31 | 24 | 16 | 11 | 107 | 67 | 46 | 29 | 22 | 15 | 10 | 25 | 55 | | 80 | 0.8-1.5 | A-1-a | GM | | NP | NP | NP | 56.00 | 19.20 | 24.80 | | | 37.00 | | |
| 486 | 42.5 | 22 | 20 | 1511 | 93 | 62 | 47 | 35 | 34 | 19 | 1422 | 88 | 58 | 44 | 33 | 32 | 18 | 25 | 45 | | 70 | 0.25-1.5 | A-1-a | GM | | NP | NP | NP | 64.30 | 23.50 | 12.20 | | | 41.00 | | |
| 487 | 42.4 | 22 | 18 | 151 | 79 | 45 | 41 | 32 | 23 | 14 | 142 | 75 | 42 | 39 | 30 | 22 | 13 | 22 | 18 | | 40 | 0.4-0.9 | A-1-a | GM | | NP | NP | NP | 53.40 | 22.50 | 24.10 | | | 37.90 | | |
| 488 | 41.8 | 22 | 18 | 167 | 134 | 95 | 83 | 37 | 29 | 23 | 160 | 128 | 91 | 79 | 35 | 28 | 22 | 23 | 67 | | 90 | 0.9-1.5 | A-6 | CL | 22.8 | 40.0 | 21.0 | 19.0 | 1.90 | 16.50 | 81.60 | 6.91 | 2.97 | | | |
| 489 | 41.4 | 21 | 16 | 122 | 88 | 65 | 43 | 32 | 23 | 13 | 118 | 85 | 63 | 42 | 31 | 22 | 13 | 23 | 67 | | 90 | 0.9-1.5 | A-6 | CL | 19.8 | 34.0 | 17.0 | 17.0 | 22.00 | 12.60 | 85.20 | 10.69 | 2.64 | | | |
| 490 | 41 | 20 | 17 | 147 | 58 | 49 | 31 | 25 | 19 | 15 | 143 | 57 | 48 | 30 | 24 | 19 | 15 | 30 | 60 | | 90 | 0.9-1.5 | A-6 | CL | 18.3 | 33.0 | 19.0 | 14.0 | 3.20 | 12.70 | 84.10 | 4.93 | 1.94 | | | |
| 491 | 41.9 | 21 | 17 | 119 | 82 | 58 | 41 | 34 | 28 | 23 | 114 | 78 | 55 | 39 | 32 | 27 | 22 | 20 | 50 | | 70 | 0.7-1.5 | A-7-6 | CL | 21.3 | 46.0 | 21.0 | 25.0 | 1.50 | 4.90 | 93.60 | 3.74 | 2.43 | | | |
| 492 | 41.7 | 21 | 13 | 124 | 89 | 68 | 45 | 40 | 33 | 21 | 119 | 85 | 65 | 43 | 38 | 32 | 20 | 40 | 50 | | 90 | 0.9-1.5 | A-7-6 | CL | 18.6 | 48.0 | 20.0 | 28.0 | 5.00 | 14.50 | 80.50 | 6.61 | 3.37 | | | |
| 493 | 41.3 | 23 | 18 | 245 | 131 | 95 | 56 | 45 | 38 | 37 | 237 | 127 | 92 | 54 | 44 | 37 | 36 | 30 | 60 | | 90 | 0.9-1.5 | A-4 | ML | 19.7 | | | | 9.60 | 38.10 | 52.30 | 3.89 | 0.97 | | | |
| 494 | 40.7 | 22 | 18 | 285 | 149 | 90 | 74 | 65 | 28 | 11 | 280 | 146 | 88 | 73 | 64 | 28 | 11 | 30 | 20 | | 50 | 0.5-1.5 | A-3 | SM | 9.3 | NP | NP | NP | 4.70 | 81.80 | 13.50 | | | 17.20 | | |
| 495 | 42.1 | 30 | 28 | 105 | 39 | 33 | 24 | 15 | 10 | 9 | 100 | 37 | 31 | 23 | 14 | 10 | 9 | 30 | 40 | | 70 | 0.3-0.8 | A-1-a | GM | | NP | NP | NP | 52.50 | 29.70 | 17.80 | | | 35.20 | | |
| 496 | 42.7 | 30 | 28 | 64 | 34 | 28 | 23 | 18 | 14 | 11 | 60 | 32 | 26 | 22 | 17 | 13 | 10 | 30 | 40 | | 70 | 0.3-1.3 | A-1-a | GM | | NP | NP | NP | 61.40 | 25.00 | 13.60 | | | 47.70 | | |
| 497 | 42.3 | 26 | 22 | 142 | 106 | 71 | 62 | 44 | 37 | 28 | 134 | 100 | 67 | 59 | 42 | 35 | 26 | 40 | 30 | | 70 | 0.4-1.5 | A-1-a | GM | | NP | NP | NP | 50.40 | 35.70 | 13.90 | | | 35.30 | | |
| 498 | 42.8 | 24 | 21 | 112 | 68 | 48 | 36 | 29 | 22 | 14 | 105 | 64 | 45 | 34 | 27 | 21 | 13 | 30 | 40 | | 70 | 0.3-1.5 | A-1-a | SM | 7.6 | NP | NP | NP | 39.70 | 44.30 | 16.00 | | | 49.90 | | |
| 499 | 41.3 | 27 | 25 | 291 | 173 | 92 | 58 | 42 | 34 | 29 | 282 | 168 | 89 | 56 | 41 | 33 | 28 | 30 | 40 | | 70 | 0.3-1.3 | A-1-b | GM | | NP | NP | NP | 35.30 | 32.10 | 32.60 | | | 50.90 | | |
| 500 | 42.2 | 29 | 24 | 184 | 79 | 62 | 39 | 32 | 28 | 23 | 174 | 75 | 59 | 37 | 30 | 27 | 22 | 20 | 70 | | 90 | 0.9-1.5 | A-1-a | GP-GM | | NP | NP | NP | 46.70 | 41.90 | 11.40 | | | 27.30 | | |
| 501 | 41.6 | 29 | 26 | 254 | 110 | 58 | 40 | 35 | 29 | 21 | 244 | 106 | 56 | 38 | 34 | 28 | 20 | 25 | 45 | | 70 | 0.7-1.5 | A-1-b | SM | 8.7 | NP | NP | NP | 14.60 | 72.70 | 12.70 | | | 18.80 | | |

**ANEXO 2. CERTIFICADOS DE CALIBRACIÓN DEFLECTÓMETRO DE
IMPACTO**

KUAB Konsult & Utveckling AB

Calibration Certificate

The Falling Weight Deflectometer (FWD) with serial number FV832, manufactured by KUAB Konsult & Utveckling AB in Sweden, was in October 2011 calibrated by KUAB's personnel.

After the calibration the FWD FV832 measures with the same accuracy as a new KUAB FWD, and meets all relevant standards, including but not limited to ASTM standard D4694.

Rättvik 2011 10 07
KUAB Konsult & Utveckling AB



Olle Tholén

KUAB Konsult & Utveckling AB
Box 10, 795 21 RÄTTVIK, Sweden
Tel. int. +46 248 130 24
Fax int. +46 248 137 54
e-mail: all@kuab.se

Postal address

Box 10
S-795 21 Rättvik
Sweden

Telephone

Nat 0248 13024
Int +46 248 13024

e-mail/Telefax

all@kuab.se
+46 248 13754

Visiting address

Faluvägen 6
S-795 35 Rättvik
Sweden

VAT number

SE556311352001

KUAB Konsult & Utveckling AB

Calibration Certificate

The Falling Weight Deflectometer (FWD) with serial number FV071, manufactured by KUAB Konsult & Utveckling AB in Sweden, was in October 2011 calibrated by KUAB's personnel.

After the calibration the FWD FV071 measures with the same accuracy as a new KUAB FWD, and meets all relevant standard, including but not limited to ASTM standard D4694.

Rättvik 2011 10 07
KUAB Konsult & Utveckling AB



Olle Tholén

KUAB Konsult & Utveckling AB

Box 10, 795 21 RÄTTVIK, Sweden

Tel. int. +46 248 130 24

Fax int. +46 248 137 54

e-mail: all@kuab.se

Postal address

Box 10
S-795 21 Rättvik
Sweden

Telephone

Nat 0248 13024
Int +46 248 13024

e-mail/Telefax

all@kuab.se
+46 248 13754

Visiting address

Faluvägen 6
S-795 35 Rättvik
Sweden

VAT number

SE556311352001

KUAB Konsult & Utveckling AB

Calibration certificate

The Falling Weight Deflectometer (FWD) with serial number FV832, manufactured by KUAB Konsult & Utveckling AB in Sweden, was in March 2013 calibrated by KUAB's personnel. The load and deflection sensors of FWD FV832 measures with the same accuracy as a new KUAB FWD, and meets all relevant standards, including but not limited to ASTM standard D4694.

Bogota 2013 03 17

KUAB Konsult & Utveckling AB



Olle Tholén

President of KUAB, Dr Techn

Postal address

Box 10
S-795 21 Rättvik
Sweden

Telephone

Nat. 0248 13024
Int. +46 248 13024

e-mail/Telefax

all@kuab.se
+46 248 13754

Visiting address

Fällvägen 6
S-795 35 Rättvik
Sweden

VAT number

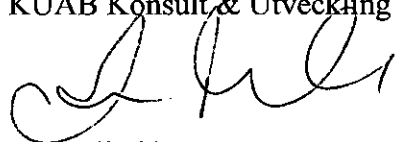
SE5566311352001

KUAB Konsult & Utveckling AB

Calibration certificate

The Falling Weight Deflectometer (FWD) with serial number FV832, manufactured by KUAB Konsult & Utveckling AB in Sweden, was in February 2014 calibrated by KUAB's personnel. The load and deflection sensors of FWD FV832 measures with the same accuracy as a new KUAB FWD, and meets all relevant standards, including but not limited to ASTM standard D4694.

Bogota 2014 04 15
KUAB Konsult & Utveckling AB



Anna Tholén

KUAB Konsult & Utveckling AB
Box 10, 795 21 RÄTTVIK, Sweden
Tel. int. +46 248 130 24
Fax int. +46 248 137 54
e-mail: all@kuab.se

Postal address

Box 10
S-795 21 Rättvik
Sweden

Telephone

Nat 0248 13024
Int +46 248 13024

e-mail/Telefax

all@kuab.se
+46 248 13754

Visiting address

Faluvägen 6
S-795 35 Rättvik
Sweden

VAT number

SE556311352001

Calibration Certificate

The Falling Weight Deflectometer (FWD) with serial number FV832, manufactured by KUAB Konsult & Utveckling AB in Sweden, was in February 2015 calibrated by KUAB's personnel.

After the calibration the FWD FV832 measures with the same accuracy as a new KUAB FWD, and meets all relevant standard, including but not limited to ASTM standard D4694.

2015 08 27
KUAB Konsult & Utveckling AB

Olle Tholén



FWD Calibration

Date of Calibration: 31-mar-2018

Calibration Center: GeoSense SAS

Calibration Center Operator: MIGUEL SAUMETT

Signature

FWD Owner: ITINERIS_FWD50

FWD Manufacturer: KUAB

FWD Model: model FWD50

FWD Serial Number: FV832

FWD Operator: LUIS MIGUEL BELEÑO

Reference Load Cell: HS009

Reference Accelerometer: SN 24066

WinFWDCal Software: Version 2.2.12

LOAD CELL CALIBRATION

| Serial Number | Initial Gain | Reference Gains | | Average Gain | Final Gain |
|---------------|--------------|-----------------|-------|--------------|--------------|
| | | 1 | 2 | | |
| 329010 | 1.000 | 0.987 | 0.994 | 0.990 | 0.990 |

DEFLECTION SENSOR CALIBRATION

| Serial Number | Initial Gain | Reference Gains | | Relative Gains | | Final Gain |
|---------------|--------------|-----------------|-------|----------------|-------|------------|
| | | 1 | 2 | 1 | 2 | |
| | | 9101 | 0.999 | 1.030 | 1.030 | |
| 9102 | 0.994 | 1.016 | 1.016 | 0.992 | 0.996 | 0.994 |
| 9103 | 1.009 | 1.042 | 1.042 | 1.041 | 1.047 | 1.044 |
| 9104 | 1.004 | 0.999 | 0.999 | 1.001 | 1.000 | 1.000 |
| 9105 | 0.997 | 0.969 | 0.969 | 0.967 | 0.962 | 0.965 |
| 9106 | 0.996 | 0.996 | 0.996 | 1.006 | 1.002 | 1.004 |
| 9107 | 1.004 | 0.947 | 0.947 | 0.959 | 0.955 | 0.957 |

Messages:

Load Cell:

All data checks passed

Sensor Reference Calibration:

Reference Calibrations Accepted.

Reference Trial Acceptance Criteria Met.

Sensor Relative Calibration:

Sensor Calibration Completed!

Final Acceptance Criteria are met for all sensors.



FWD Calibration

Date of Calibration: 05-abr-2019

Calibration Center: GeoSense SAS
Calibration Center Operator: MIGUEL SAUMETT

Signature



FWD Owner: ITINERIS_FWD50
FWD Manufacturer: KUAB
FWD Model: FWD50
FWD Serial Number: FV832
FWD Operator: LUIS MIGUEL BELEÑO

Reference Load Cell: HS009
Reference Accelerometer: SN 24066
WinFWDCal Software: Version 2.2.12

LOAD CELL CALIBRATION

| Serial Number | Initial Gain | Reference Gains | | | Average Gain | Final Gain |
|---------------|--------------|-----------------|-------|-------|--------------|--------------|
| | | 1 | 2 | 3 | | |
| 329010 | 0.990 | 0.977 | 0.977 | 0.977 | 0.977 | 0.977 |

DEFLECTION SENSOR CALIBRATION

| Serial Number | Initial Gain | Reference Gains | | Relative Gains | | Final Gain |
|---------------|--------------|-----------------|-------|----------------|-------|------------|
| | | 1 | 2 | 1 | 2 | |
| 9101 | 1.067 | 1.074 | 1.074 | 1.076 | 1.058 | 1.067 |
| 9102 | 1.011 | 1.019 | 1.019 | 1.002 | 1.021 | 1.011 |
| 9103 | 1.038 | 1.031 | 1.031 | 1.039 | 1.036 | 1.038 |
| 9104 | 1.017 | 1.027 | 1.027 | 1.012 | 1.021 | 1.017 |
| 9105 | 1.016 | 1.050 | 1.050 | 1.020 | 1.012 | 1.016 |
| 9106 | 1.040 | 1.063 | 1.063 | 1.031 | 1.048 | 1.039 |
| 9107 | 0.830 | 0.771 | 0.771 | 0.837 | 0.824 | 0.830 |

Messages:

Load Cell:

All data checks passed

Sensor Reference Calibration:

Reference Calibrations Accepted.

Reference Trial Acceptance Criteria Met.

Sensor Relative Calibration:

Sensor Calibration Completed!

Final Acceptance Criteria are met for all sensors.

Calibration Certificate

The Heavy Weight Deflectometer (HWD) with serial number FV943, manufactured by KUAB Konsult & Utveckling AB in Sweden, was in February 2015 calibrated by KUAB's personnel.

After the calibration the FWD FV943 measures with the same accuracy as a new KUAB HWD, and meets all relevant standard, including but not limited to ASTM standard D4694.

2015 08 27
KUAB Konsult & Utveckling AB

Olle Tholén

KUAB Konsult & Utveckling AB

Calibration Certificate

The Heavy Weight Deflectometer (HWD) with serial number FV943, manufactured by KUAB Konsult & Utveckling AB in Sweden, was in February 2016 calibrated by KUAB's personnel.

After the calibration the FWD FV943 measures with the same accuracy as a new KUAB HWD, and meets all relevant standard, including but not limited to ASTM standard D4694.

2016 02 27

KUAB Konsult & Utveckling AB



Olle Tholén

KUAB Konsult & Utveckling AB
Box 10, 795 21 RÄTTVIK, Sweden
Tel. int. +46 248 130 24
Fax int. +46 248 137 54
e-mail: all@kuab.se

Postal address

Box 10
S-795 21 Rättvik
Sweden

Telephone

Nat 0248 13024
Int +46 248 13024

e-mail/Telefax

all@kuab.se
+46 248 13754

Visiting address

Faluvägen 6
S-795 35 Rättvik
Sweden

VAT number

SE556311352001

FWD Calibration



Date of Calibration: 17-mar-2017

Calibration Center: GeoSense SAS

Calibration Center Operator: MIGUEL SAUMETT

Signature

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Miguel Saumett', written over a horizontal line.

FWD Owner: ITINERIS_FWD_FV943

FWD Manufacturer: KUAB

FWD Model: model 240 type endswitches

FWD Serial Number: FV943

FWD Operator: LUIS MIGUEL BELEÑO

Reference Load Cell: HS009

Reference Accelerometer: SN 24066

WinFWDCal Software: Version 2.2.12

LOAD CELL CALIBRATION

| Serial Number | Initial Gain | Reference Gains | | Average Gain | Final Gain |
|---------------|--------------|-----------------|-------|--------------|------------|
| | | 1 | 2 | | |
| 329010 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |

Messages:

Load Cell:

All data checks passed

KUAB STATIC SEISMOMETER CALIBRATION OUTPUT FILE

Date: 05/03/2017

Time: 10:13:16 p.m.

A/D converter bit value: N/A mV/bit

Calibration factor for seismometer 0 = **0.485448** $\mu\text{m/mV}$
 Calibration factor for seismometer 1 = **0.466483** $\mu\text{m/mV}$
 Calibration factor for seismometer 2 = **0.477856** $\mu\text{m/mV}$
 Calibration factor for seismometer 3 = **0.479438** $\mu\text{m/mV}$
 Calibration factor for seismometer 4 = **0.484411** $\mu\text{m/mV}$
 Calibration factor for seismometer 5 = **0.473603** $\mu\text{m/mV}$
 Calibration factor for seismometer 6 = **0.477645** $\mu\text{m/mV}$
 Calibration factor for seismometer 7 = **0.485639** $\mu\text{m/mV}$
 Calibration factor for seismometer 8 = **0.474229** $\mu\text{m/mV}$

| | D0 | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 | D7 | D8 |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | S0 | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 |
| Voltage at 3.3 | -3183 | -95 | -3545 | 478 | -2464 | -2640 | -2902 | -2675 | -2385 |
| Voltage at 3.5 | -2665 | -92 | -3031 | 477 | -1944 | -2115 | -2378 | -2163 | -1859 |

| | | | | | | | | | |
|----------|------|-----|------|-----|------|------|------|------|------|
| Position | 5.25 | 0 | 5.25 | 0 | 5.25 | 5.25 | 5.25 | 5.25 | 5.25 |
| Voltage | 945 | -85 | 649 | 474 | 1686 | 1609 | 1312 | 1463 | 1852 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-------|-----|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|-------|---|------|------|------|------|------|
| Voltage at 3.25 | -2155 | -82 | -3553 | 471 | -2473 | -2651 | -2912 | -2686 | -2394 | | | | | | | | | |
| Voltage at 3.75 | -2156 | -82 | -2508 | 476 | -1432 | -1588 | -1862 | -1653 | -1335 | -1045 | 0 | -1196 | 0 | -690 | -748 | -884 | -799 | -630 |
| Voltage at 4.25 | -2156 | -82 | -1457 | 472 | -391 | -517 | -802 | -616 | -270 | -1045 | 0 | -695 | 0 | -188 | -243 | -380 | -298 | -128 |
| Voltage at 4.75 | -2157 | -80 | -402 | 466 | 649 | 552 | 260 | 426 | 795 | -1045 | 0 | -192 | 0 | 313 | 260 | 123 | 206 | 375 |
| Voltage at 5.25 | -1201 | -82 | 653 | 476 | 1688 | 1615 | 1314 | 1464 | 1853 | -582 | 0 | 312 | 0 | 814 | 760 | 624 | 708 | 875 |
| Voltage at 5.75 | -1201 | -81 | 1706 | 478 | 3756 | 2673 | 2369 | 2496 | 2910 | -582 | 0 | 814 | 0 | 1810 | 1258 | 1124 | 1207 | 1374 |
| Voltage at 6.25 | -1202 | -76 | 2752 | 475 | 3756 | 3724 | 3419 | 3529 | 3957 | -582 | 0 | 1312 | 0 | 1811 | 1753 | 1623 | 1706 | 1868 |
| Voltage at 6.75 | -1202 | -80 | 3788 | 473 | 5785 | 4761 | 4459 | 4546 | 4995 | -582 | 0 | 1806 | 0 | 2789 | 2241 | 2116 | 2198 | 2358 |
| Voltage at 7.25 | -1202 | -79 | 4812 | 475 | 5786 | 5780 | 5483 | 5554 | 6020 | -582 | 0 | 2295 | 0 | 2789 | 2721 | 2602 | 2685 | 2842 |

Calibration factor for seismometer 0 = **0.483384**
 Calibration factor for seismometer 2 = **0.476913**
 Calibration factor for seismometer 4 = **0.481170**
 Calibration factor for seismometer 5 = **0.470699**
 Calibration factor for seismometer 6 = **0.474586**
 Calibration factor for seismometer 7 = **0.483371**
 Calibration factor for seismometer 8 = **0.472056**

After the calibration the FWD FV943 measures with the same accuracy as a new KUAB HWD, and meets all relevant standard, including but not limited to ASTM standard D4694.

FWD Calibration



Date of Calibration: 2-abril-2018

Calibration Center: GeoSense SAS

Calibration Center Operator: MIGUEL SAUMETT

Signature

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Miguel Saumett', written over a horizontal line.

FWD Owner: ITINERIS_FWD_FV943

FWD Manufacturer: KUAB

FWD Model: model 240 type endswitches

FWD Serial Number: FV943

FWD Operator: YEISON SUAZA JAQUE

Reference Load Cell: HS009

Reference Accelerometer: SN 24066

WinFWDCal Software: Version 2.2.12

LOAD CELL CALIBRATION

| Serial Number | Initial Gain | Reference Gains | | Average Gain | Final Gain |
|---------------|--------------|-----------------|-------|--------------|------------|
| | | 1 | 2 | | |
| 329010 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |

Messages:

Load Cell:

All data checks passed

KUAB STATIC SEISMOMETER CALIBRATION OUTPUT FILE

Date: 02/04/2018

Time: 11:23:20 a.m.

A/D converter bit value: N/A mV/bit

Calibration factor for seismometer 0 = **0.465448** $\mu\text{m/mV}$
 Calibration factor for seismometer 1 = **0.456483** $\mu\text{m/mV}$
 Calibration factor for seismometer 2 = **0.467856** $\mu\text{m/mV}$
 Calibration factor for seismometer 3 = **0.459438** $\mu\text{m/mV}$
 Calibration factor for seismometer 4 = **0.464411** $\mu\text{m/mV}$
 Calibration factor for seismometer 5 = **0.453603** $\mu\text{m/mV}$
 Calibration factor for seismometer 6 = **0.467645** $\mu\text{m/mV}$
 Calibration factor for seismometer 7 = **0.465639** $\mu\text{m/mV}$
 Calibration factor for seismometer 8 = **0.454229** $\mu\text{m/mV}$

| | D0 | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 | D7 | D8 |
|----------------|-------|-----|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| | S0 | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 |
| Voltage at 3.3 | -3183 | -95 | -3545 | 478 | -2464 | -2640 | -2902 | -2675 | -2385 |
| Voltage at 3.5 | -2665 | -92 | -3031 | 477 | -1944 | -2115 | -2378 | -2163 | -1859 |

| | | | | | | | | | |
|----------|------|-----|------|-----|------|------|------|------|------|
| Position | 5.25 | 0 | 5.25 | 0 | 5.25 | 5.25 | 5.25 | 5.25 | 5.25 |
| Voltage | 945 | -85 | 649 | 474 | 1686 | 1609 | 1312 | 1463 | 1852 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-------|-----|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|-------|---|------|------|------|------|------|
| Voltage at 3.25 | -2155 | -82 | -3553 | 471 | -2473 | -2651 | -2912 | -2686 | -2394 | | | | | | | | | |
| Voltage at 3.75 | -2156 | -82 | -2508 | 476 | -1432 | -1588 | -1862 | -1653 | -1335 | -1045 | 0 | -1196 | 0 | -690 | -748 | -884 | -799 | -630 |
| Voltage at 4.25 | -2156 | -82 | -1457 | 472 | -391 | -517 | -802 | -616 | -270 | -1045 | 0 | -695 | 0 | -188 | -243 | -380 | -298 | -128 |
| Voltage at 4.75 | -2157 | -80 | -402 | 466 | 649 | 552 | 260 | 426 | 795 | -1045 | 0 | -192 | 0 | 313 | 260 | 123 | 206 | 375 |
| Voltage at 5.25 | -1201 | -82 | 653 | 476 | 1688 | 1615 | 1314 | 1464 | 1853 | -582 | 0 | 312 | 0 | 814 | 760 | 624 | 708 | 875 |
| Voltage at 5.75 | -1201 | -81 | 1706 | 478 | 3756 | 2673 | 2369 | 2496 | 2910 | -582 | 0 | 814 | 0 | 1810 | 1258 | 1124 | 1207 | 1374 |
| Voltage at 6.25 | -1202 | -76 | 2752 | 475 | 3756 | 3724 | 3419 | 3529 | 3957 | -582 | 0 | 1312 | 0 | 1811 | 1753 | 1623 | 1706 | 1868 |
| Voltage at 6.75 | -1202 | -80 | 3788 | 473 | 5785 | 4761 | 4459 | 4546 | 4995 | -582 | 0 | 1806 | 0 | 2789 | 2241 | 2116 | 2198 | 2358 |
| Voltage at 7.25 | -1202 | -79 | 4812 | 475 | 5786 | 5780 | 5483 | 5554 | 6020 | -582 | 0 | 2295 | 0 | 2789 | 2721 | 2602 | 2685 | 2842 |

Calibration factor for seismometer 0 = **0.483384**
 Calibration factor for seismometer 2 = **0.476913**
 Calibration factor for seismometer 4 = **0.481170**
 Calibration factor for seismometer 5 = **0.470699**
 Calibration factor for seismometer 6 = **0.474586**
 Calibration factor for seismometer 7 = **0.483371**
 Calibration factor for seismometer 8 = **0.472056**

After the calibration the FWD FV943 measures with the same accuracy as a new KUAB HWD, and meets all relevant standard, including but not limited to ASTM standard D4694.



FWD Calibration

Date of Calibration: 23-abr-2019

Calibration Center: GeoSense SAS
Calibration Center Operator: MIGUEL SAUMETT



Signature

FWD Owner: PAVINFRA_HWD240
FWD Manufacturer: KUAB
FWD Model: model HWD-240
FWD Serial Number: FV943
FWD Operator: LUIS MIGUEL BELEÑO

Reference Load Cell: HS009
Reference Accelerometer: SN 24066
WinFWDCal Software: Version 2.2.12

LOAD CELL CALIBRATION

| Serial Number | Initial Gain | Reference Gains | | | Average Gain | Final Gain |
|---------------|--------------|-----------------|-------|-------|--------------|--------------|
| | | 1 | 2 | 3 | | |
| 329010 | 1.000 | 1.003 | 1.007 | 1.009 | 1.006 | 1.006 |

DEFLECTION SENSOR CALIBRATION

| Serial Number | Initial Gain | Reference Gains | | | | Relative Gains | | Final Gain |
|---------------|--------------|-----------------|-------|-------|-------|----------------|-------|------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | |
| 9201 | 0.973 | 0.949 | 0.951 | 0.946 | 0.946 | 0.974 | 0.972 | 0.973 |
| 9202 | 0.972 | 0.938 | 0.934 | 0.937 | 0.938 | 0.972 | 0.973 | 0.972 |
| 9203 | 0.951 | 0.924 | 0.928 | 0.930 | 0.927 | 0.949 | 0.953 | 0.951 |
| 9204 | 0.874 | 0.858 | 0.851 | 0.856 | 0.853 | 0.875 | 0.873 | 0.874 |
| 9205 | 0.966 | 0.965 | 0.965 | 0.957 | 0.959 | 0.964 | 0.968 | 0.966 |
| 9206 | 0.466 | 0.463 | 0.457 | 0.456 | 0.455 | 0.467 | 0.464 | 0.466 |
| 9207 | 0.975 | 0.940 | 0.942 | 0.948 | 0.944 | 0.975 | 0.976 | 0.975 |

Messages:

Load Cell:

All data checks passed

Sensor Reference Calibration:

Reference Calibrations Accepted.

Reference Trial Acceptance Criteria Met.

Sensor Relative Calibration:

Final Acceptance Criteria are met for all sensors.

**ANEXO 3 MÓDULOS DE LA SUBRASANTE DETERMINADOS A PARTIR DE
LA DEFLECTOMETRÍA**

| Punto | Deflexiones: Datos Obtenidos en Campo | | | | | | | | | | Deflexiones Corregidas por Carga (μm) | | | | | | Espesores de Estructura | | | | Parámetros Estructurales AASHTO | | Cálculo de Módulos Método Directo | | | Verificación r, Metodología AASHTO | | | | | |
|-------|---------------------------------------|-------------|------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------|------|---------------|----|---------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|-------|-------------------------|------------------------------------|----------------------|-----|---------|--|--|
| | Carga | Temperatura | | Deflexiones Medidas (μm) | | | | | | Capa Asfáltica | | | | | | | MG-1 | MG-2 | Espesor Total | Mr | Mr | Hogg | | | | | | | | | |
| | | Pav. | Aire | d ₀ | d ₁ | d ₂ | d ₃ | d ₄ | d ₅ | | d ₆ | d _{0c} | d _{1c} | d _{2c} | d _{3c} | d _{4c} | | | | | | d _{5c} | d _{6c} | SR | Deflexión (Dr/DO = 0.5) | Sensor Dr (cm) | Sensor empleado (cm) | r | Cumple? | | |
| # | kN | °C | °C | 0 cm | 30 cm | 60 cm | 90 cm | 120 cm | 150 cm | 180 cm | 0 cm | 30 cm | 60 cm | 90 cm | 120 cm | 150 cm | 180 cm | cm | cm | cm | cm | (Kg/cm ²) | MPa | (MPa) | | | | | | | |
| 1 | 39 | 25 | 25 | 785 | 467 | 182 | 85 | 55 | 43 | 37 | 797 | 474 | 185 | 86 | 56 | 44 | 38 | 15 | 35 | | 50 | 978 | 96 | 67 | 375 | 60 | 60 | 46 | Si | | |
| 2 | 40 | 25 | 25 | 530 | 260 | 56 | 22 | 14 | 10 | 8 | 531 | 261 | 56 | 22 | 14 | 10 | 8 | 18 | 20 | | 38 | 2901 | 285 | 118 | 247 | 30 | 60 | 27 | Si | | |
| 3 | 39 | 27 | 27 | 605 | 411 | 155 | 84 | 49 | 32 | 22 | 621 | 422 | 159 | 86 | 50 | 33 | 23 | 14 | 22 | | 36 | 1138 | 112 | 82 | 287 | 60 | 60 | 37 | Si | | |
| 4 | 41 | 26 | 21 | 319 | 208 | 123 | 71 | 47 | 37 | 26 | 308 | 201 | 119 | 69 | 45 | 36 | 25 | 15 | 63 | | 78 | 1569 | 154 | 126 | 143 | 60 | 90 | 84 | Si | | |
| 5 | 41 | 26 | 20 | 343 | 257 | 193 | 147 | 118 | 101 | 81 | 338 | 253 | 190 | 145 | 116 | 100 | 80 | 20 | 45 | | 66 | 780 | 77 | 71 | 155 | 90 | 120 | 99 | Si | | |
| 6 | 41 | 14 | 14 | 303 | 247 | 201 | 154 | 116 | 92 | 72 | 294 | 240 | 195 | 150 | 113 | 89 | 70 | 28 | 69 | | 97 | 813 | 80 | 66 | 169 | 120 | 150 | 127 | Si | | |
| 7 | 41 | 16 | 15 | 286 | 238 | 200 | 157 | 127 | 105 | 84 | 280 | 233 | 196 | 154 | 125 | 103 | 82 | 29 | 65 | | 94 | 703 | 69 | 62 | 155 | 120 | 150 | 138 | Si | | |
| 8 | 41 | 25 | 20 | 282 | 222 | 172 | 122 | 83 | 60 | 45 | 277 | 218 | 169 | 120 | 82 | 59 | 44 | 23 | 50 | | 73 | 1104 | 108 | 85 | 127 | 90 | 120 | 100 | Si | | |
| 9 | 41 | 21 | 21 | 147 | 107 | 77 | 49 | 32 | 21 | 13 | 144 | 105 | 75 | 48 | 31 | 21 | 13 | 23 | 50 | | 73 | 2919 | 286 | 200 | 70 | 90 | 120 | 83 | Si | | |
| 10 | 39 | 32 | 31 | 184 | 120 | 79 | 52 | 34 | 26 | 19 | 187 | 122 | 80 | 53 | 35 | 26 | 19 | 25 | 90 | | 115 | 2784 | 273 | 191 | 76 | 60 | 150 | 124 | Si | | |
| 11 | 40 | 29 | 29 | 253 | 124 | 60 | 30 | 18 | 13 | 11 | 255 | 125 | 60 | 30 | 18 | 13 | 11 | 25 | 90 | | 115 | 5027 | 493 | 246 | 108 | 30 | 120 | 86 | Si | | |
| 12 | 40 | 27 | 27 | 136 | 59 | 34 | 21 | 15 | 12 | 10 | 137 | 60 | 34 | 21 | 15 | 12 | 10 | 12 | 85 | | 97 | 5745 | 564 | 516 | 64 | 30 | 90 | 85 | Si | | |
| 13 | 40 | 27 | 26 | 161 | 73 | 41 | 23 | 16 | 12 | 8 | 162 | 73 | 41 | 23 | 16 | 12 | 8 | 20 | 70 | | 90 | 5246 | 515 | 419 | 72 | 30 | 90 | 78 | Si | | |
| 14 | 40 | 27 | 27 | 163 | 92 | 55 | 29 | 15 | 13 | 11 | 164 | 92 | 55 | 29 | 15 | 13 | 11 | 17 | 56 | | 73 | 4160 | 408 | 262 | 75 | 60 | 90 | 70 | Si | | |
| 15 | 40 | 27 | 26 | 192 | 93 | 50 | 30 | 19 | 16 | 13 | 192 | 93 | 50 | 30 | 19 | 16 | 13 | 15 | 88 | | 103 | 4762 | 467 | 330 | 89 | 30 | 120 | 85 | Si | | |
| 16 | 40 | 26 | 27 | 129 | 73 | 49 | 31 | 19 | 12 | 8 | 130 | 73 | 49 | 31 | 19 | 12 | 8 | 14 | 90 | | 104 | 4762 | 467 | 303 | 61 | 60 | 120 | 100 | Si | | |
| 17 | 41 | 27 | 26 | 238 | 145 | 90 | 56 | 38 | 27 | 20 | 235 | 143 | 89 | 55 | 38 | 27 | 20 | 16 | 91 | | 107 | 2381 | 234 | 168 | 107 | 60 | 120 | 107 | Si | | |
| 18 | 40 | 29 | 25 | 254 | 105 | 52 | 30 | 22 | 19 | 16 | 254 | 105 | 52 | 30 | 22 | 19 | 16 | 16 | 54 | | 70 | 4022 | 395 | 289 | 114 | 30 | 90 | 57 | Si | | |
| 19 | 40 | 29 | 25 | 277 | 134 | 68 | 44 | 35 | 31 | 27 | 278 | 135 | 68 | 44 | 35 | 31 | 27 | 23 | 130 | | 153 | 2234 | 219 | 228 | 120 | 30 | 180 | 148 | Si | | |
| 20 | 40 | 31 | 29 | 362 | 146 | 51 | 24 | 15 | 13 | 12 | 365 | 147 | 51 | 24 | 15 | 13 | 12 | 18 | 90 | | 108 | 5027 | 493 | 206 | 158 | 30 | 90 | 71 | Si | | |
| 21 | 40 | 27 | 26 | 148 | 56 | 28 | 19 | 15 | 13 | 11 | 148 | 56 | 28 | 19 | 15 | 13 | 11 | 18 | 120 | | 138 | 6032 | 592 | 532 | 67 | 30 | 120 | 115 | Si | | |
| 22 | 40 | 30 | 25 | 225 | 112 | 62 | 36 | 24 | 19 | 17 | 227 | 113 | 62 | 36 | 24 | 19 | 17 | 19 | 45 | | 64 | 3351 | 329 | 272 | 99 | 30 | 90 | 60 | Si | | |
| 23 | 40 | 30 | 25 | 232 | 123 | 63 | 34 | 23 | 19 | 16 | 231 | 123 | 63 | 34 | 23 | 19 | 16 | 11 | 100 | | 111 | 3934 | 386 | 212 | 106 | 60 | 120 | 92 | Si | | |
| 24 | 40 | 30 | 26 | 248 | 132 | 64 | 35 | 24 | 20 | 16 | 248 | 132 | 64 | 35 | 24 | 20 | 16 | 18 | 41 | | 59 | 3447 | 338 | 204 | 109 | 60 | 90 | 53 | Si | | |
| 25 | 40 | 24 | 26 | 195 | 103 | 56 | 32 | 21 | 19 | 14 | 195 | 103 | 56 | 32 | 21 | 19 | 14 | 18 | 102 | | 120 | 4309 | 423 | 244 | 92 | 60 | 120 | 101 | Si | | |
| 26 | 40 | 25 | 27 | 265 | 142 | 79 | 53 | 39 | 35 | 28 | 267 | 143 | 80 | 53 | 39 | 35 | 28 | 12 | 56 | | 68 | 2276 | 223 | 174 | 127 | 60 | 90 | 67 | Si | | |
| 27 | 40 | 25 | 27 | 190 | 79 | 37 | 21 | 14 | 12 | 10 | 190 | 79 | 37 | 21 | 14 | 12 | 10 | 19 | 62 | | 81 | 5745 | 564 | 384 | 88 | 30 | 90 | 63 | Si | | |
| 28 | 40 | 26 | 26 | 234 | 106 | 56 | 31 | 22 | 17 | 13 | 236 | 107 | 57 | 31 | 22 | 17 | 13 | 18 | 49 | | 67 | 3892 | 382 | 287 | 110 | 30 | 90 | 56 | Si | | |
| 29 | 40 | 27 | 26 | 196 | 97 | 50 | 30 | 22 | 19 | 16 | 196 | 97 | 50 | 30 | 22 | 19 | 16 | 17 | 50 | | 74 | 4022 | 395 | 316 | 89 | 30 | 90 | 66 | Si | | |
| 30 | 40 | 27 | 27 | 247 | 131 | 77 | 51 | 38 | 31 | 27 | 248 | 131 | 77 | 51 | 38 | 31 | 27 | 18 | 64 | | 82 | 2366 | 232 | 182 | 113 | 60 | 90 | 82 | Si | | |
| 31 | 40 | 24 | 26 | 185 | 86 | 43 | 24 | 18 | 15 | 13 | 184 | 86 | 43 | 24 | 18 | 15 | 13 | 17 | 50 | | 67 | 5027 | 493 | 360 | 87 | 30 | 90 | 56 | Si | | |
| 32 | 40 | 25 | 26 | 177 | 100 | 50 | 27 | 18 | 15 | 12 | 177 | 100 | 50 | 27 | 18 | 15 | 12 | 14 | 70 | | 84 | 4468 | 438 | 271 | 84 | 60 | 90 | 73 | Si | | |
| 33 | 40 | 25 | 26 | 299 | 144 | 53 | 21 | 12 | 9 | 6 | 296 | 143 | 52 | 21 | 12 | 9 | 6 | 13 | 78 | | 91 | 5745 | 564 | 215 | 140 | 30 | 90 | 60 | Si | | |
| 34 | 41 | 23 | 26 | 171 | 97 | 48 | 27 | 18 | 14 | 11 | 168 | 95 | 47 | 27 | 18 | 14 | 11 | 17 | 48 | | 65 | 4468 | 438 | 286 | 81 | 60 | 90 | 59 | Si | | |
| 35 | 41 | 28 | 24 | 326 | 209 | 126 | 79 | 53 | 41 | 34 | 321 | 206 | 124 | 78 | 52 | 40 | 33 | 13 | 59 | | 71 | 1388 | 136 | 121 | 149 | 60 | 90 | 81 | Si | | |
| 36 | 40 | 25 | 23 | 168 | 112 | 79 | 60 | 46 | 39 | 32 | 166 | 111 | 78 | 59 | 46 | 39 | 32 | 12 | 52 | | 64 | 2045 | 201 | 197 | 80 | 60 | 90 | 83 | Si | | |
| 37 | 40 | 24 | 23 | 188 | 133 | 107 | 83 | 68 | 58 | 48 | 188 | 133 | 107 | 83 | 68 | 58 | 48 | 12 | 49 | | 61 | 1194 | 117 | 124 | 91 | 90 | 120 | 99 | Si | | |
| 38 | 40 | 22 | 23 | 247 | 178 | 131 | 95 | 68 | 54 | 46 | 246 | 178 | 131 | 95 | 68 | 54 | 46 | 25 | 41 | | 66 | 1194 | 117 | 105 | 120 | 120 | 120 | 91 | Si | | |
| 39 | 41 | 25 | 23 | 250 | 146 | 70 | 29 | 10 | 7 | 4 | 247 | 144 | 69 | 29 | 10 | 7 | 4 | 29 | 41 | | 70 | 4160 | 408 | 195 | 112 | 60 | 90 | 57 | Si | | |
| 40 | 40 | 25 | 23 | 290 | 197 | 117 | 65 | 37 | 24 | 19 | 287 | 195 | 116 | 64 | 37 | 24 | 19 | 25 | 45 | | 70 | 1885 | 185 | 131 | 131 | 60 | 90 | 74 | Si | | |
| 41 | 40 | 20 | 18 | 295 | 182 | 125 | 93 | 72 | 63 | 55 | 292 | 180 | 124 | 92 | 71 | 62 | 54 | 19 | 68 | | 88 | 1274 | 125 | 123 | 146 | 60 | 120 | 102 | Si | | |
| 42 | 40 | 21 | 19 | 251 | 144 | 84 | 50 | 37 | 31 | 28 | 252 | 144 | 84 | 50 | 37 | 31 | 28 | 22 | 61 | | 82 | 2166 | 212 | 171 | 125 | 60 | 90 | 82 | Si | | |
| 43 | 40 | 20 | 17 | 251 | 178 | 110 | 74 | 53 | 46 | 40 | 249 | 176 | 109 | 73 | 52 | 46 | 40 | 21 | 58 | | 79 | 1562 | 153 | 141 | 125 | 60 | 120 | 91 | Si | | |
| 44 | 41 | 24 | 18 | 181 | 95 | 51 | 30 | 20 | 17 | 16 | 178 | 93 | 50 | 29 | 20 | 17 | 16 | 20 | 61 | | 81 | 3734 | 366 | 270 | 83 | 60 | 90 | 76 | Si | | |
| 45 | 41 | 18 | 17 | 254 | 149 | 84 | 51 | 37 | 32 | 28 | 250 | 147 | 83 | 50 | 36 | 32 | 28 | 28 | 57 | | 85 | 2166 | 212 | 174 | 132 | 60 | 90 | 82 | Si | | |
| 46 | 40 | 17 | 18 | 182 | 101 | 69 | 55 | 42 | 40 | 35 | 180 | 100 | 68 | 54 | 42 | 40 | 35 | 21 | 60 | | 80 | 1934 | 190 | 219 | 95 | 60 | 120 | 95 | Si | | |
| 47 | 40 | 16 | 17 | 370 | 188 | 106 | 77 | 56 | 47 | 40 | 368 | 187 | 105 | 77 | 56 | 47 | 40 | 21 | 44 | | 65 | 1406 | 138 | 129 | 196 | 60 | 90 | 66 | Si | | |
| 48 | 40 | 19 | 17 | 262 | 163 | 86 | 52 | 35 | 27 | 21 | 260 | 162 | 85 | 52 | 35 | 27 | 21 | 20 | 46 | | 66 | 2083 | 204 | 168 | 132 | 60 | 90 | 67 | Si | | |
| 49 | 40 | 18 | 17 | 177 | 104 | 61 | 43 | 34 | 30 | 25 | 175 | 103 | 60 | 43 | 34 | 30 | 25 | 18 | 62 | | 80 | 2518 | 247 | 241 | 90 | 60 | 90 | 86 | Si | | |
| 50 | 40 | 18 | 17 | 193 | 125 | 84 | 56 | 40 | 33 | 31 | 192 | 124 | 84 | 56 | 40 | 33 | 31 | 19 | 53 | | 71 | 1934 | 190 | 184 | 99 | 60 | 90 | 84 | Si | | |
| 51 | 41 | 19 | 17 | 220 | 121 | 66 | 40 | 26 | 23 | 20 | 217 | 120 | 65 | 40 | 26 | 23 | 20 | 19 | 65 | | 84 | 2707 | 266 | 213 | 111 | 60 | 90 | 80 | Si | | |
| 52 | 41 | 18 | 17 | 223 | 141 | 85 | 50 | 32 | 26 | 20 | 217 | 137 | 83 | 49 | 31 | 25 | 19 | 20 | 86 | | 106 | 2620 | 257 | 181 | 112 | 60 | 120 | 100 | Si | | |
| 53 | 41 | 18 | 17 | 152 | 101 | 65 | 44 | 31 | 26 | 20 | 149 | 99 | 64 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| Punto | Deflexiones: Datos Obtenidos en Campo | | | | | | | | | | Deflexiones Corregidas por Carga (µm) | | | | | | | Espesores de Estructura | | | | Parámetros Estructurales AASHTO | | Cálculo de Módulos Método Directo | | | Verificación r, Metodología AASHTO | | | | |
|-------|---------------------------------------|-------------|------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------|------|------|---------------|---------------------------------|-----|-----------------------------------|-------------------------|----------------|------------------------------------|-----|---------|--|--|
| | Carga | Temperatura | | Deflexiones Medidas (µm) | | | | | | | | | | | | | | Capa Asfáltica | MG-1 | MG-2 | Espesor Total | Mr | Mr | Hogg | | | | | | | |
| | | Pav. | Aire | d ₀ | d ₁ | d ₂ | d ₃ | d ₄ | d ₅ | d ₆ | d _{0c} | d _{1c} | d _{2c} | d _{3c} | d _{4c} | d _{5c} | d _{6c} | | | | | | | SR | Deflexión (Dr/DO = 0.5) | Sensor Dr (cm) | Sensor empleado (cm) | r | Cumple? | | |
| # | kN | °C | °C | 0 cm | 30 cm | 60 cm | 90 cm | 120 cm | 150 cm | 180 cm | 0 cm | 30 cm | 60 cm | 90 cm | 120 cm | 150 cm | 180 cm | cm | cm | cm | cm | (Kg/cm ²) | MPa | (MPa) | | | | | | | |
| 70 | 40 | 20 | 20 | 1054 | 662 | 298 | 193 | 150 | 131 | 113 | 1057 | 664 | 299 | 193 | 150 | 131 | 113 | 14 | 46 | | 60 | 561 | 55 | 45 | 529 | 60 | 90 | 59 | Si | | |
| 71 | 41 | 20 | 20 | 800 | 546 | 333 | 222 | 169 | 131 | 119 | 790 | 539 | 329 | 219 | 167 | 129 | 118 | 15 | 58 | | 73 | 494 | 49 | 46 | 396 | 60 | 90 | 85 | Si | | |
| 72 | 41 | 22 | 19 | 934 | 576 | 325 | 223 | 174 | 142 | 119 | 920 | 567 | 320 | 220 | 171 | 140 | 117 | 16 | 64 | | 80 | 548 | 54 | 46 | 449 | 60 | 90 | 83 | Si | | |
| 73 | 43 | 19 | 18 | 354 | 298 | 236 | 182 | 145 | 118 | 106 | 326 | 275 | 218 | 168 | 134 | 109 | 98 | 13 | 53 | | 66 | 606 | 59 | 57 | 166 | 120 | 120 | 109 | Si | | |
| 74 | 41 | 18 | 18 | 463 | 383 | 291 | 210 | 157 | 125 | 103 | 451 | 373 | 283 | 204 | 153 | 122 | 100 | 19 | 53 | | 72 | 531 | 52 | 50 | 234 | 90 | 120 | 104 | Si | | |
| 75 | 41 | 18 | 19 | 400 | 318 | 240 | 173 | 129 | 103 | 88 | 391 | 311 | 235 | 169 | 126 | 101 | 86 | 18 | 55 | | 73 | 645 | 63 | 61 | 201 | 90 | 120 | 103 | Si | | |
| 76 | 41 | 17 | 19 | 439 | 383 | 279 | 201 | 140 | 112 | 93 | 430 | 375 | 274 | 197 | 137 | 110 | 91 | 15 | 59 | | 74 | 593 | 58 | 52 | 222 | 90 | 120 | 103 | Si | | |
| 77 | 41 | 18 | 19 | 469 | 377 | 280 | 204 | 152 | 121 | 104 | 459 | 369 | 274 | 200 | 149 | 118 | 102 | 20 | 63 | | 83 | 545 | 53 | 51 | 236 | 90 | 120 | 115 | Si | | |
| 78 | 41 | 21 | 19 | 314 | 255 | 187 | 140 | 105 | 85 | 74 | 305 | 248 | 182 | 136 | 102 | 83 | 72 | 24 | 61 | | 85 | 872 | 86 | 75 | 151 | 90 | 150 | 116 | Si | | |
| 79 | 41 | 20 | 19 | 490 | 389 | 282 | 200 | 150 | 119 | 99 | 482 | 382 | 277 | 197 | 147 | 117 | 97 | 17 | 53 | | 70 | 553 | 54 | 51 | 239 | 90 | 120 | 99 | Si | | |
| 80 | 41 | 19 | 19 | 418 | 322 | 245 | 174 | 138 | 94 | 84 | 408 | 314 | 239 | 170 | 135 | 92 | 82 | 16 | 53 | | 69 | 602 | 59 | 60 | 206 | 90 | 120 | 101 | Si | | |
| 81 | 42 | 12 | 14 | 387 | 320 | 243 | 176 | 135 | 107 | 90 | 373 | 308 | 234 | 170 | 130 | 103 | 87 | 17 | 47 | | 64 | 625 | 61 | 60 | 208 | 90 | 120 | 93 | Si | | |
| 82 | 42 | 12 | 14 | 366 | 317 | 248 | 195 | 148 | 119 | 98 | 353 | 306 | 239 | 188 | 143 | 115 | 94 | 16 | 54 | | 70 | 568 | 56 | 53 | 195 | 120 | 120 | 108 | Si | | |
| 83 | 40 | 14 | 13 | 1042 | 663 | 367 | 245 | 185 | 137 | 113 | 1032 | 656 | 363 | 243 | 183 | 136 | 112 | 18 | 49 | 67 | 134 | 478 | 47 | 40 | 568 | 60 | 150 | 130 | Si | | |
| 84 | 39 | 14 | 13 | 2776 | 1805 | 730 | 382 | 260 | 185 | 145 | 2833 | 1842 | 745 | 390 | 265 | 189 | 148 | 14 | 56 | 70 | 140 | 306 | 30 | 18 | 1526 | 60 | 120 | 111 | Si | | |
| 85 | 41 | 14 | 14 | 563 | 451 | 310 | 211 | 154 | 116 | 95 | 553 | 443 | 305 | 207 | 151 | 114 | 93 | 13 | 47 | 60 | 120 | 570 | 56 | 48 | 296 | 90 | 150 | 141 | Si | | |
| 86 | 41 | 14 | 14 | 858 | 627 | 397 | 257 | 184 | 143 | 116 | 841 | 615 | 389 | 252 | 180 | 140 | 114 | 10 | 60 | 70 | 140 | 529 | 52 | 40 | 442 | 60 | 180 | 143 | Si | | |
| 87 | 40 | 14 | 14 | 796 | 628 | 420 | 271 | 183 | 133 | 112 | 788 | 622 | 416 | 268 | 181 | 132 | 111 | 20 | 30 | 50 | 100 | 449 | 44 | 36 | 437 | 90 | 120 | 112 | Si | | |
| 88 | 41 | 14 | 14 | 555 | 466 | 353 | 252 | 184 | 134 | 107 | 540 | 454 | 344 | 245 | 179 | 130 | 104 | 12 | 48 | 60 | 120 | 521 | 51 | 42 | 287 | 90 | 180 | 148 | Si | | |
| 89 | 41 | 14 | 14 | 674 | 499 | 337 | 222 | 158 | 117 | 100 | 661 | 489 | 330 | 218 | 155 | 115 | 98 | 16 | 24 | 40 | 80 | 524 | 51 | 44 | 359 | 90 | 120 | 93 | Si | | |
| 90 | 40 | 14 | 13 | 1165 | 889 | 572 | 358 | 223 | 157 | 126 | 1171 | 893 | 575 | 360 | 224 | 158 | 127 | 15 | 55 | 70 | 140 | 411 | 40 | 27 | 633 | 60 | 150 | 137 | Si | | |
| 91 | 41 | 14 | 14 | 406 | 384 | 267 | 187 | 128 | 94 | 77 | 394 | 373 | 259 | 182 | 124 | 91 | 75 | 13 | 57 | 70 | 140 | 722 | 71 | 56 | 210 | 90 | 180 | 170 | Si | | |
| 92 | 40 | 14 | 14 | 1205 | 783 | 473 | 296 | 202 | 147 | 125 | 1208 | 785 | 474 | 297 | 203 | 147 | 125 | 12 | 58 | 70 | 140 | 442 | 43 | 32 | 642 | 60 | 150 | 133 | Si | | |
| 93 | 40 | 12 | 14 | 1537 | 962 | 512 | 291 | 185 | 134 | 111 | 1541 | 964 | 513 | 292 | 185 | 134 | 111 | 11 | 59 | 70 | 140 | 540 | 53 | 28 | 831 | 60 | 150 | 112 | Si | | |
| 94 | 40 | 12 | 14 | 1643 | 1008 | 492 | 275 | 175 | 132 | 107 | 1664 | 1021 | 498 | 278 | 177 | 134 | 108 | 11 | 29 | 40 | 80 | 434 | 43 | 28 | 897 | 60 | 90 | 69 | Si | | |
| 95 | 42 | 16 | 17 | 304 | 256 | 187 | 138 | 96 | 77 | 64 | 290 | 244 | 178 | 131 | 91 | 73 | 61 | 8 | 90 | | 98 | 992 | 97 | 78 | 148 | 90 | 150 | 125 | Si | | |
| 96 | 40 | 20 | 21 | 1153 | 598 | 284 | 170 | 118 | 99 | 79 | 1147 | 595 | 283 | 169 | 117 | 99 | 79 | 10 | 45 | | 55 | 574 | 56 | 45 | 574 | 60 | 60 | 52 | Si | | |
| 97 | 40 | 20 | 19 | 553 | 335 | 267 | 207 | 106 | 88 | 73 | 550 | 333 | 266 | 206 | 105 | 88 | 73 | 12 | 46 | | 58 | 526 | 52 | 46 | 58 | 60 | 90 | 82 | Si | | |
| 98 | 43 | 17 | 15 | 495 | 385 | 236 | 145 | 94 | 69 | 57 | 463 | 360 | 221 | 136 | 88 | 64 | 53 | 19 | 51 | | 70 | 796 | 78 | 70 | 243 | 60 | 90 | 82 | Si | | |
| 99 | 42 | 18 | 15 | 975 | 660 | 338 | 163 | 85 | 53 | 43 | 926 | 627 | 321 | 155 | 81 | 50 | 41 | 19 | 43 | | 62 | 699 | 69 | 45 | 475 | 60 | 90 | 58 | Si | | |
| 100 | 39 | 23 | 20 | 463 | 351 | 245 | 153 | 97 | 66 | 49 | 477 | 362 | 253 | 158 | 100 | 68 | 51 | 11 | 39 | | 50 | 764 | 75 | 61 | 232 | 90 | 90 | 65 | Si | | |
| 101 | 42 | 20 | 19 | 652 | 510 | 263 | 154 | 110 | 85 | 72 | 628 | 492 | 253 | 148 | 106 | 82 | 69 | 14 | 32 | | 46 | 642 | 63 | 60 | 315 | 60 | 60 | 57 | Si | | |
| 102 | 39 | 19 | 18 | 757 | 483 | 240 | 127 | 82 | 60 | 51 | 769 | 490 | 244 | 129 | 83 | 61 | 52 | 9 | 51 | | 60 | 839 | 82 | 58 | 386 | 60 | 90 | 57 | Si | | |
| 103 | 41 | 20 | 17 | 683 | 438 | 207 | 97 | 54 | 40 | 35 | 675 | 433 | 204 | 96 | 53 | 40 | 35 | 14 | | | 64 | 1128 | 111 | 68 | 338 | 60 | 90 | 57 | Si | | |
| 104 | 43 | 17 | 18 | 585 | 316 | 105 | 40 | 28 | 24 | 24 | 545 | 295 | 98 | 37 | 26 | 22 | 22 | 18 | 38 | | 56 | 1658 | 163 | 111 | 286 | 60 | 60 | 46 | Si | | |
| 105 | 43 | 18 | 16 | 636 | 395 | 250 | 151 | 97 | 66 | 53 | 590 | 367 | 232 | 140 | 90 | 61 | 49 | 16 | 54 | | 70 | 774 | 76 | 65 | 305 | 60 | 90 | 75 | Si | | |
| 106 | 39 | 56 | 39 | 123 | 70 | 51 | 32 | 21 | 15 | 11 | 126 | 72 | 52 | 33 | 22 | 15 | 11 | 32 | 38 | | 70 | 4113 | 403 | 290 | 33 | 60 | 120 | 97 | Si | | |
| 107 | 40 | 58 | 40 | 158 | 102 | 84 | 57 | 39 | 30 | 20 | 160 | 103 | 85 | 58 | 39 | 30 | 20 | 21 | 49 | | 70 | 2083 | 204 | 170 | 49 | 90 | 120 | 114 | Si | | |
| 108 | 39 | 55 | 40 | 139 | 95 | 84 | 61 | 48 | 38 | 31 | 142 | 97 | 86 | 62 | 49 | 39 | 32 | 20 | 50 | | 70 | 1666 | 163 | 164 | 46 | 90 | 150 | 134 | Si | | |
| 109 | 40 | 19 | 17 | 360 | 219 | 113 | 43 | 41 | 31 | 23 | 359 | 218 | 113 | 43 | 41 | 31 | 23 | 8 | 20 | 25 | 53 | 1602 | 157 | 125 | 181 | 60 | 60 | 54 | Si | | |
| 110 | 41 | 21 | 17 | 274 | 171 | 85 | 46 | 25 | 19 | 15 | 271 | 169 | 84 | 45 | 25 | 19 | 15 | 8 | 20 | 25 | 53 | 2154 | 211 | 167 | 134 | 60 | 60 | 54 | Si | | |
| 111 | 40 | 22 | 18 | 523 | 310 | 139 | 61 | 43 | 33 | 26 | 522 | 309 | 139 | 61 | 43 | 33 | 26 | 8 | 20 | 25 | 53 | 1302 | 128 | 95 | 258 | 60 | 60 | 50 | Si | | |
| 112 | 40 | 34 | 30 | 367 | 149 | 70 | 49 | 27 | 14 | 9 | 371 | 151 | 71 | 49 | 27 | 14 | 9 | 9 | 20 | 25 | 54 | 2549 | 250 | 201 | 168 | 60 | 60 | 46 | Si | | |
| 113 | 40 | 32 | 26 | 258 | 160 | 85 | 69 | 41 | 22 | 12 | 257 | 160 | 85 | 69 | 41 | 22 | 12 | 9 | 20 | 25 | 54 | 1749 | 172 | 169 | 118 | 60 | 90 | 64 | Si | | |
| 114 | 40 | 19 | 16 | 1528 | 720 | 125 | 36 | 30 | 22 | 18 | 1540 | 725 | 126 | 36 | 30 | 22 | 18 | 6 | 35 | | 41 | 1289 | 126 | 42 | 773 | 30 | 60 | 26 | Si | | |
| 115 | 41 | 18 | 16 | 1196 | 427 | 106 | 42 | 28 | 23 | 19 | 1167 | 417 | 103 | 41 | 27 | 22 | 19 | 6 | 35 | | 41 | 1577 | 155 | 71 | 589 | 30 | 60 | 27 | Si | | |
| 116 | 41 | 18 | 15 | 1397 | 615 | 234 | 93 | 44 | 27 | 12 | 1366 | 601 | 229 | 91 | 43 | 26 | 12 | 6 | 35 | | 41 | 709 | 70 | 51 | 690 | 30 | 60 | 34 | Si | | |
| 117 | 41 | 18 | 15 | 1319 | 661 | 284 | 143 | 93 | 62 | 45 | 1277 | 640 | 275 | 138 | 90 | 60 | 44 | 6 | 35 | | 41 | 658 | 65 | 44 | 645 | 60 | 60 | 36 | Si | | |
| 118 | 41 | 25 | 23 | 956 | 525 | 301 | 208 | 153 | 113 | 92 | 944 | 519 | 297 | 205 | 151 | 112 | 91 | 30 | 40 | | 70 | 528 | 52 | 48 | 422 | 60 | 90 | 77 | Si | | |
| 119 | 40 | 24 | 22 | 704 | 509 | 376 | 247 | 155 | 90 | 74 | 704 | 509 | 376 | 247 | 155 | 90 | 74 | 10 | 70 | | 80 | 524 | 51 | 39 | 341 | 90 | 120 | 96 | Si | | |
| 120 | 39 | 21 | 25 | 1095 | 436 | 255 | 173 | 144 | 117 | 103 | 1112 | 443 | 259 | 176 | 146 | 119 | 105 | 5 | 55 | | 60 | 627 | 62 | 68 | 554 | 30 | 60 | 55 | Si | | |
| 121 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| Punto | Deflexiones: Datos Obtenidos en Campo | | | | | | | | | | Deflexiones Corregidas por Carga (µm) | | | | | | | Espesores de Estructura | | | | Parámetros Estructurales AASHTO | | Cálculo de Módulos Método Directo | | | Verificación r, Metodología AASHTO | | | | |
|-------|---------------------------------------|-------------|------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------|------|------|---------------|---------------------------------|-----|-----------------------------------|--------------------------|----------------|------------------------------------|-----|---------|--|--|
| | Carga | Temperatura | | Deflexiones Medidas (µm) | | | | | | | | | | | | | | Capa Asfáltica | MG-1 | MG-2 | Espesor Total | Mr | Mr | Hogg | | | | | | | |
| | | Pav. | Aire | d ₀ | d ₁ | d ₂ | d ₃ | d ₄ | d ₅ | d ₆ | d _{0c} | d _{1c} | d _{2c} | d _{3c} | d _{4c} | d _{5c} | d _{6c} | | | | | | | SR | Deflexiónn (Dr/DO = 0.5) | Sensor Dr (cm) | Sensor empleado (cm) | r | Cumple? | | |
| # | kN | °C | °C | 0 cm | 30 cm | 60 cm | 90 cm | 120 cm | 150 cm | 180 cm | 0 cm | 30 cm | 60 cm | 90 cm | 120 cm | 150 cm | 180 cm | cm | cm | cm | cm | (Kg/cm ²) | MPa | (MPa) | | | | | | | |
| 139 | 44 | 31 | 29 | 437 | 289 | 155 | 70 | 34 | 31 | 19 | 402 | 266 | 143 | 64 | 31 | 29 | 17 | 33 | 117 | | 150 | 2241 | 220 | 103 | 156 | 60 | 150 | 132 | Si | | |
| 140 | 43 | 31 | 29 | 561 | 409 | 233 | 120 | 90 | 53 | 35 | 522 | 380 | 217 | 112 | 84 | 49 | 33 | 31 | 37 | | 68 | 967 | 95 | 70 | 205 | 60 | 90 | 79 | Si | | |
| 141 | 44 | 31 | 29 | 427 | 326 | 206 | 103 | 74 | 60 | 40 | 392 | 299 | 189 | 94 | 68 | 55 | 37 | 16 | 62 | | 78 | 1152 | 113 | 81 | 172 | 60 | 90 | 89 | Si | | |
| 142 | 44 | 32 | 29 | 185 | 156 | 111 | 81 | 59 | 55 | 48 | 169 | 143 | 102 | 74 | 54 | 50 | 44 | 24 | 51 | | 75 | 1504 | 148 | 138 | 69 | 90 | 120 | 118 | Si | | |
| 143 | 43 | 31 | 29 | 637 | 445 | 234 | 135 | 82 | 66 | 37 | 591 | 413 | 217 | 125 | 76 | 61 | 34 | 15 | 83 | | 98 | 1069 | 105 | 68 | 261 | 60 | 120 | 95 | Si | | |
| 144 | 41 | 31 | 30 | 194 | 70 | 43 | 41 | 29 | 27 | 18 | 191 | 69 | 42 | 40 | 29 | 27 | 18 | 13 | 137 | | 150 | 3008 | 295 | 429 | 86 | 30 | 180 | 148 | Si | | |
| 145 | 44 | 31 | 29 | 367 | 275 | 179 | 117 | 83 | 74 | 53 | 336 | 252 | 164 | 107 | 76 | 68 | 49 | 14 | 66 | | 80 | 1069 | 105 | 94 | 150 | 60 | 120 | 101 | Si | | |
| 146 | 43 | 31 | 28 | 805 | 458 | 230 | 122 | 75 | 51 | 29 | 747 | 425 | 213 | 113 | 70 | 47 | 27 | 12 | 48 | | 60 | 1068 | 105 | 64 | 338 | 60 | 90 | 55 | Si | | |
| 147 | 44 | 32 | 29 | 237 | 146 | 72 | 52 | 32 | 23 | 13 | 215 | 133 | 65 | 47 | 29 | 21 | 12 | 22 | 128 | | 150 | 3447 | 338 | 213 | 89 | 60 | 150 | 138 | Si | | |
| 148 | 44 | 32 | 28 | 471 | 303 | 173 | 111 | 75 | 68 | 48 | 432 | 278 | 159 | 102 | 69 | 62 | 44 | 21 | 59 | | 80 | 1177 | 115 | 93 | 180 | 60 | 120 | 89 | Si | | |
| 149 | 43 | 31 | 29 | 345 | 212 | 92 | 54 | 26 | 25 | 19 | 319 | 196 | 85 | 50 | 24 | 23 | 18 | 13 | 55 | | 68 | 2413 | 237 | 155 | 143 | 60 | 90 | 62 | Si | | |
| 150 | 43 | 31 | 29 | 225 | 129 | 56 | 47 | 34 | 25 | 17 | 208 | 119 | 52 | 44 | 31 | 23 | 16 | 11 | 74 | | 85 | 2461 | 241 | 247 | 95 | 60 | 90 | 90 | Si | | |
| 151 | 44 | 32 | 29 | 513 | 326 | 176 | 95 | 77 | 60 | 44 | 471 | 299 | 161 | 87 | 71 | 55 | 40 | 14 | 71 | | 85 | 1245 | 122 | 90 | 207 | 60 | 90 | 86 | Si | | |
| 152 | 44 | 32 | 30 | 412 | 293 | 168 | 80 | 46 | 34 | 25 | 379 | 269 | 154 | 74 | 42 | 31 | 23 | 20 | 55 | | 75 | 1463 | 144 | 98 | 159 | 60 | 90 | 80 | Si | | |
| 153 | 43 | 32 | 29 | 576 | 423 | 261 | 161 | 120 | 107 | 68 | 538 | 395 | 244 | 150 | 112 | 100 | 64 | 23 | 127 | | 150 | 846 | 83 | 63 | 220 | 60 | 180 | 167 | Si | | |
| 154 | 43 | 32 | 29 | 578 | 377 | 214 | 128 | 78 | 64 | 44 | 533 | 347 | 197 | 118 | 72 | 59 | 41 | 13 | 137 | | 150 | 1101 | 108 | 75 | 237 | 60 | 150 | 147 | Si | | |
| 155 | 44 | 31 | 29 | 434 | 338 | 223 | 146 | 101 | 92 | 67 | 399 | 311 | 205 | 134 | 93 | 85 | 62 | 10 | 36 | | 46 | 808 | 79 | 72 | 183 | 90 | 90 | 68 | Si | | |
| 156 | 44 | 32 | 29 | 525 | 367 | 220 | 125 | 104 | 102 | 100 | 482 | 337 | 202 | 115 | 95 | 94 | 92 | 13 | 104 | | 117 | 691 | 68 | 75 | 214 | 60 | 150 | 146 | Si | | |
| 157 | 43 | 33 | 29 | 405 | 262 | 149 | 103 | 69 | 65 | 49 | 375 | 243 | 138 | 95 | 64 | 60 | 45 | 15 | 40 | | 55 | 1140 | 112 | 107 | 162 | 60 | 90 | 69 | Si | | |
| 158 | 43 | 32 | 28 | 363 | 271 | 160 | 102 | 76 | 72 | 52 | 335 | 250 | 148 | 94 | 70 | 67 | 48 | 13 | 75 | | 88 | 1160 | 114 | 104 | 149 | 60 | 120 | 106 | Si | | |
| 159 | 42 | 32 | 29 | 1224 | 709 | 371 | 211 | 137 | 110 | 76 | 1160 | 672 | 352 | 200 | 130 | 104 | 72 | 14 | 71 | | 85 | 541 | 53 | 40 | 511 | 60 | 90 | 84 | Si | | |
| 160 | 44 | 33 | 29 | 346 | 244 | 151 | 101 | 70 | 64 | 51 | 317 | 223 | 138 | 92 | 64 | 59 | 47 | 14 | 101 | | 115 | 1101 | 108 | 111 | 138 | 60 | 150 | 142 | Si | | |
| 161 | 43 | 33 | 29 | 282 | 204 | 105 | 48 | 44 | 21 | 16 | 262 | 189 | 97 | 45 | 41 | 19 | 15 | 26 | 94 | | 120 | 3420 | 335 | 153 | 103 | 60 | 150 | 106 | Si | | |
| 162 | 43 | 32 | 29 | 313 | 175 | 97 | 56 | 45 | 33 | 25 | 289 | 162 | 90 | 52 | 42 | 30 | 23 | 18 | 132 | | 150 | 2166 | 212 | 157 | 123 | 60 | 150 | 145 | Si | | |
| 163 | 43 | 32 | 29 | 203 | 157 | 106 | 67 | 65 | 42 | 32 | 188 | 145 | 98 | 62 | 60 | 39 | 30 | 17 | 133 | | 150 | 1805 | 177 | 155 | 81 | 90 | 180 | 184 | No | | |
| 164 | 42 | 33 | 30 | 421 | 260 | 135 | 64 | 33 | 33 | 30 | 397 | 245 | 127 | 60 | 31 | 31 | 28 | 20 | 70 | | 90 | 2011 | 197 | 112 | 164 | 60 | 90 | 82 | Si | | |
| 165 | 43 | 32 | 26 | 264 | 249 | 240 | 198 | 106 | 93 | 76 | 244 | 231 | 222 | 183 | 98 | 86 | 70 | 25 | 67 | | 92 | 774 | 76 | 77 | 99 | 120 | 180 | 162 | Si | | |
| 166 | 43 | 33 | 28 | 160 | 140 | 134 | 110 | 82 | 74 | 38 | 150 | 131 | 126 | 103 | 77 | 69 | 36 | 25 | 126 | | 110 | 1676 | 164 | 118 | 59 | 180 | 180 | 164 | Si | | |
| 167 | 44 | 31 | 29 | 210 | 137 | 83 | 56 | 41 | 36 | 25 | 193 | 126 | 76 | 51 | 38 | 33 | 23 | 15 | 135 | | 150 | 2354 | 231 | 198 | 85 | 60 | 180 | 162 | Si | | |
| 168 | 43 | 27 | 26 | 145 | 93 | 70 | 57 | 35 | 25 | 20 | 134 | 86 | 65 | 53 | 32 | 23 | 18 | 21 | 26 | | 47 | 2043 | 200 | 238 | 60 | 60 | 90 | 78 | Si | | |
| 169 | 43 | 28 | 25 | 277 | 96 | 69 | 47 | 34 | 23 | 13 | 259 | 90 | 65 | 44 | 32 | 22 | 12 | 20 | 35 | | 55 | 2499 | 245 | 324 | 115 | 30 | 60 | 56 | Si | | |
| 170 | 43 | 27 | 23 | 115 | 85 | 74 | 55 | 48 | 43 | 28 | 106 | 79 | 69 | 51 | 44 | 40 | 26 | 35 | 20 | | 55 | 1846 | 181 | 201 | 45 | 90 | 120 | 110 | Si | | |
| 171 | 43 | 26 | 24 | 110 | 80 | 61 | 61 | 42 | 21 | 17 | 102 | 74 | 56 | 56 | 39 | 19 | 16 | 35 | 20 | | 55 | 2083 | 204 | 193 | 44 | 120 | 120 | 103 | Si | | |
| 172 | 44 | 27 | 24 | 68 | 52 | 45 | 37 | 25 | 22 | 19 | 62 | 47 | 41 | 34 | 23 | 20 | 17 | 35 | 20 | | 55 | 3934 | 386 | 325 | 26 | 120 | 120 | 96 | Si | | |
| 173 | 44 | 27 | 24 | 182 | 124 | 116 | 87 | 67 | 55 | 28 | 167 | 114 | 106 | 80 | 61 | 50 | 26 | 35 | 20 | | 55 | 1483 | 146 | 129 | 70 | 90 | 120 | 95 | Si | | |
| 174 | 44 | 28 | 26 | 143 | 95 | 77 | 71 | 56 | 42 | 22 | 131 | 87 | 70 | 65 | 51 | 38 | 20 | 35 | 20 | | 55 | 1593 | 156 | 157 | 53 | 90 | 120 | 108 | Si | | |
| 175 | 43 | 28 | 26 | 107 | 81 | 70 | 67 | 51 | 40 | 37 | 99 | 75 | 65 | 62 | 47 | 37 | 34 | 35 | 20 | | 55 | 1756 | 172 | 162 | 40 | 150 | 150 | 122 | Si | | |
| 176 | 43 | 16 | 12 | 185 | 92 | 62 | 36 | 28 | 21 | 17 | 172 | 86 | 58 | 34 | 26 | 20 | 16 | 23 | 77 | | 100 | 3124 | 306 | 357 | 93 | 30 | 120 | 96 | Si | | |
| 177 | 43 | 13 | 10 | 145 | 112 | 83 | 63 | 44 | 35 | 29 | 135 | 104 | 77 | 59 | 41 | 33 | 27 | 25 | 75 | | 100 | 1969 | 193 | 175 | 78 | 90 | 150 | 124 | Si | | |
| 178 | 43 | 14 | 12 | 341 | 168 | 112 | 82 | 64 | 54 | 47 | 318 | 157 | 104 | 76 | 60 | 50 | 44 | 15 | 32 | | 47 | 1562 | 153 | 196 | 171 | 30 | 60 | 50 | Si | | |
| 179 | 43 | 13 | 11 | 308 | 244 | 166 | 106 | 94 | 78 | 59 | 288 | 228 | 155 | 99 | 88 | 73 | 55 | 15 | 32 | | 47 | 1094 | 107 | 98 | 157 | 90 | 90 | 64 | Si | | |
| 180 | 43 | 14 | 13 | 149 | 124 | 91 | 56 | 47 | 42 | 35 | 138 | 115 | 84 | 52 | 43 | 39 | 32 | 22 | 32 | | 54 | 2083 | 204 | 192 | 77 | 90 | 90 | 73 | Si | | |
| 181 | 43 | 12 | 13 | 232 | 180 | 139 | 78 | 77 | 60 | 42 | 214 | 166 | 128 | 72 | 71 | 55 | 39 | 21 | 33 | | 54 | 1504 | 148 | 134 | 124 | 90 | 90 | 68 | Si | | |
| 182 | 43 | 11 | 10 | 151 | 120 | 90 | 64 | 44 | 40 | 30 | 141 | 112 | 84 | 60 | 41 | 37 | 28 | 16 | 32 | | 48 | 1805 | 177 | 170 | 80 | 90 | 90 | 72 | Si | | |
| 183 | 43 | 13 | 12 | 728 | 403 | 184 | 60 | 56 | 25 | 16 | 677 | 375 | 171 | 56 | 52 | 23 | 15 | 15 | 27 | | 42 | 950 | 93 | 75 | 370 | 60 | 60 | 40 | Si | | |
| 184 | 43 | 11 | 10 | 272 | 182 | 112 | 73 | 45 | 33 | 30 | 255 | 170 | 105 | 68 | 42 | 31 | 28 | 19 | 31 | | 50 | 1547 | 152 | 145 | 148 | 60 | 60 | 57 | Si | | |
| 185 | 42 | 26 | 18 | 569 | 367 | 212 | 132 | 82 | 74 | 61 | 539 | 348 | 201 | 125 | 78 | 70 | 58 | 18 | 40 | | 58 | 866 | 85 | 74 | 248 | 60 | 90 | 67 | Si | | |
| 186 | 37 | 16 | 14 | 1322 | 631 | 202 | 94 | 77 | 67 | 40 | 1441 | 688 | 220 | 102 | 84 | 73 | 44 | 8 | 53 | | 61 | 738 | 72 | 45 | 741 | 30 | 60 | 47 | Si | | |
| 187 | 40 | 15 | 14 | 866 | 432 | 170 | 96 | 75 | 61 | 51 | 866 | 432 | 170 | 96 | 75 | 61 | 51 | 10 | 11 | | 20 | 752 | 74 | 71 | 451 | 30 | 30 | 25 | Si | | |
| 188 | 39 | 15 | 15 | 1120 | 632 | 280 | 141 | 93 | 74 | 47 | 1146 | 647 | 286 | 144 | 95 | 76 | 48 | 8 | 25 | | 33 | 568 | 56 | 45 | 591 | 60 | 60 | 34 | Si | | |
| 189 | 39 | 13 | 15 | 546 | 358 | 179 | 104 | 71 | 57 | 34 | 556 | 364 | 182 | 106 | 72 | 58 | 35 | 12 | 36 | | 48 | 893 | 88 | 79 | 297 | 60 | 60 | 52 | Si | | |
| 190 | 39 | 15 | 14 | 733 | 411 | 171 | 96 | 74 | 44 | 36 | 746 | 418 | 174 | 98 | 75 | 45 | 37 | 11 | 36 | | 47 | 934 | 92 | | | | | | | | |

| Punto | Deflexiones: Datos Obtenidos en Campo | | | | | | | | | | Deflexiones Corregidas por Carga (µm) | | | | | | | Espesores de Estructura | | | | Parámetros Estructurales AASHTO | | Cálculo de Módulos Método Directo | | | Verificación r, Metodología AASHTO | | |
|-------|---------------------------------------|-------------|------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------------------|-------|-------|---------------|--------|--------|-----------------|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------------|-----------------|-----------------------------------|--------------------------|----------------|------------------------------------|---------|----|
| | Carga | Temperatura | | Deflexiones Medidas (µm) | | | | | | | Capa Asfáltica | MG-1 | MG-2 | Espesor Total | Mr | Mr | Hogg | | | | | | | | | | | | |
| | | Pav. | Aire | d ₀ | d ₁ | d ₂ | d ₃ | d ₄ | d ₅ | d ₆ | | | | | | | d _{0c} | d _{1c} | d _{2c} | d _{3c} | d _{4c} | d _{5c} | d _{6c} | SR | Deflexiónn (Dr/DO = 0.5) | Sensor Dr (cm) | | | |
| # | kN | °C | °C | 0 cm | 30 cm | 60 cm | 90 cm | 120 cm | 150 cm | 180 cm | 0 cm | 30 cm | 60 cm | 90 cm | 120 cm | 150 cm | 180 cm | cm | cm | cm | cm | (Kg/cm ²) | MPa | (MPa) | | cm | r | Cumple? | |
| 208 | 43 | 16 | 14 | 274 | 217 | 142 | 83 | 51 | 49 | 34 | 256 | 203 | 133 | 78 | 48 | 46 | 32 | 26 | 30 | | 56 | 1388 | 136 | 120 | 140 | 90 | 90 | 68 | Si |
| 209 | 44 | 16 | 14 | 164 | 118 | 76 | 69 | 29 | 28 | 21 | 151 | 109 | 70 | 63 | 27 | 26 | 19 | 25 | 30 | | 55 | 1719 | 169 | 220 | 82 | 60 | 90 | 79 | Si |
| 210 | 38 | 25 | 25 | 153 | 106 | 68 | 46 | 33 | 26 | 20 | 161 | 111 | 71 | 48 | 35 | 27 | 21 | 17 | 62 | | 79 | 2321 | 228 | 216 | 76 | 60 | 120 | 96 | Si |
| 211 | 38 | 24 | 25 | 211 | 112 | 56 | 35 | 24 | 19 | 15 | 220 | 117 | 58 | 37 | 25 | 20 | 16 | 16 | 59 | | 76 | 2927 | 287 | 226 | 105 | 60 | 90 | 72 | Si |
| 212 | 38 | 24 | 23 | 174 | 109 | 59 | 37 | 26 | 22 | 19 | 182 | 114 | 62 | 39 | 27 | 23 | 20 | 15 | 75 | | 90 | 3008 | 295 | 235 | 87 | 60 | 120 | 91 | Si |
| 213 | 38 | 26 | 27 | 229 | 103 | 45 | 30 | 24 | 20 | 16 | 244 | 110 | 48 | 32 | 26 | 21 | 17 | 10 | 60 | | 70 | 3770 | 370 | 280 | 117 | 30 | 90 | 58 | Si |
| 214 | 38 | 26 | 26 | 339 | 195 | 102 | 69 | 53 | 43 | 34 | 358 | 206 | 108 | 73 | 56 | 45 | 36 | 10 | 60 | | 70 | 1483 | 146 | 129 | 171 | 60 | 90 | 73 | Si |
| 215 | 40 | 20 | 0 | 302 | 220 | 147 | 90 | 66 | 51 | 44 | 302 | 220 | 147 | 90 | 66 | 51 | 44 | 19 | 51 | | 70 | 1203 | 118 | 104 | 151 | 60 | 90 | 85 | Si |
| 216 | 40 | 20 | 0 | 382 | 296 | 203 | 126 | 93 | 75 | 62 | 382 | 296 | 203 | 126 | 93 | 75 | 62 | 12 | 58 | | 70 | 859 | 84 | 76 | 191 | 90 | 90 | 89 | Si |
| 217 | 40 | 20 | 0 | 434 | 328 | 222 | 133 | 95 | 70 | 59 | 434 | 328 | 222 | 133 | 95 | 70 | 59 | 12 | 58 | | 70 | 814 | 80 | 70 | 217 | 90 | 90 | 86 | Si |
| 218 | 40 | 20 | 0 | 417 | 272 | 166 | 94 | 68 | 53 | 44 | 417 | 272 | 166 | 94 | 68 | 53 | 44 | 12 | 58 | | 70 | 1152 | 113 | 91 | 209 | 60 | 90 | 75 | Si |
| 219 | 40 | 20 | 0 | 319 | 255 | 184 | 116 | 83 | 63 | 54 | 319 | 255 | 184 | 116 | 83 | 63 | 54 | 12 | 58 | | 70 | 979 | 96 | 85 | 160 | 90 | 120 | 91 | Si |
| 220 | 40 | 20 | 0 | 344 | 232 | 144 | 89 | 64 | 50 | 44 | 344 | 232 | 144 | 89 | 64 | 50 | 44 | 14 | 56 | | 70 | 1217 | 119 | 106 | 172 | 60 | 90 | 79 | Si |
| 221 | 40 | 20 | 0 | 283 | 197 | 129 | 77 | 57 | 45 | 39 | 283 | 197 | 129 | 77 | 57 | 45 | 39 | 12 | 58 | | 70 | 1406 | 138 | 119 | 142 | 60 | 90 | 81 | Si |
| 222 | 39 | 34 | 29 | 380 | 194 | 93 | 60 | 46 | 41 | 35 | 395 | 202 | 97 | 62 | 48 | 43 | 36 | 20 | 45 | | 65 | 1747 | 171 | 132 | 161 | 60 | 90 | 65 | Si |
| 223 | 41 | 23 | 14 | 593 | 332 | 160 | 110 | 90 | 55 | 53 | 583 | 326 | 157 | 108 | 88 | 54 | 52 | 8 | 22 | | 30 | 1035 | 102 | 85 | 286 | 60 | 60 | 34 | Si |
| 224 | 41 | 28 | 18 | 382 | 281 | 174 | 110 | 68 | 46 | 32 | 370 | 272 | 169 | 107 | 66 | 45 | 31 | 17 | 28 | | 45 | 1012 | 99 | 91 | 167 | 60 | 90 | 62 | Si |
| 225 | 41 | 25 | 16 | 1045 | 601 | 169 | 63 | 55 | 22 | 18 | 1030 | 592 | 167 | 62 | 54 | 22 | 18 | 12 | 33 | | 45 | 973 | 95 | 62 | 491 | 60 | 60 | 37 | Si |
| 226 | 42 | 24 | 15 | 343 | 244 | 160 | 105 | 64 | 47 | 34 | 331 | 235 | 154 | 101 | 62 | 45 | 33 | 21 | 49 | | 70 | 1072 | 105 | 100 | 155 | 60 | 90 | 88 | Si |
| 227 | 41 | 23 | 14 | 741 | 503 | 246 | 141 | 88 | 66 | 50 | 719 | 488 | 239 | 137 | 85 | 64 | 49 | 22 | 18 | | 40 | 680 | 67 | 60 | 342 | 60 | 60 | 48 | Si |
| 228 | 41 | 24 | 16 | 814 | 551 | 313 | 188 | 111 | 76 | 54 | 786 | 532 | 302 | 182 | 107 | 73 | 52 | 28 | 32 | | 60 | 595 | 58 | 50 | 361 | 60 | 90 | 69 | Si |
| 229 | 42 | 25 | 17 | 779 | 487 | 244 | 134 | 83 | 64 | 50 | 749 | 468 | 235 | 129 | 80 | 62 | 48 | 16 | 24 | | 40 | 691 | 68 | 60 | 352 | 60 | 60 | 47 | Si |
| 230 | 41 | 25 | 17 | 818 | 459 | 208 | 116 | 70 | 56 | 46 | 806 | 452 | 205 | 114 | 69 | 55 | 45 | 5 | 24 | | 29 | 792 | 78 | 63 | 395 | 60 | 60 | 32 | Si |
| 231 | 41 | 26 | 17 | 902 | 529 | 217 | 100 | 46 | 35 | 24 | 871 | 511 | 210 | 97 | 44 | 34 | 23 | 7 | 38 | | 45 | 774 | 76 | 60 | 422 | 60 | 60 | 44 | Si |
| 232 | 40 | 36 | 20 | 683 | 489 | 283 | 164 | 101 | 65 | 48 | 686 | 491 | 284 | 165 | 102 | 65 | 48 | 16 | 34 | | 50 | 656 | 64 | 53 | 285 | 60 | 90 | 64 | Si |
| 233 | 39 | 34 | 19 | 806 | 471 | 235 | 118 | 54 | 28 | 22 | 833 | 487 | 243 | 122 | 56 | 29 | 23 | 21 | 25 | | 46 | 668 | 66 | 56 | 337 | 60 | 60 | 54 | Si |
| 234 | 42 | 0 | 19 | 427 | 164 | 55 | 34 | 27 | 20 | 16 | 405 | 155 | 52 | 32 | 26 | 19 | 15 | | 90 | | 90 | 3384 | 332 | 193 | 202 | 30 | 90 | 63 | Si |
| 235 | 42 | 0 | 22 | 456 | 190 | 89 | 58 | 42 | 32 | 23 | 433 | 181 | 85 | 55 | 40 | 30 | 22 | | 90 | | 90 | 1969 | 193 | 169 | 217 | 30 | 90 | 75 | Si |
| 236 | 42 | 0 | 21 | 459 | 198 | 71 | 38 | 26 | 20 | 15 | 436 | 188 | 67 | 36 | 25 | 19 | 14 | | 90 | | 90 | 3008 | 295 | 163 | 218 | 30 | 90 | 64 | Si |
| 237 | 41 | 23 | 19 | 419 | 250 | 130 | 84 | 67 | 54 | 45 | 414 | 247 | 128 | 83 | 66 | 53 | 44 | 10 | 65 | | 75 | 1454 | 143 | 109 | 202 | 60 | 90 | 73 | Si |
| 238 | 40 | 28 | 21 | 554 | 307 | 158 | 102 | 80 | 63 | 54 | 558 | 309 | 159 | 103 | 81 | 63 | 54 | | 50 | | 60 | 1051 | 103 | 85 | 262 | 60 | 90 | 61 | Si |
| 239 | 40 | 29 | 20 | 456 | 287 | 174 | 115 | 81 | 59 | 45 | 457 | 288 | 174 | 115 | 81 | 59 | 45 | 7 | 43 | | 50 | 1049 | 103 | 86 | 218 | 60 | 90 | 57 | Si |
| 240 | 40 | 29 | 21 | 759 | 459 | 258 | 160 | 110 | 84 | 62 | 759 | 459 | 258 | 160 | 110 | 84 | 62 | | 43 | | 50 | 701 | 69 | 56 | 361 | 60 | 60 | 55 | Si |
| 241 | 40 | 27 | 20 | 918 | 580 | 332 | 202 | 137 | 95 | 75 | 930 | 587 | 336 | 205 | 139 | 96 | 76 | | 40 | | 50 | 539 | 53 | 44 | 440 | 60 | 60 | 56 | Si |
| 242 | 40 | 28 | 20 | 161 | 104 | 61 | 40 | 31 | 25 | 19 | 161 | 104 | 61 | 40 | 31 | 25 | 19 | | 50 | | 70 | 3016 | 296 | 245 | 71 | 60 | 90 | 78 | Si |
| 243 | 40 | 26 | 20 | 189 | 125 | 78 | 48 | 33 | 24 | 17 | 189 | 125 | 78 | 48 | 33 | 24 | 17 | | 75 | | 95 | 2742 | 269 | 195 | 86 | 60 | 120 | 99 | Si |
| 244 | 40 | 21 | 15 | 730 | 429 | 220 | 132 | 93 | 76 | 63 | 734 | 431 | 221 | 133 | 93 | 76 | 63 | | 89 | | 95 | 873 | 86 | 63 | 365 | 60 | 120 | 88 | Si |
| 245 | 41 | 26 | 23 | 189 | 103 | 60 | 41 | 31 | 24 | 18 | 186 | 101 | 59 | 40 | 30 | 24 | 18 | | 41 | | 60 | 2707 | 266 | 240 | 85 | 60 | 90 | 67 | Si |
| 246 | 41 | 27 | 21 | 84 | 64 | 53 | 43 | 33 | 29 | 23 | 82 | 62 | 52 | 42 | 32 | 28 | 22 | | 41 | | 60 | 2538 | 249 | 234 | 37 | 120 | 120 | 107 | Si |
| 247 | 41 | 26 | 23 | 130 | 82 | 47 | 31 | 14 | 13 | 9 | 127 | 80 | 46 | 30 | 14 | 13 | 9 | | 45 | | 63 | 3610 | 354 | 323 | 58 | 60 | 90 | 72 | Si |
| 248 | 41 | 26 | 23 | 186 | 109 | 70 | 49 | 37 | 30 | 26 | 181 | 106 | 68 | 48 | 36 | 29 | 25 | | 45 | | 63 | 2256 | 221 | 219 | 83 | 60 | 90 | 76 | Si |
| 249 | 39 | 23 | 20 | 333 | 197 | 111 | 60 | 32 | 21 | 19 | 338 | 200 | 113 | 61 | 32 | 21 | 19 | | 45 | | 63 | 1775 | 174 | 128 | 162 | 60 | 90 | 63 | Si |
| 250 | 42 | 23 | 19 | 96 | 62 | 42 | 32 | 24 | 20 | 17 | 92 | 59 | 40 | 31 | 23 | 19 | 16 | | 50 | | 70 | 3531 | 346 | 383 | 44 | 60 | 120 | 91 | Si |
| 251 | 42 | 23 | 19 | 97 | 61 | 45 | 37 | 29 | 22 | 20 | 93 | 58 | 43 | 35 | 28 | 21 | 19 | | 50 | | 70 | 2901 | 285 | 357 | 44 | 60 | 120 | 100 | Si |
| 252 | 41 | 23 | 19 | 119 | 87 | 58 | 37 | 25 | 15 | 13 | 115 | 84 | 56 | 36 | 24 | 14 | 13 | | 50 | | 70 | 3008 | 295 | 274 | 55 | 60 | 90 | 88 | Si |
| 253 | 42 | 23 | 19 | 79 | 55 | 45 | 37 | 26 | 24 | 19 | 76 | 53 | 43 | 36 | 25 | 23 | 18 | | 50 | | 70 | 3249 | 319 | 288 | 36 | 90 | 120 | 105 | Si |
| 254 | 41 | 22 | 19 | 121 | 92 | 75 | 61 | 48 | 41 | 33 | 117 | 89 | 72 | 59 | 46 | 40 | 32 | | 50 | | 70 | 1766 | 173 | 163 | 57 | 120 | 120 | 115 | Si |
| 255 | 41 | 22 | 18 | 192 | 147 | 114 | 83 | 60 | 51 | 42 | 187 | 143 | 111 | 81 | 58 | 50 | 41 | | 50 | | 70 | 1400 | 137 | 127 | 91 | 90 | 120 | 101 | Si |
| 256 | 42 | 22 | 18 | 124 | 77 | 60 | 48 | 37 | 31 | 24 | 118 | 73 | 57 | 46 | 35 | 30 | 23 | | 50 | | 70 | 2321 | 228 | 269 | 57 | 60 | 120 | 99 | Si |
| 257 | 41 | 22 | 17 | 100 | 65 | 45 | 31 | 19 | 14 | 11 | 97 | 63 | 44 | 30 | 18 | 14 | 11 | | 25 | | 45 | 3610 | 354 | 351 | 47 | 60 | 90 | 87 | Si |
| 258 | 41 | 20 | 16 | 200 | 125 | 64 | 38 | 23 | 17 | 12 | 194 | 121 | 62 | 37 | 22 | 16 | 12 | | 40 | | 70 | 2927 | 287 | 229 | 97 | 60 | 90 | 69 | Si |
| 259 | 41 | 20 | 14 | 186 | 149 | 116 | 89 | 64 | 49 | 39 | 181 | 145 | 113 | 87 | 62 | 48 | 38 | | 43 | | 62 | 1310 | 129 | 118 | 91 | 90 | 120 | 95 | Si |
| 260 | 40 | 24 | 21 | 209 | 143 | 80 | 49 | 31 | 23 | 18 | 207 | 142 | 79 | 49 | 31 | 23 | 18 | | 43 | | 62 | 221 | | | | | | | |

| Punto | Deflexiones: Datos Obtenidos en Campo | | | | | | | | | | Deflexiones Corregidas por Carga (µm) | | | | | | | Espesores de Estructura | | | | Parámetros Estructurales AASHTO | | Cálculo de Módulos Método Directo | | | Verificación r, Metodología AASHTO | | |
|-------|---------------------------------------|-------------|------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------|------|------|---------------|---------------------------------|-----|-----------------------------------|--------------------------|----------------|------------------------------------|-----------------------|---------|
| | Carga | Temperatura | | Deflexiones Medidas (µm) | | | | | | | | | | | | | | Capa Asfáltica | MG-1 | MG-2 | Espesor Total | Mr | Mr | Hogg | | | | | |
| | | Pav. | Aire | d ₀ | d ₁ | d ₂ | d ₃ | d ₄ | d ₅ | d ₆ | d _{0c} | d _{1c} | d _{2c} | d _{3c} | d _{4c} | d _{5c} | d _{6c} | | | | | | | cm | cm | cm | cm | (Kg/cm ²) | MPa |
| # | kN | °C | °C | 0 cm | 30 cm | 60 cm | 90 cm | 120 cm | 150 cm | 180 cm | 0 cm | 30 cm | 60 cm | 90 cm | 120 cm | 150 cm | 180 cm | cm | cm | cm | cm | (Kg/cm ²) | MPa | (MPa) | Deflexiónn (Dr/DO = 0.5) | Sensor Dr (cm) | Sensor empleado (cm) | r | Cumple? |
| 277 | 39 | 25 | 21 | 679 | 320 | 132 | 70 | 53 | 39 | 31 | 700 | 330 | 136 | 72 | 55 | 40 | 32 | 24 | 70 | | 94 | 1504 | 148 | 93 | 320 | 30 | 90 | 74 | Si |
| 278 | 39 | 24 | 21 | 806 | 334 | 124 | 66 | 50 | 37 | 30 | 833 | 345 | 128 | 68 | 52 | 38 | 31 | 27 | 64 | | 91 | 1593 | 156 | 88 | 380 | 30 | 90 | 66 | Si |
| 279 | 39 | 24 | 21 | 652 | 316 | 130 | 68 | 47 | 35 | 29 | 674 | 327 | 134 | 70 | 49 | 36 | 30 | 26 | 65 | | 91 | 1547 | 152 | 94 | 309 | 30 | 90 | 72 | Si |
| 280 | 39 | 24 | 19 | 483 | 224 | 103 | 62 | 48 | 37 | 32 | 498 | 231 | 106 | 64 | 49 | 38 | 33 | 23 | 68 | | 91 | 1692 | 166 | 133 | 233 | 30 | 90 | 78 | Si |
| 281 | 39 | 26 | 18 | 481 | 223 | 96 | 54 | 41 | 32 | 26 | 496 | 230 | 99 | 56 | 42 | 33 | 27 | 24 | 70 | | 94 | 1934 | 190 | 134 | 221 | 30 | 90 | 78 | Si |
| 282 | 39 | 26 | 20 | 651 | 284 | 129 | 66 | 44 | 34 | 28 | 663 | 289 | 131 | 67 | 45 | 35 | 28 | 22 | 73 | | 95 | 1616 | 159 | 106 | 302 | 30 | 90 | 75 | Si |
| 283 | 39 | 28 | 20 | 658 | 270 | 110 | 61 | 41 | 30 | 23 | 680 | 279 | 114 | 63 | 42 | 31 | 24 | 21 | 85 | | 106 | 1915 | 188 | 109 | 300 | 30 | 90 | 78 | Si |
| 284 | 39 | 16 | 15 | 560 | 313 | 149 | 83 | 57 | 44 | 36 | 580 | 324 | 154 | 86 | 59 | 46 | 37 | 20 | 82 | | 102 | 1403 | 138 | 86 | 310 | 60 | 90 | 84 | Si |
| 285 | 39 | 20 | 15 | 379 | 255 | 143 | 78 | 56 | 44 | 38 | 392 | 264 | 148 | 81 | 58 | 45 | 39 | 26 | 73 | | 99 | 1560 | 153 | 101 | 197 | 60 | 120 | 93 | Si |
| 286 | 39 | 26 | 21 | 901 | 373 | 137 | 70 | 49 | 39 | 32 | 922 | 382 | 140 | 72 | 50 | 40 | 33 | 17 | 81 | | 98 | 1676 | 164 | 80 | 426 | 30 | 90 | 67 | Si |
| 287 | 39 | 28 | 21 | 497 | 239 | 110 | 64 | 46 | 36 | 30 | 516 | 248 | 114 | 66 | 48 | 37 | 31 | 21 | 81 | | 102 | 1828 | 179 | 124 | 228 | 30 | 90 | 85 | Si |
| 288 | 39 | 16 | 16 | 441 | 248 | 127 | 73 | 54 | 42 | 34 | 451 | 254 | 130 | 75 | 55 | 43 | 35 | 21 | 86 | | 107 | 1477 | 145 | 105 | 244 | 60 | 120 | 94 | Si |
| 289 | 38 | 16 | 16 | 603 | 331 | 148 | 83 | 58 | 42 | 33 | 628 | 345 | 154 | 86 | 60 | 44 | 34 | 22 | 92 | | 114 | 1354 | 133 | 83 | 338 | 60 | 120 | 91 | Si |
| 290 | 39 | 13 | 14 | 454 | 282 | 151 | 91 | 66 | 50 | 38 | 464 | 288 | 154 | 93 | 68 | 51 | 39 | 26 | 84 | | 110 | 1194 | 117 | 93 | 272 | 60 | 120 | 100 | Si |
| 291 | 50 | 20 | 20 | 501 | 336 | 184 | 106 | 68 | 50 | 42 | 401 | 269 | 147 | 85 | 54 | 40 | 34 | 21 | 66 | | 87 | 1208 | 118 | 101 | 201 | 60 | 30 | 10 | Si |
| 292 | 50 | 20 | 20 | 1409 | 754 | 230 | 106 | 72 | 56 | 52 | 1122 | 600 | 183 | 84 | 57 | 45 | 41 | 19 | 63 | | 82 | 1289 | 126 | 56 | 561 | 60 | 90 | 56 | Si |
| 293 | 49 | 20 | 20 | 1096 | 580 | 210 | 104 | 70 | 54 | 46 | 896 | 474 | 172 | 85 | 57 | 44 | 38 | 18 | 59 | | 77 | 1274 | 125 | 66 | 448 | 60 | 90 | 58 | Si |
| 294 | 49 | 20 | 20 | 451 | 310 | 178 | 102 | 66 | 46 | 36 | 371 | 255 | 147 | 84 | 54 | 38 | 30 | 13 | 68 | | 81 | 1274 | 125 | 103 | 186 | 60 | 30 | 10 | Si |
| 295 | 52 | 20 | 20 | 1040 | 530 | 161 | 55 | 43 | 38 | 34 | 797 | 406 | 123 | 42 | 33 | 29 | 26 | 11 | 57 | | 68 | 1321 | 130 | 81 | 399 | 60 | 60 | 53 | Si |
| 296 | 52 | 20 | 20 | 876 | 564 | 249 | 94 | 49 | 46 | 44 | 670 | 432 | 191 | 72 | 38 | 35 | 34 | 11 | 79 | | 90 | 752 | 74 | 71 | 335 | 60 | 30 | 10 | Si |
| 297 | 49 | 20 | 20 | 1125 | 564 | 155 | 62 | 60 | 52 | 44 | 909 | 456 | 125 | 50 | 49 | 42 | 36 | 12 | 67 | | 79 | 1300 | 127 | 75 | 455 | 60 | 60 | 58 | Si |
| 298 | 49 | 20 | 20 | 1185 | 658 | 173 | 72 | 63 | 51 | 44 | 972 | 540 | 142 | 59 | 52 | 42 | 36 | 13 | 26 | | 39 | 1144 | 112 | 68 | 486 | 60 | 60 | 31 | Si |
| 299 | 49 | 20 | 20 | 1505 | 900 | 320 | 107 | 72 | 62 | 54 | 1221 | 730 | 260 | 87 | 58 | 50 | 44 | 11 | 46 | | 57 | 625 | 61 | 46 | 610 | 60 | 60 | 51 | Si |
| 300 | 49 | 20 | 20 | 1169 | 512 | 166 | 70 | 54 | 45 | 40 | 957 | 419 | 136 | 57 | 44 | 37 | 33 | 7 | 44 | | 51 | 775 | 76 | 73 | 478 | 30 | 30 | 10 | Si |
| 301 | 48 | 20 | 20 | 714 | 502 | 231 | 96 | 58 | 45 | 43 | 594 | 417 | 192 | 80 | 48 | 37 | 36 | 14 | 16 | | 30 | 846 | 83 | 74 | 297 | 60 | 60 | 38 | Si |
| 302 | 49 | 20 | 20 | 1101 | 568 | 189 | 68 | 46 | 43 | 38 | 894 | 461 | 154 | 55 | 37 | 35 | 31 | 7 | 50 | | 57 | 1055 | 103 | 69 | 447 | 60 | 60 | 47 | Si |
| 303 | 49 | 20 | 20 | 1030 | 618 | 298 | 144 | 84 | 60 | 52 | 848 | 509 | 245 | 119 | 69 | 49 | 43 | 12 | 25 | | 37 | 663 | 65 | 56 | 424 | 60 | 60 | 41 | Si |
| 304 | 39 | 24 | 27 | 316 | 197 | 99 | 62 | 43 | 34 | 28 | 322 | 201 | 101 | 63 | 44 | 35 | 29 | 12 | 69 | | 81 | 1719 | 169 | 140 | 155 | 60 | 90 | 81 | Si |
| 305 | 39 | 30 | 32 | 424 | 225 | 88 | 41 | 25 | 15 | 11 | 430 | 228 | 89 | 42 | 25 | 15 | 11 | 13 | 87 | | 100 | 2578 | 253 | 132 | 195 | 60 | 90 | 78 | Si |
| 306 | 39 | 29 | 30 | 601 | 343 | 123 | 67 | 44 | 35 | 30 | 616 | 352 | 126 | 69 | 45 | 36 | 31 | 15 | 85 | | 100 | 1569 | 154 | 92 | 278 | 60 | 90 | 82 | Si |
| 307 | 39 | 21 | 25 | 280 | 180 | 87 | 44 | 26 | 17 | 13 | 286 | 184 | 89 | 45 | 27 | 17 | 13 | 14 | 86 | | 100 | 2407 | 236 | 158 | 142 | 60 | 90 | 90 | Si |
| 308 | 39 | 21 | 20 | 279 | 194 | 103 | 61 | 42 | 34 | 29 | 287 | 199 | 106 | 63 | 43 | 35 | 30 | 15 | 85 | | 100 | 1889 | 185 | 140 | 142 | 60 | 120 | 99 | Si |
| 309 | 40 | 23 | 24 | 92 | 72 | 58 | 50 | 42 | 35 | 30 | 93 | 73 | 59 | 51 | 42 | 35 | 30 | 17 | 83 | | 100 | 1805 | 177 | 181 | 45 | 120 | 180 | 168 | Si |
| 310 | 39 | 23 | 23 | 78 | 67 | 57 | 46 | 39 | 31 | 26 | 79 | 68 | 58 | 47 | 40 | 31 | 26 | 15 | 85 | | 100 | 2083 | 204 | 192 | 38 | 150 | 180 | 169 | Si |
| 311 | 39 | 24 | 22 | 79 | 65 | 48 | 38 | 27 | 21 | 17 | 81 | 67 | 49 | 39 | 28 | 22 | 17 | 25 | 71 | | 96 | 2953 | 290 | 263 | 38 | 90 | 150 | 139 | Si |
| 312 | 40 | 25 | 26 | 144 | 92 | 69 | 55 | 47 | 39 | 35 | 143 | 91 | 68 | 54 | 47 | 39 | 35 | 28 | 72 | | 100 | 1666 | 163 | 225 | 64 | 60 | 150 | 147 | Si |
| 313 | 40 | 25 | 27 | 103 | 65 | 48 | 38 | 29 | 24 | 16 | 103 | 65 | 48 | 38 | 29 | 24 | 16 | 15 | 85 | | 100 | 2707 | 266 | 320 | 49 | 60 | 150 | 133 | Si |
| 314 | 40 | 28 | 29 | 54 | 38 | 30 | 27 | 22 | 19 | 17 | 54 | 38 | 30 | 27 | 22 | 19 | 17 | 12 | 88 | | 100 | 3185 | 312 | 342 | 25 | 120 | 180 | 167 | Si |
| 315 | 40 | 28 | 32 | 117 | 85 | 53 | 38 | 30 | 23 | 20 | 118 | 86 | 53 | 38 | 30 | 23 | 20 | 29 | 71 | | 100 | 2825 | 277 | 288 | 50 | 60 | 150 | 130 | Si |
| 316 | 41 | 14 | 14 | 336 | 264 | 178 | 120 | 85 | 64 | 51 | 329 | 258 | 174 | 117 | 83 | 63 | 50 | 8 | 93 | | 102 | 1031 | 101 | 84 | 171 | 90 | 150 | 119 | Si |
| 317 | 39 | 13 | 14 | 865 | 489 | 253 | 155 | 104 | 72 | 54 | 878 | 496 | 257 | 157 | 106 | 73 | 55 | 4 | 92 | | 96 | 690 | 68 | 53 | 450 | 60 | 90 | 90 | Si |
| 318 | 39 | 12 | 15 | 1422 | 620 | 210 | 95 | 55 | 37 | 29 | 1466 | 639 | 216 | 98 | 57 | 38 | 30 | 6 | 91 | | 97 | 1105 | 108 | 48 | 762 | 30 | 90 | 62 | Si |
| 319 | 38 | 20 | 16 | 819 | 403 | 181 | 110 | 81 | 63 | 53 | 853 | 420 | 189 | 115 | 84 | 66 | 55 | 7 | 88 | | 95 | 942 | 92 | 73 | 427 | 30 | 90 | 80 | Si |
| 320 | 39 | 15 | 18 | 510 | 251 | 84 | 33 | 18 | 12 | 9 | 527 | 259 | 87 | 34 | 19 | 12 | 9 | 8 | 98 | | 106 | 3185 | 312 | 118 | 273 | 30 | 90 | 67 | Si |
| 321 | 40 | 31 | | 319 | 172 | 85 | 47 | 30 | 21 | 17 | 319 | 172 | 85 | 47 | 30 | 21 | 17 | 17 | 50 | | 67 | 2304 | 226 | 156 | 139 | 60 | 90 | 63 | Si |
| 322 | 40 | 32 | | 358 | 194 | 86 | 49 | 36 | 28 | 21 | 358 | 194 | 86 | 49 | 36 | 28 | 21 | 11 | 65 | | 76 | 2210 | 217 | 147 | 162 | 60 | 90 | 68 | Si |
| 323 | 40 | 40 | | 330 | 193 | 96 | 55 | 35 | 23 | 19 | 330 | 193 | 96 | 55 | 35 | 23 | 19 | 15 | 60 | | 75 | 1969 | 193 | 143 | 133 | 60 | 90 | 76 | Si |
| 324 | 41 | 29 | 20 | 240 | 166 | 107 | 71 | 47 | 33 | 26 | 235 | 163 | 105 | 70 | 46 | 32 | 25 | 30 | 70 | | 100 | 1766 | 173 | 147 | 97 | 60 | 120 | 119 | Si |
| 325 | 43 | 29 | 21 | 230 | 178 | 130 | 93 | 68 | 50 | 40 | 215 | 166 | 121 | 87 | 64 | 47 | 37 | 25 | 65 | | 90 | 1382 | 136 | 116 | 91 | 90 | 150 | 124 | Si |
| 326 | 41 | 29 | 21 | 316 | 198 | 111 | 67 | 45 | 32 | 26 | 311 | 195 | 109 | 66 | 44 | 32 | 26 | 23 | 87 | | 110 | 1846 | 181 | 134 | 134 | 60 | 120 | 112 | Si |
| 327 | 42 | 28 | 21 | 389 | 245 | 150 | 93 | 63 | 44 | 34 | 374 | 236 | 144 | 89 | 61 | 42 | 33 | 14 | 56 | | 70 | 1217 | 119 | 104 | 172 | 60 | 90 | 79 | Si |
| 328 | 41 | 29 | 19 | 335 | 194 | 116 | 74 | 48 | 34 | 30 | 326 | 189 | 113 | 72 | 47 | 33 | 29 | 12 | 63 | | | | | | | | | | |

| Punto | Deflexiones: Datos Obtenidos en Campo | | | | | | | | | | Deflexiones Corregidas por Carga (µm) | | | | | | | Espesores de Estructura | | | | Parámetros Estructurales AASHTO | | Cálculo de Módulos Método Directo | | | Verificación r, Metodología AASHTO | | | | |
|-------|---------------------------------------|-------------|------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------|------|------|---------------|---------------------------------|-----|-----------------------------------|--------------------------|----------------|------------------------------------|-----|---------|--|--|
| | Carga | Temperatura | | Deflexiones Medidas (µm) | | | | | | | | | | | | | | Capa Asfáltica | MG-1 | MG-2 | Espesor Total | Mr | Mr | Hogg | | | | | | | |
| | | Pav. | Aire | d ₀ | d ₁ | d ₂ | d ₃ | d ₄ | d ₅ | d ₆ | d _{0c} | d _{1c} | d _{2c} | d _{3c} | d _{4c} | d _{5c} | d _{6c} | | | | | | | SR | Deflexiónn (Dr/DO = 0.5) | Sensor Dr (cm) | Sensor empleado (cm) | r | Cumple? | | |
| # | kN | °C | °C | 0 cm | 30 cm | 60 cm | 90 cm | 120 cm | 150 cm | 180 cm | 0 cm | 30 cm | 60 cm | 90 cm | 120 cm | 150 cm | 180 cm | cm | cm | cm | cm | (Kg/cm ²) | MPa | (MPa) | | | | | | | |
| 346 | 43 | 23 | 14 | 251 | 190 | 137 | 100 | 85 | 69 | 59 | 236 | 178 | 129 | 94 | 80 | 65 | 55 | 16 | 69 | | 85 | 1000 | 98 | 107 | 113 | 90 | 150 | 124 | Si | | |
| 347 | 45 | 26 | 23 | 162 | 110 | 66 | 42 | 28 | 20 | 18 | 144 | 98 | 59 | 37 | 25 | 18 | 16 | 10 | 64 | 64 | 74 | 2927 | 287 | 258 | 69 | 60 | 90 | 85 | Si | | |
| 348 | 44 | 26 | 22 | 279 | 195 | 113 | 70 | 49 | 37 | 30 | 254 | 178 | 103 | 64 | 45 | 34 | 27 | 14 | 83 | | 97 | 1805 | 177 | 147 | 119 | 60 | 120 | 105 | Si | | |
| 349 | 44 | 26 | 23 | 286 | 197 | 115 | 64 | 36 | 23 | 19 | 261 | 180 | 105 | 58 | 33 | 21 | 17 | 13 | 22 | | 35 | 1547 | 152 | 144 | 123 | 60 | 60 | 49 | Si | | |
| 350 | 44 | 26 | 23 | 281 | 169 | 89 | 54 | 38 | 30 | 25 | 257 | 155 | 81 | 49 | 35 | 27 | 23 | 14 | 60 | | 74 | 2210 | 217 | 174 | 121 | 60 | 90 | 75 | Si | | |
| 351 | 43 | 29 | 27 | 439 | 268 | 121 | 59 | 35 | 22 | 19 | 409 | 250 | 113 | 55 | 33 | 21 | 18 | 8 | 19 | | 27 | 1438 | 141 | 119 | 194 | 60 | 60 | 33 | Si | | |
| 352 | 44 | 33 | 31 | 244 | 143 | 72 | 37 | 22 | 16 | 13 | 222 | 130 | 65 | 34 | 20 | 15 | 12 | 14 | 116 | | 130 | 4061 | 398 | 211 | 97 | 60 | 120 | 110 | Si | | |
| 353 | 43 | 31 | 24 | 405 | 265 | 152 | 96 | 62 | 45 | 35 | 380 | 249 | 143 | 90 | 58 | 42 | 33 | 19 | 21 | | 40 | 1136 | 111 | 104 | 163 | 60 | 60 | 54 | Si | | |
| 354 | 44 | 29 | 24 | 195 | 139 | 83 | 48 | 29 | 22 | 15 | 179 | 128 | 76 | 44 | 27 | 20 | 14 | 13 | 47 | | 60 | 2461 | 241 | 200 | 82 | 60 | 90 | 71 | Si | | |
| 355 | 44 | 34 | 31 | 262 | 173 | 97 | 57 | 34 | 25 | 17 | 241 | 159 | 89 | 52 | 31 | 23 | 16 | 23 | 67 | | 90 | 2620 | 257 | 167 | 96 | 60 | 120 | 92 | Si | | |
| 356 | 43 | 33 | 29 | 326 | 211 | 130 | 85 | 56 | 40 | 31 | 301 | 195 | 120 | 79 | 52 | 37 | 29 | 25 | 55 | | 80 | 1740 | 171 | 126 | 120 | 60 | 120 | 89 | Si | | |
| 357 | 45 | 27 | 24 | 203 | 135 | 86 | 57 | 39 | 28 | 21 | 180 | 120 | 76 | 51 | 35 | 25 | 19 | 25 | 49 | | 74 | 2321 | 228 | 200 | 79 | 60 | 120 | 88 | Si | | |
| 358 | 42 | 27 | 23 | 217 | 150 | 88 | 52 | 34 | 23 | 17 | 207 | 143 | 84 | 49 | 32 | 22 | 16 | 16 | 140 | | 156 | 2953 | 290 | 181 | 95 | 60 | 150 | 148 | Si | | |
| 359 | 44 | 31 | 26 | 226 | 164 | 107 | 70 | 46 | 32 | 24 | 203 | 148 | 96 | 63 | 41 | 29 | 22 | 23 | 53 | | 76 | 1981 | 194 | 160 | 85 | 60 | 120 | 94 | Si | | |
| 360 | 45 | 25 | 22 | 142 | 101 | 80 | 57 | 46 | 37 | 27 | 125 | 89 | 71 | 50 | 41 | 33 | 24 | 17 | 72 | | 89 | 1969 | 193 | 200 | 59 | 90 | 150 | 127 | Si | | |
| 361 | 44 | 27 | 23 | 299 | 161 | 66 | 33 | 22 | 19 | 16 | 274 | 148 | 61 | 30 | 20 | 17 | 15 | 5 | 95 | | 100 | 3610 | 354 | 200 | 133 | 60 | 90 | 79 | Si | | |
| 362 | 37 | 27 | 23 | 375 | 200 | 82 | 53 | 32 | 21 | 16 | 401 | 214 | 88 | 57 | 34 | 22 | 17 | 19 | 81 | | 100 | 2117 | 208 | 137 | 181 | 60 | 90 | 86 | Si | | |
| 363 | 45 | 27 | 21 | 200 | 142 | 84 | 53 | 33 | 23 | 17 | 177 | 126 | 75 | 47 | 29 | 20 | 15 | 18 | 42 | | 60 | 2304 | 226 | 204 | 81 | 60 | 90 | 74 | Si | | |
| 364 | 45 | 26 | 21 | 179 | 132 | 85 | 56 | 38 | 27 | 22 | 158 | 117 | 75 | 49 | 34 | 24 | 19 | 14 | 46 | | 60 | 2210 | 217 | 205 | 74 | 60 | 90 | 78 | Si | | |
| 365 | 45 | 26 | 21 | 156 | 118 | 82 | 57 | 41 | 31 | 24 | 139 | 105 | 73 | 51 | 36 | 28 | 21 | 14 | 82 | | 96 | 2321 | 228 | 195 | 65 | 90 | 150 | 121 | Si | | |
| 366 | 42 | 26 | 22 | 246 | 124 | 45 | 29 | 20 | 16 | 15 | 234 | 118 | 43 | 28 | 19 | 15 | 14 | 17 | 63 | | 80 | 3868 | 379 | 257 | 108 | 60 | 90 | 67 | Si | | |
| 367 | 46 | 26 | 22 | 270 | 190 | 115 | 74 | 52 | 40 | 29 | 236 | 166 | 100 | 65 | 45 | 35 | 25 | 17 | 104 | | 120 | 2068 | 203 | 152 | 109 | 60 | 150 | 126 | Si | | |
| 368 | 44 | 32 | 27 | 278 | 164 | 85 | 47 | 32 | 24 | 21 | 252 | 148 | 77 | 43 | 29 | 22 | 19 | 21 | 91 | | 112 | 2801 | 275 | 182 | 105 | 60 | 120 | 106 | Si | | |
| 369 | 44 | 32 | 27 | 318 | 229 | 134 | 79 | 50 | 33 | 27 | 290 | 209 | 122 | 72 | 46 | 30 | 25 | 21 | 91 | | 112 | 1766 | 173 | 125 | 121 | 60 | 120 | 120 | Si | | |
| 370 | 41 | 23 | 22 | 281 | 196 | 116 | 76 | 58 | 44 | 36 | 278 | 194 | 115 | 75 | 57 | 43 | 36 | 10 | 100 | | 110 | 1511 | 148 | 133 | 136 | 60 | 150 | 120 | Si | | |
| 371 | 40 | 29 | 27 | 342 | 205 | 104 | 65 | 40 | 32 | 27 | 342 | 205 | 104 | 65 | 40 | 32 | 27 | 16 | 44 | | 60 | 1666 | 163 | 134 | 153 | 60 | 90 | 63 | Si | | |
| 372 | 39 | 32 | 27 | 618 | 371 | 160 | 79 | 47 | 38 | 31 | 634 | 381 | 164 | 81 | 48 | 39 | 32 | 15 | 45 | | 60 | 1337 | 131 | 80 | 277 | 60 | 90 | 54 | Si | | |
| 373 | 38 | 32 | 27 | 905 | 491 | 172 | 65 | 37 | 28 | 24 | 953 | 517 | 181 | 68 | 39 | 29 | 25 | 20 | 60 | | 80 | 1593 | 156 | 62 | 400 | 60 | 90 | 57 | Si | | |
| 374 | 39 | 32 | 27 | 456 | 288 | 139 | 63 | 35 | 27 | 22 | 468 | 295 | 143 | 65 | 36 | 28 | 23 | 12 | 48 | | 60 | 1856 | 182 | 98 | 210 | 60 | 90 | 53 | Si | | |
| 375 | 37 | 32 | 27 | 967 | 521 | 194 | 87 | 56 | 45 | 37 | 1045 | 563 | 210 | 94 | 61 | 49 | 40 | 14 | 86 | | 100 | 1152 | 113 | 55 | 461 | 60 | 90 | 76 | Si | | |
| 376 | 40 | 32 | 27 | 689 | 298 | 95 | 45 | 41 | 37 | 32 | 689 | 298 | 95 | 45 | 41 | 37 | 32 | 15 | 40 | | 55 | 1710 | 168 | 103 | 301 | 60 | 60 | 44 | Si | | |
| 377 | 39 | 31 | 27 | 800 | 346 | 104 | 37 | 23 | 22 | 19 | 821 | 355 | 107 | 38 | 24 | 23 | 19 | 15 | 55 | | 70 | 1518 | 149 | 87 | 362 | 30 | 60 | 53 | Si | | |
| 378 | 41 | 35 | 27 | 647 | 296 | 212 | 163 | 109 | 88 | 73 | 631 | 289 | 207 | 159 | 106 | 86 | 71 | 18 | 12 | | 30 | 785 | 77 | 107 | 260 | 30 | 60 | 43 | Si | | |
| 379 | 40 | 32 | 22 | 352 | 174 | 53 | 38 | 27 | 19 | 15 | 354 | 175 | 53 | 38 | 27 | 19 | 15 | 10 | 50 | | 60 | 3415 | 335 | 175 | 161 | 30 | 60 | 46 | Si | | |
| 380 | 39 | 32 | 22 | 122 | 60 | 46 | 34 | 26 | 18 | 9 | 124 | 61 | 47 | 35 | 26 | 18 | 9 | 10 | 50 | | 60 | 3447 | 338 | 502 | 57 | 30 | 90 | 72 | Si | | |
| 381 | 39 | 26 | 22 | 354 | 203 | 106 | 54 | 35 | 24 | 13 | 364 | 209 | 109 | 56 | 36 | 25 | 13 | 10 | 50 | | 60 | 2154 | 211 | 127 | 174 | 60 | 90 | 54 | Si | | |
| 382 | 40 | 34 | 22 | 284 | 168 | 93 | 59 | 43 | 32 | 27 | 286 | 169 | 94 | 59 | 43 | 32 | 27 | 10 | 50 | | 60 | 2045 | 201 | 153 | 129 | 60 | 90 | 63 | Si | | |
| 383 | 40 | 33 | 21 | 273 | 120 | 48 | 37 | 21 | 14 | 9 | 276 | 121 | 48 | 37 | 21 | 14 | 9 | 10 | 50 | | 60 | 3770 | 370 | 254 | 125 | 30 | 60 | 49 | Si | | |
| 384 | 40 | 32 | 22 | 193 | 118 | 65 | 46 | 32 | 25 | 13 | 195 | 119 | 66 | 46 | 32 | 25 | 13 | 10 | 50 | | 60 | 2623 | 257 | 220 | 89 | 60 | 90 | 66 | Si | | |
| 385 | 39 | 31 | 21 | 404 | 184 | 89 | 61 | 42 | 37 | 25 | 411 | 187 | 91 | 62 | 43 | 38 | 25 | 10 | 50 | | 60 | 1989 | 195 | 164 | 189 | 30 | 60 | 54 | Si | | |
| 386 | 40 | 29 | 23 | 350 | 166 | 56 | 34 | 25 | 17 | 11 | 351 | 166 | 56 | 34 | 25 | 17 | 11 | 10 | 50 | | 60 | 3232 | 317 | 185 | 164 | 30 | 60 | 47 | Si | | |
| 387 | 40 | 32 | 25 | 184 | 93 | 44 | 29 | 24 | 16 | 8 | 182 | 92 | 44 | 29 | 24 | 16 | 8 | 10 | 50 | | 60 | 4113 | 403 | 289 | 83 | 60 | 60 | 56 | Si | | |
| 388 | 40 | 31 | 24 | 401 | 224 | 99 | 48 | 28 | 19 | 12 | 402 | 225 | 99 | 48 | 28 | 19 | 12 | 10 | 50 | | 60 | 1828 | 179 | 129 | 185 | 60 | 60 | 56 | Si | | |
| 389 | 40 | 30 | 22 | 311 | 117 | 58 | 41 | 31 | 23 | 12 | 314 | 118 | 59 | 41 | 31 | 23 | 12 | 10 | 50 | | 60 | 3067 | 301 | 252 | 145 | 30 | 60 | 50 | Si | | |
| 390 | 40 | 29 | 24 | 91 | 58 | 42 | 36 | 26 | 19 | 10 | 90 | 57 | 42 | 36 | 26 | 19 | 10 | 10 | 50 | | 60 | 3351 | 329 | 370 | 42 | 60 | 90 | 85 | Si | | |
| 391 | 40 | 31 | 24 | 250 | 104 | 64 | 47 | 32 | 23 | 12 | 249 | 103 | 64 | 47 | 32 | 23 | 12 | 10 | 50 | | 60 | 2828 | 277 | 294 | 114 | 30 | 60 | 57 | Si | | |
| 392 | 40 | 35 | 28 | 509 | 265 | 127 | 68 | 41 | 27 | 18 | 506 | 264 | 126 | 68 | 41 | 27 | 18 | 10 | 50 | | 60 | 1436 | 141 | 102 | 226 | 60 | 60 | 57 | Si | | |
| 393 | 40 | 35 | 26 | 200 | 99 | 49 | 24 | 14 | 10 | 6 | 201 | 99 | 49 | 24 | 14 | 10 | 6 | 10 | 50 | | 60 | 3693 | 362 | 308 | 90 | 30 | 60 | 57 | Si | | |
| 394 | 39 | 30 | 25 | 95 | 65 | 44 | 28 | 20 | 14 | 10 | 96 | 66 | 45 | 28 | 20 | 14 | 10 | 10 | 50 | | 60 | 4309 | 423 | 344 | 45 | 60 | 90 | 73 | Si | | |
| 395 | 41 | 35 | 29 | 274 | 152 | 86 | 47 | 26 | 16 | 10 | 269 | 149 | 84 | 46 | 25 | 16 | 10 | 10 | 50 | | 60 | 2623 | 257 | 167 | 120 | 60 | 90 | 58 | Si | | |
| 396 | 40 | 34 | 26 | 238 | 150 | 86 | 54 | 35 | 26 | 14 | 238 | 150 | 86 | 54 | 35 | 26 | 14 | 10 | 50 | | 60 | 2234 | 219 | 172 | 107 | 60 | 90 | 65 | Si | | |
| 397 | 40 | 34 | 27 | 417 | 235 | 125 | 59 | 30 | 19 | 10 | 417 | 235 | 125 | 59 | 30 | 19 | 10 | 10 | 50 | | 60 | 2045 | 201 | 111 | 188 | 60 | 90 | 53 | Si | | |
| 398 | 40 | 35 | 28 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| Punto | Deflexiones: Datos Obtenidos en Campo | | | | | | | | | | Deflexiones Corregidas por Carga (µm) | | | | | | | Espesores de Estructura | | | | Parámetros Estructurales AASHTO | | Cálculo de Módulos Método Directo | | | Verificación r, Metodología AASHTO | | |
|-------|---------------------------------------|-------------|------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------------------|-------|-------|---------------|--------|--------|-----------------|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------------|-----------------|-----------------------------------|--------------------------|----------------|------------------------------------|-----|---------|
| | Carga | Temperatura | | Deflexiones Medidas (µm) | | | | | | | Capa Asfáltica | MG-1 | MG-2 | Espesor Total | Mr | Mr | Hogg | | | | | | | | | | | | |
| | | Pav. | Aire | d ₀ | d ₁ | d ₂ | d ₃ | d ₄ | d ₅ | d ₆ | | | | | | | d _{0c} | d _{1c} | d _{2c} | d _{3c} | d _{4c} | d _{5c} | d _{6c} | SR | Deflexiónn (Dr/DO = 0.5) | Sensor Dr (cm) | | | |
| # | kN | °C | °C | 0 cm | 30 cm | 60 cm | 90 cm | 120 cm | 150 cm | 180 cm | 0 cm | 30 cm | 60 cm | 90 cm | 120 cm | 150 cm | 180 cm | cm | cm | cm | cm | (Kg/cm ²) | MPa | (MPa) | | | Sensor empleado (cm) | r | Cumple? |
| 415 | 41 | 31 | 26 | 165 | 105 | 66 | 44 | 36 | 27 | 22 | 161 | 102 | 64 | 43 | 35 | 26 | 21 | 10 | 50 | | 60 | 2806 | 275 | 235 | 74 | 60 | 90 | 70 | Si |
| 416 | 39 | 21 | 17 | 629 | 328 | 153 | 88 | 59 | 37 | 10 | 647 | 337 | 157 | 90 | 61 | 38 | 10 | 10 | 50 | | 60 | 1153 | 113 | 81 | 321 | 60 | 60 | 54 | Si |
| 417 | 40 | 21 | 18 | 134 | 105 | 48 | 33 | 24 | 14 | 11 | 133 | 104 | 48 | 33 | 24 | 14 | 11 | 10 | 50 | | 60 | 3656 | 359 | 309 | 66 | 60 | 90 | 65 | Si |
| 418 | 40 | 21 | 17 | 128 | 72 | 46 | 31 | 21 | 15 | 9 | 129 | 73 | 46 | 31 | 21 | 15 | 9 | 10 | 50 | | 60 | 3892 | 382 | 318 | 64 | 60 | 90 | 64 | Si |
| 419 | 40 | 21 | 18 | 95 | 58 | 47 | 38 | 27 | 18 | 10 | 96 | 59 | 48 | 38 | 27 | 18 | 10 | 10 | 50 | | 60 | 3175 | 311 | 322 | 48 | 60 | 90 | 82 | Si |
| 420 | 41 | 23 | 19 | 247 | 136 | 59 | 35 | 26 | 20 | 11 | 243 | 134 | 58 | 34 | 26 | 20 | 11 | 10 | 50 | | 60 | 3120 | 306 | 217 | 119 | 60 | 60 | 54 | Si |
| 421 | 40 | 31 | 28 | 214 | 98 | 51 | 34 | 23 | 18 | 12 | 213 | 98 | 51 | 34 | 23 | 18 | 12 | 10 | 50 | | 60 | 3549 | 348 | 316 | 98 | 30 | 60 | 55 | Si |
| 422 | 40 | 31 | 23 | 239 | 130 | 67 | 46 | 39 | 25 | 16 | 240 | 131 | 67 | 46 | 39 | 25 | 16 | 10 | 50 | | 60 | 2623 | 257 | 201 | 110 | 60 | 90 | 60 | Si |
| 423 | 40 | 25 | 24 | 271 | 116 | 75 | 43 | 28 | 21 | 11 | 271 | 116 | 75 | 43 | 28 | 21 | 11 | 10 | 50 | | 60 | 2806 | 275 | 265 | 130 | 30 | 90 | 54 | Si |
| 424 | 40 | 24 | 23 | 278 | 169 | 97 | 55 | 31 | 17 | 9 | 278 | 169 | 97 | 55 | 31 | 17 | 9 | 10 | 50 | | 60 | 2194 | 215 | 151 | 135 | 60 | 90 | 59 | Si |
| 425 | 41 | 25 | 22 | 102 | 72 | 49 | 30 | 21 | 17 | 10 | 101 | 71 | 48 | 30 | 21 | 17 | 10 | 10 | 50 | | 60 | 4022 | 395 | 317 | 48 | 60 | 90 | 72 | Si |
| 426 | 40 | 25 | 24 | 104 | 68 | 43 | 28 | 21 | 16 | 12 | 103 | 67 | 43 | 28 | 21 | 16 | 12 | 10 | 50 | | 60 | 4309 | 423 | 357 | 50 | 60 | 90 | 69 | Si |
| 427 | 40 | 26 | 25 | 140 | 95 | 61 | 44 | 29 | 20 | 16 | 140 | 95 | 61 | 44 | 29 | 20 | 16 | 10 | 50 | | 60 | 2742 | 269 | 253 | 67 | 60 | 90 | 74 | Si |
| 428 | 40 | 27 | 27 | 118 | 73 | 44 | 33 | 25 | 17 | 6 | 117 | 72 | 44 | 33 | 25 | 17 | 6 | 10 | 50 | | 60 | 3656 | 359 | 342 | 55 | 60 | 90 | 71 | Si |
| 429 | 41 | 27 | 24 | 217 | 109 | 46 | 26 | 19 | 15 | 11 | 213 | 107 | 45 | 25 | 19 | 15 | 11 | 10 | 50 | | 60 | 4022 | 395 | 263 | 101 | 60 | 60 | 52 | Si |
| 430 | 40 | 33 | 29 | 167 | 89 | 43 | 33 | 20 | 17 | 11 | 167 | 89 | 43 | 33 | 20 | 17 | 11 | 10 | 50 | | 60 | 3656 | 359 | 304 | 75 | 60 | 90 | 61 | Si |
| 431 | 43 | 17 | 17 | 416 | 160 | 126 | 73 | 55 | 45 | 25 | 387 | 148 | 118 | 68 | 51 | 42 | 23 | 20 | 50 | | 70 | 1593 | 156 | 202 | 203 | 30 | 90 | 66 | Si |
| 432 | 41 | 17 | 17 | 322 | 182 | 142 | 81 | 73 | 73 | 51 | 314 | 177 | 139 | 79 | 72 | 71 | 50 | 20 | 50 | | 70 | 1527 | 150 | 111 | 165 | 60 | 90 | 73 | Si |
| 433 | 37 | 17 | 17 | 340 | 217 | 142 | 82 | 75 | 56 | 40 | 368 | 234 | 153 | 88 | 81 | 61 | 43 | 20 | 50 | | 70 | 1371 | 134 | 99 | 193 | 60 | 90 | 71 | Si |
| 434 | 40 | 17 | 17 | 429 | 287 | 183 | 87 | 65 | 51 | 39 | 429 | 287 | 183 | 87 | 65 | 51 | 39 | 20 | 50 | | 70 | 1387 | 136 | 84 | 225 | 60 | 90 | 67 | Si |
| 435 | 42 | 17 | 17 | 399 | 221 | 141 | 82 | 61 | 48 | 31 | 380 | 211 | 135 | 78 | 58 | 45 | 30 | 20 | 50 | | 70 | 1547 | 152 | 109 | 200 | 60 | 90 | 67 | Si |
| 436 | 39 | 19 | 16 | 468 | 246 | 160 | 122 | 85 | 66 | 28 | 480 | 252 | 164 | 125 | 87 | 68 | 29 | 30 | 45 | | 75 | 866 | 85 | 88 | 246 | 60 | 90 | 84 | Si |
| 437 | 39 | 21 | 16 | 536 | 277 | 110 | 64 | 46 | 35 | 22 | 550 | 284 | 113 | 66 | 47 | 36 | 23 | 25 | 45 | | 70 | 1641 | 161 | 104 | 269 | 60 | 90 | 58 | Si |
| 438 | 42 | 18 | 14 | 482 | 269 | 181 | 124 | 89 | 68 | 59 | 459 | 256 | 172 | 118 | 85 | 65 | 56 | 22 | 48 | | 70 | 918 | 90 | 86 | 238 | 60 | 90 | 78 | Si |
| 439 | 42 | 19 | 27 | 232 | 176 | 123 | 81 | 76 | 43 | 35 | 219 | 166 | 116 | 76 | 72 | 41 | 33 | 21 | 89 | | 110 | 1766 | 173 | 127 | 111 | 90 | 150 | 122 | Si |
| 440 | 43 | 23 | 18 | 101 | 63 | 51 | 33 | 25 | 19 | 11 | 94 | 58 | 47 | 31 | 23 | 18 | 10 | 21 | 89 | | 110 | 3610 | 354 | 311 | 45 | 90 | 150 | 133 | Si |
| 441 | 42 | 23 | 17 | 232 | 118 | 89 | 72 | 52 | 38 | 25 | 220 | 112 | 85 | 68 | 49 | 36 | 24 | 20 | 40 | | 60 | 1593 | 156 | 177 | 105 | 60 | 90 | 78 | Si |
| 442 | 42 | 22 | 19 | 233 | 143 | 99 | 81 | 55 | 39 | 24 | 224 | 137 | 95 | 78 | 53 | 37 | 23 | 24 | 36 | | 60 | 1388 | 136 | 161 | 108 | 60 | 90 | 82 | Si |
| 443 | 42 | 27 | 23 | 338 | 226 | 154 | 75 | 68 | 53 | 39 | 325 | 217 | 148 | 72 | 65 | 51 | 38 | 32 | 38 | | 70 | 1504 | 148 | 104 | 138 | 60 | 90 | 80 | Si |
| 444 | 41 | 30 | 22 | 382 | 253 | 129 | 88 | 71 | 55 | 44 | 370 | 245 | 125 | 85 | 69 | 53 | 43 | 19 | 51 | | 70 | 1274 | 125 | 116 | 161 | 60 | 90 | 80 | Si |
| 445 | 42 | 27 | 21 | 402 | 313 | 279 | 242 | 194 | 146 | 133 | 386 | 300 | 268 | 232 | 186 | 140 | 128 | 28 | 42 | | 70 | 464 | 46 | 42 | 167 | 150 | 150 | 133 | Si |
| 446 | 43 | 23 | 18 | 243 | 177 | 120 | 82 | 48 | 37 | 29 | 228 | 166 | 112 | 77 | 45 | 35 | 27 | 22 | 88 | | 110 | 1856 | 182 | 136 | 108 | 60 | 150 | 121 | Si |
| 447 | 43 | 20 | 17 | 172 | 126 | 100 | 77 | 64 | 50 | 41 | 161 | 118 | 94 | 72 | 60 | 47 | 38 | 33 | 87 | | 120 | 1425 | 140 | 142 | 81 | 90 | 180 | 166 | Si |
| 448 | 41 | 27 | 26 | 632 | 363 | 179 | 133 | 88 | 68 | 43 | 611 | 351 | 173 | 129 | 85 | 66 | 42 | 14 | 46 | | 60 | 839 | 82 | 78 | 283 | 60 | 90 | 66 | Si |
| 449 | 42 | 26 | 24 | 395 | 264 | 154 | 105 | 81 | 66 | 43 | 378 | 253 | 147 | 100 | 78 | 63 | 41 | 12 | 38 | | 50 | 1083 | 106 | 102 | 179 | 60 | 90 | 62 | Si |
| 450 | 41 | 30 | 24 | 458 | 240 | 116 | 66 | 55 | 48 | 42 | 450 | 236 | 114 | 65 | 54 | 47 | 41 | 9 | 41 | | 50 | 1425 | 140 | 113 | 210 | 60 | 60 | 50 | Si |
| 451 | 41 | 32 | 26 | 427 | 192 | 105 | 75 | 50 | 35 | 27 | 421 | 189 | 103 | 74 | 49 | 34 | 27 | 8 | 52 | | 60 | 1577 | 155 | 163 | 195 | 30 | 60 | 58 | Si |
| 452 | 42 | 33 | 30 | 186 | 90 | 44 | 36 | 31 | 20 | 15 | 179 | 87 | 42 | 35 | 30 | 19 | 14 | 8 | 62 | | 70 | 3094 | 304 | 354 | 83 | 30 | 90 | 72 | Si |
| 453 | 42 | 30 | 26 | 355 | 197 | 96 | 69 | 40 | 33 | 27 | 336 | 186 | 91 | 65 | 38 | 31 | 26 | 18 | 72 | | 90 | 2137 | 210 | 147 | 147 | 60 | 120 | 84 | Si |
| 454 | 42 | 24 | 20 | 200 | 114 | 67 | 44 | 37 | 27 | 23 | 190 | 108 | 64 | 42 | 35 | 26 | 22 | 17 | 43 | | 60 | 2873 | 282 | 227 | 90 | 60 | 90 | 63 | Si |
| 455 | 42 | 22 | 18 | 263 | 149 | 69 | 56 | 43 | 32 | 25 | 253 | 143 | 66 | 54 | 41 | 31 | 24 | 16 | 44 | | 60 | 2461 | 241 | 198 | 123 | 60 | 60 | 59 | Si |
| 456 | 42 | 24 | 20 | 195 | 107 | 55 | 28 | 19 | 12 | 9 | 186 | 102 | 53 | 27 | 18 | 11 | 9 | 13 | 137 | | 150 | 6581 | 646 | 258 | 89 | 60 | 150 | 109 | Si |
| 457 | 42 | 24 | 21 | 150 | 77 | 35 | 26 | 19 | 15 | 8 | 143 | 74 | 33 | 25 | 18 | 14 | 8 | 17 | 48 | | 65 | 4826 | 473 | 373 | 68 | 60 | 90 | 61 | Si |
| 458 | 42 | 27 | 19 | 392 | 250 | 124 | 74 | 44 | 31 | 22 | 376 | 240 | 119 | 71 | 42 | 30 | 21 | 15 | 135 | | 150 | 2413 | 237 | 119 | 173 | 60 | 150 | 123 | Si |
| 459 | 43 | 16 | 11 | 180 | 118 | 84 | 51 | 41 | 34 | 23 | 167 | 109 | 78 | 47 | 38 | 31 | 21 | 19 | 51 | | 70 | 2567 | 252 | 198 | 89 | 60 | 90 | 76 | Si |
| 460 | 43 | 13 | 10 | 264 | 175 | 126 | 89 | 49 | 35 | 20 | 245 | 162 | 117 | 83 | 45 | 32 | 19 | 27 | 93 | | 120 | 2011 | 197 | 131 | 144 | 60 | 120 | 114 | Si |
| 461 | 43 | 14 | 9 | 265 | 174 | 86 | 50 | 25 | 19 | 12 | 246 | 161 | 80 | 46 | 23 | 18 | 11 | 25 | 85 | | 110 | 3531 | 346 | 179 | 140 | 60 | 120 | 86 | Si |
| 462 | 43 | 13 | 9 | 332 | 135 | 47 | 38 | 29 | 19 | 12 | 310 | 126 | 44 | 35 | 27 | 18 | 11 | 25 | 45 | | 70 | 4113 | 403 | 241 | 180 | 30 | 60 | 48 | Si |
| 463 | 44 | 14 | 7 | 109 | 95 | 75 | 56 | 47 | 43 | 35 | 99 | 86 | 68 | 51 | 43 | 39 | 32 | 40 | 80 | | 120 | 1692 | 166 | 181 | 61 | 120 | 180 | 174 | Si |
| 464 | 44 | 17 | 12 | 136 | 92 | 53 | 26 | 20 | 16 | 11 | 125 | 84 | 49 | 24 | 18 | 15 | 10 | 20 | 20 | | 40 | 3693 | 362 | 309 | 66 | 60 | 60 | 47 | Si |
| 465 | 43 | 19 | 14 | 319 | 214 | 129 | 52 | 38 | 23 | 13 | 297 | 200 | 120 | 48 | 35 | 21 | 12 | 30 | 80 | | 110 | 2321 | 228 | 126 | 152 | 60 | 120 | 97 | Si |
| 466 | 44 | 14 | 9 | 170 | 124 | 87 | 60 | 43 | 37 | 33 | 156 | 114 | 80 | 55 | 39 | 34 | 30 | 30 | 80 | | 110 | 1911 | 187 | 178 | 91 | 90 | 150 | 129 | Si |
| 467 | 43 | 21 | 17 | 142 | 87 | 51 | 38 | 28 | 20 | 14 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| Punto | Deflexiones: Datos Obtenidos en Campo | | | | | | | | | | Deflexiones Corregidas por Carga (μm) | | | | | | | Espesores de Estructura | | | | Parámetros Estructurales AASHTO | | Cálculo de Módulos Método Directo | | | Verificación r, Metodología AASHTO | | | |
|-------|---------------------------------------|-------------|------|---------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------|------|------|---------------|---------------------------------|-----|-----------------------------------|--------------------------|----------------|------------------------------------|-----|---------|--|
| | Carga | Temperatura | | Deflexiones Medidas (μm) | | | | | | | | | | | | | | Capa Asfáltica | MG-1 | MG-2 | Espesor Total | Mr | Mr | Hogg | | | | | | |
| | | Pav. | Aire | d ₀ | d ₁ | d ₂ | d ₃ | d ₄ | d ₅ | d ₆ | d _{0c} | d _{1c} | d _{2c} | d _{3c} | d _{4c} | d _{5c} | d _{6c} | | | | | | | SR | Deflexiónn (Dr/D0 = 0.5) | Sensor Dr (cm) | Sensor empleado (cm) | r | Cumple? | |
| # | kN | °C | °C | 0 cm | 30 cm | 60 cm | 90 cm | 120 cm | 150 cm | 180 cm | 0 cm | 30 cm | 60 cm | 90 cm | 120 cm | 150 cm | 180 cm | cm | cm | cm | cm | (Kg/cm ³) | MPa | (MPa) | | | | | | |
| 484 | 41.8 | 20 | 16 | 135 | 92 | 70 | 47 | 39 | 30 | 20 | 129 | 88 | 67 | 45 | 37 | 29 | 19 | 25 | 45 | | 70 | 2195 | 215 | 216 | 65 | 90 | 120 | 95 | Si | |
| 485 | 42.7 | 21 | 17 | 114 | 71 | 49 | 31 | 24 | 16 | 11 | 107 | 67 | 46 | 29 | 22 | 15 | 10 | 25 | 55 | | 80 | 4113 | 403 | 335 | 52 | 60 | 120 | 88 | Si | |
| 486 | 42.5 | 22 | 20 | 1511 | 93 | 62 | 47 | 35 | 34 | 19 | 1422 | 88 | 58 | 44 | 33 | 32 | 18 | 25 | 45 | | 70 | 3120 | 306 | 129 | 684 | 30 | 60 | 33 | Si | |
| 487 | 42.4 | 22 | 18 | 151 | 79 | 45 | 41 | 32 | 23 | 14 | 142 | 75 | 42 | 39 | 30 | 22 | 13 | 22 | 18 | | 40 | 4309 | 423 | 326 | 69 | 60 | 60 | 42 | Si | |
| 488 | 41.8 | 22 | 18 | 167 | 134 | 95 | 83 | 37 | 29 | 23 | 160 | 128 | 91 | 79 | 35 | 28 | 22 | 23 | 67 | | 90 | 2321 | 228 | 129 | 77 | 90 | 120 | 106 | Si | |
| 489 | 41.4 | 21 | 16 | 122 | 88 | 65 | 43 | 32 | 23 | 13 | 118 | 85 | 63 | 42 | 31 | 22 | 13 | 23 | 67 | | 90 | 2620 | 257 | 235 | 58 | 90 | 120 | 114 | Si | |
| 490 | 41 | 20 | 17 | 147 | 58 | 49 | 31 | 25 | 19 | 15 | 143 | 57 | 48 | 30 | 24 | 19 | 15 | 30 | 60 | | 90 | 3384 | 332 | 533 | 72 | 30 | 120 | 93 | Si | |
| 491 | 41.9 | 21 | 17 | 119 | 82 | 58 | 41 | 34 | 28 | 23 | 114 | 78 | 55 | 39 | 32 | 27 | 22 | 20 | 50 | | 70 | 2538 | 249 | 277 | 56 | 60 | 120 | 95 | Si | |
| 492 | 41.7 | 21 | 13 | 124 | 89 | 68 | 45 | 40 | 33 | 21 | 119 | 85 | 65 | 43 | 38 | 32 | 20 | 40 | 50 | | 90 | 2031 | 199 | 228 | 58 | 90 | 150 | 129 | Si | |
| 493 | 41.3 | 23 | 18 | 245 | 131 | 95 | 56 | 45 | 38 | 37 | 237 | 127 | 92 | 54 | 44 | 37 | 36 | 30 | 60 | | 90 | 1846 | 181 | 163 | 111 | 60 | 120 | 100 | Si | |
| 494 | 40.7 | 22 | 18 | 285 | 149 | 90 | 74 | 65 | 28 | 11 | 280 | 146 | 88 | 73 | 64 | 28 | 11 | 30 | 20 | | 50 | 2057 | 202 | 160 | 134 | 60 | 60 | 52 | Si | |
| 495 | 42.1 | 30 | 28 | 105 | 39 | 33 | 24 | 15 | 10 | 9 | 100 | 37 | 31 | 23 | 14 | 10 | 9 | 30 | 40 | | 70 | 5246 | 515 | 802 | 40 | 30 | 90 | 79 | Si | |
| 496 | 42.7 | 30 | 28 | 64 | 34 | 28 | 23 | 18 | 14 | 11 | 60 | 32 | 26 | 22 | 17 | 13 | 10 | 30 | 40 | | 70 | 5323 | 522 | 586 | 24 | 60 | 120 | 100 | Si | |
| 497 | 42.3 | 26 | 22 | 142 | 106 | 71 | 62 | 44 | 37 | 28 | 134 | 100 | 67 | 59 | 42 | 35 | 26 | 40 | 30 | | 70 | 2154 | 211 | 175 | 56 | 90 | 120 | 103 | Si | |
| 498 | 42.8 | 24 | 21 | 112 | 68 | 48 | 36 | 29 | 22 | 14 | 105 | 64 | 45 | 34 | 27 | 21 | 13 | 30 | 40 | | 70 | 3351 | 329 | 343 | 48 | 60 | 120 | 90 | Si | |
| 499 | 41.3 | 27 | 25 | 291 | 173 | 92 | 58 | 42 | 34 | 29 | 282 | 168 | 89 | 56 | 41 | 33 | 28 | 30 | 40 | | 70 | 2154 | 211 | 159 | 121 | 60 | 90 | 72 | Si | |
| 500 | 42.2 | 29 | 24 | 184 | 79 | 62 | 39 | 32 | 28 | 23 | 174 | 75 | 59 | 37 | 30 | 27 | 22 | 20 | 70 | | 90 | 3016 | 296 | 411 | 76 | 30 | 120 | 95 | Si | |
| 501 | 41.6 | 29 | 26 | 254 | 110 | 58 | 40 | 35 | 29 | 21 | 244 | 106 | 56 | 38 | 34 | 28 | 20 | 25 | 45 | | 70 | 3175 | 311 | 291 | 103 | 30 | 90 | 65 | Si | |

**ANEXO 4. CORRELACIONES CBR, DEFLEXIONES VERSUS PARÁMETROS
DEL SUELO**

1 Análisis correlación CBR, deflexión, MR versus propiedades de suelo

1.1 Suelos finos: CBR muestra inalterada humedad natural

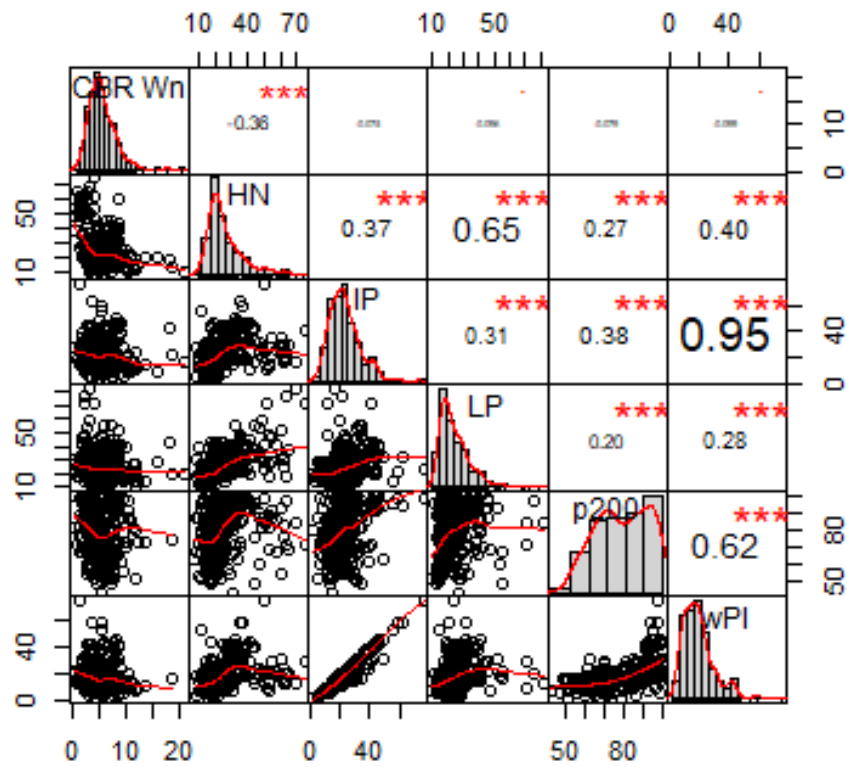
HN: humedad natural

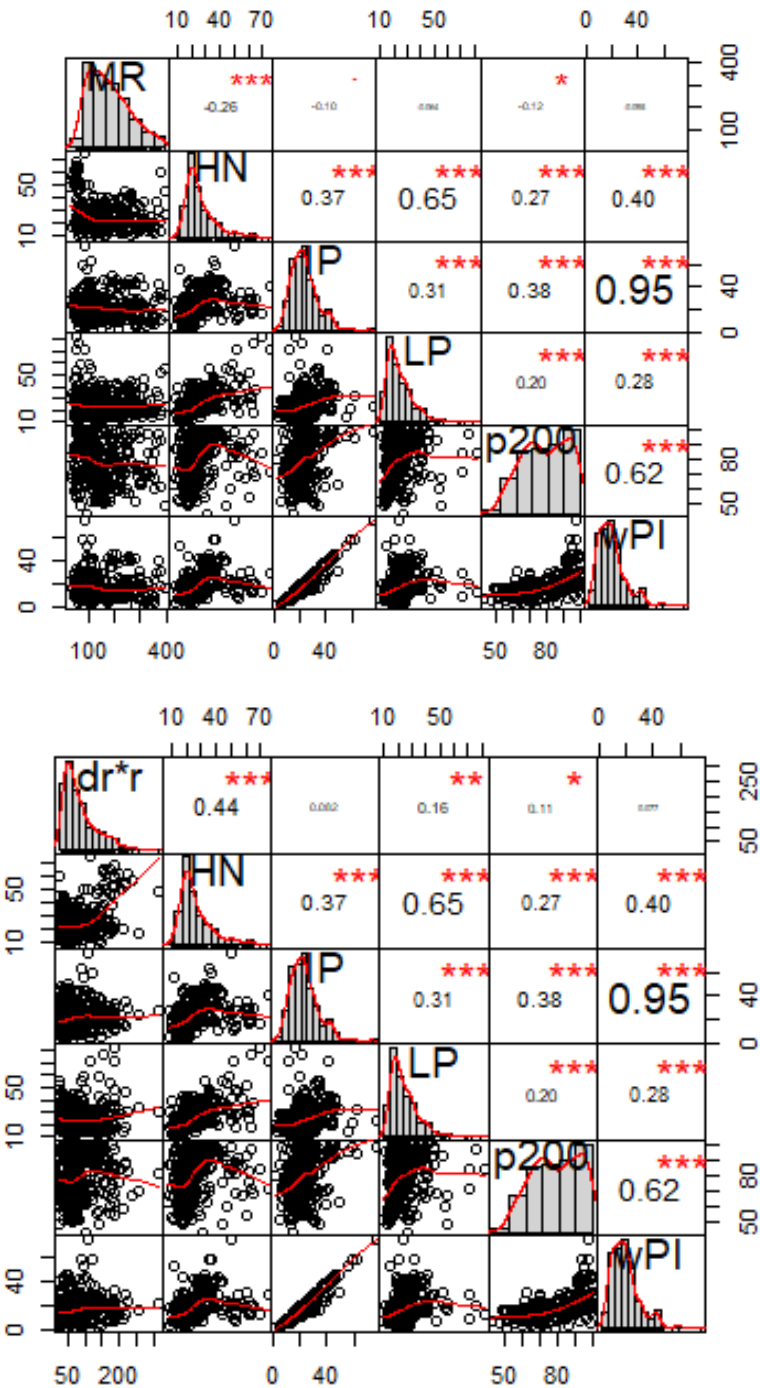
IP: índice de plasticidad

LP: Limite plástico

P200: pasa 200

wPI: Pasa 200, índice de plasticidad





El signo negativo indica que existe una correlación negativa entre las dos variables, mientras los valores de una incrementan los de la otra variable disminuyen.

Tabla 1. Valores de coeficiente de correlación, suelos finos

| | HN | IP | LP | P200 | wPI |
|-------------|-------|----------|----------|----------|----------|
| CBR Wn | 0.36 | -0.096 | -0.096 | -0.079 | -0.099 |
| Correlación | Baja | Muy baja | Muy baja | Muy baja | Muy baja |
| MR | -0.26 | -0.10 | -0.064 | -0.12 | -0.095 |

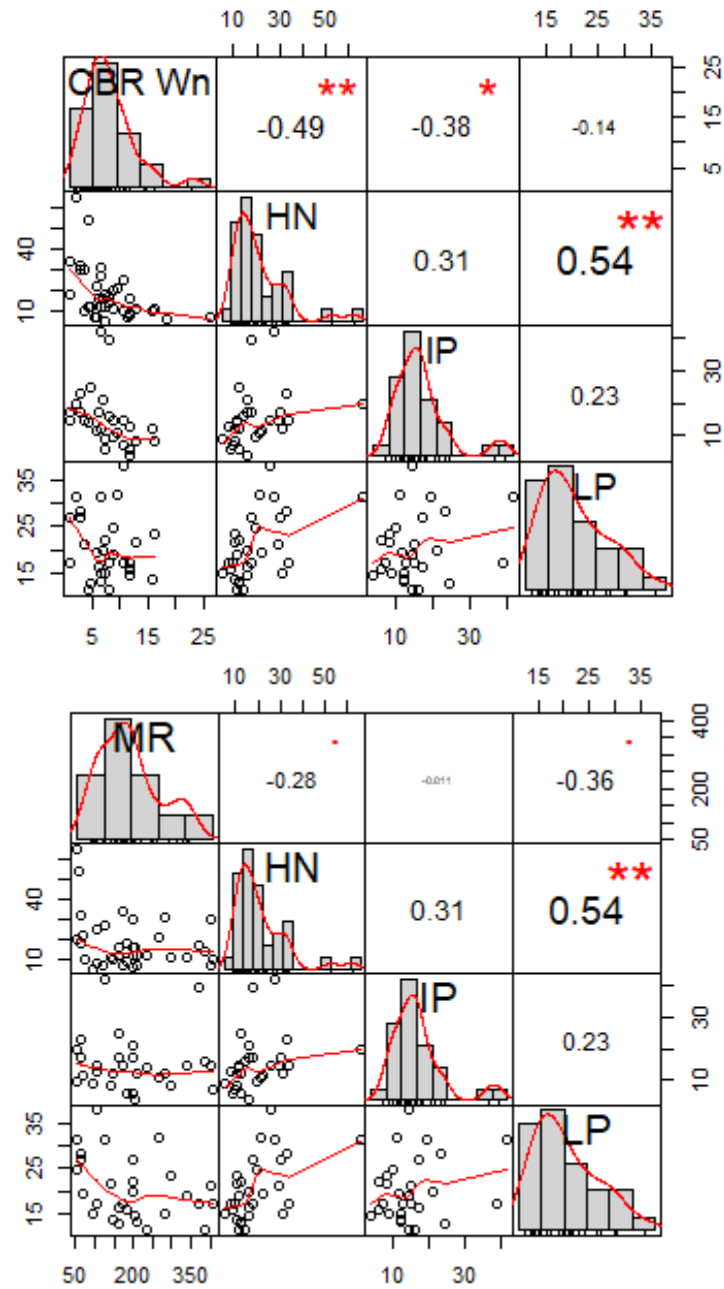
| | HN | IP | LP | P200 | wPI |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Correlación | Baja | Muy baja | Muy baja | Muy baja | Muy baja |
| r^2 | 0.44 | 0.002 | 0.16 | 0.11 | 0.077 |
| Correlación | Moderada | Muy baja | Muy baja | Muy baja | Muy baja |

1.2 Suelos arenosos: CBR muestra inalterada humedad natural

HN: humedad natural

IP: índice de plasticidad

LP: Limite plástico



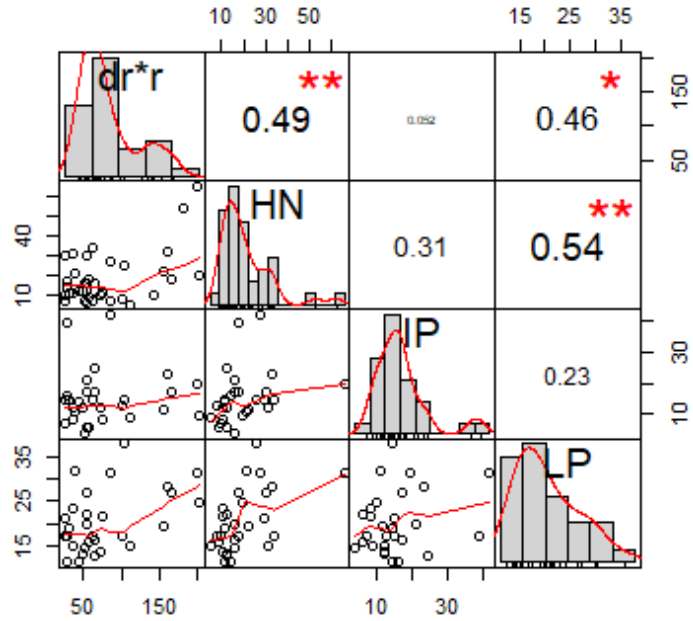
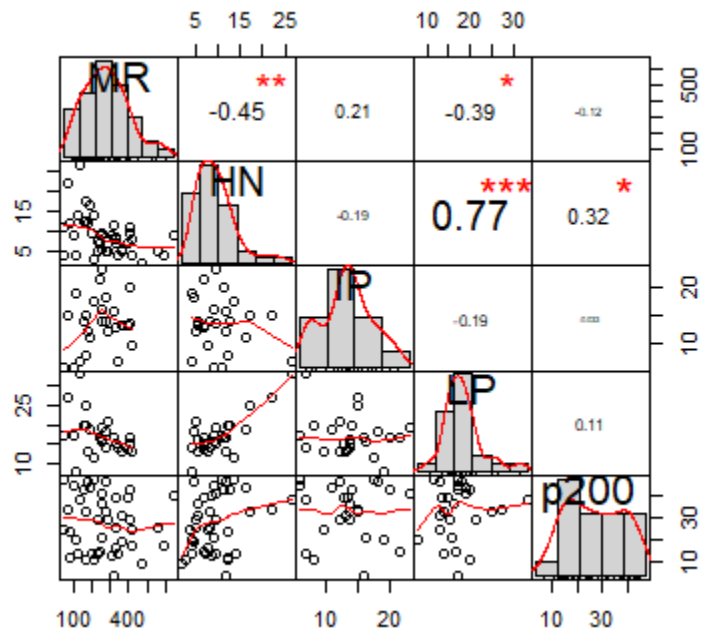
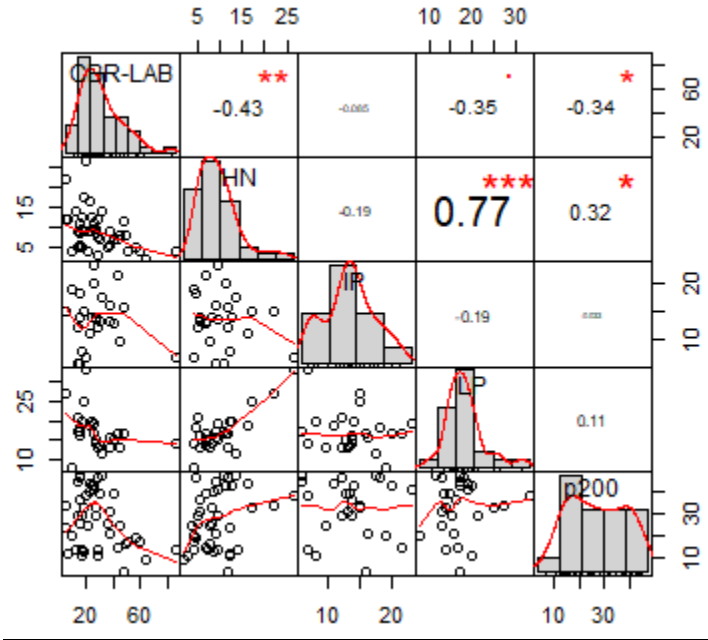


Tabla 2. Valores de coeficiente de correlación, arenas CBR Wn

| | HN | IP | LP |
|-------------|----------|----------|----------|
| CBR Wn | -0.49 | -0.38 | -0.14 |
| Correlación | Moderada | Baja | Baja |
| MR | -0.28 | -0.011 | -0.36 |
| Correlación | Baja | Muy baja | Baja |
| dr*r | 0.49 | 0.052 | 0.46 |
| Correlación | Moderada | Muy baja | Moderada |

1.3 Suelos arenosos: CBR muestra compactada en laboratorio, inmersión

HN: humedad natural
 IP: índice de plasticidad
 LP: Limite plástico
 P200: pasa 200



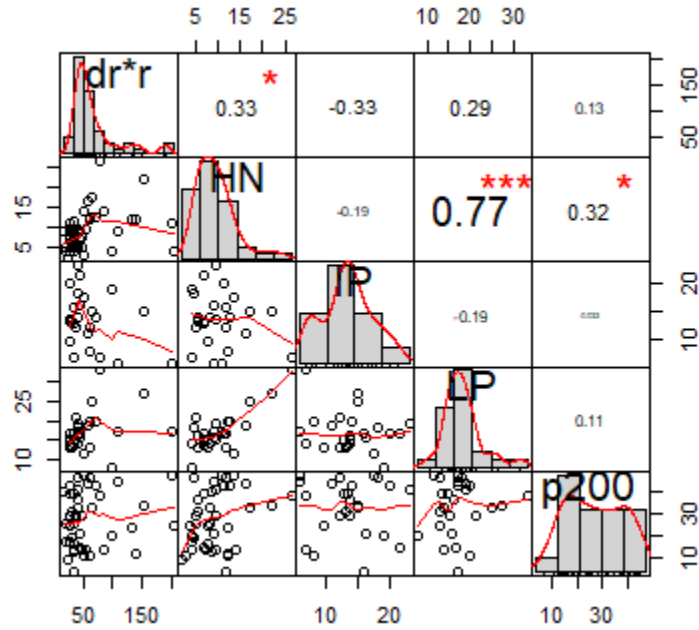


Tabla 3. Valores de coeficiente de correlación, arenas CBR WLab

| | HN | IP | LP | P200 |
|-------------|----------|----------|-------|----------|
| CBR WLab | -0.43 | -0.085 | -0.35 | -0.34 |
| Correlación | Moderada | Muy baja | Baja | Baja |
| MR | -0.40 | 0.21 | -0.39 | -0.12 |
| Correlación | Moderada | Baja | Baja | Muy Baja |
| dr*r | 0.33 | -0.33 | 0.29 | 0.13 |
| Correlación | Baja | Baja | Baja | Muy Baja |

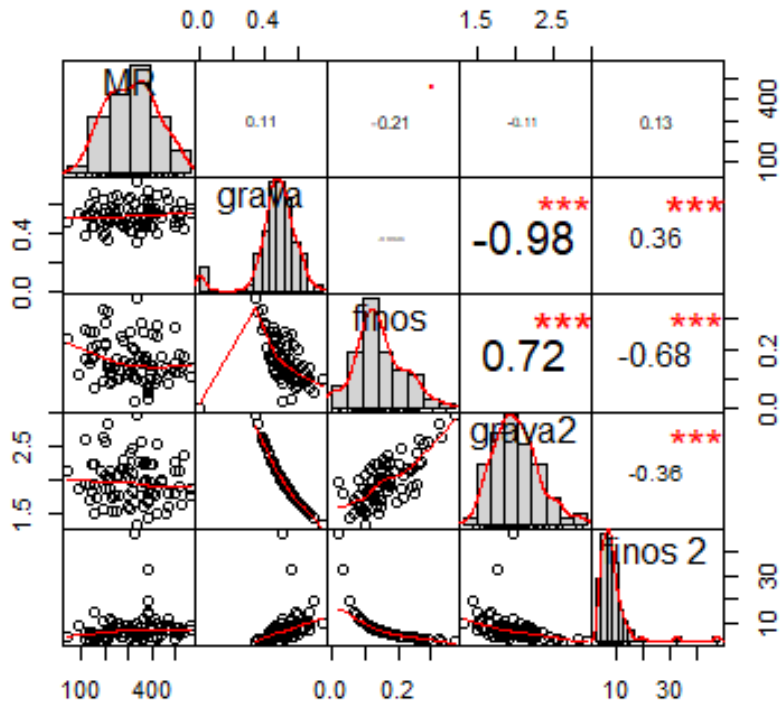
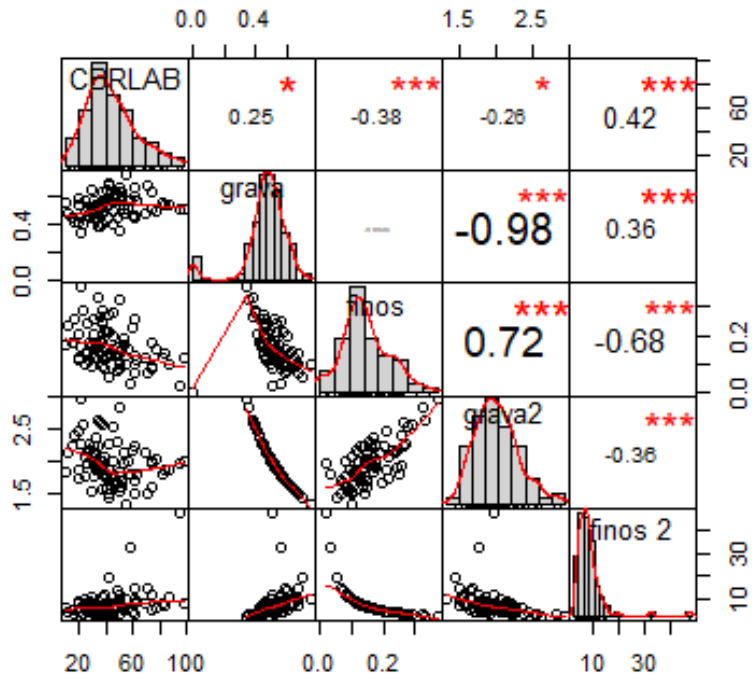
1.4 Suelos tipo grava: CBR muestra compactada en laboratorio, inmersión

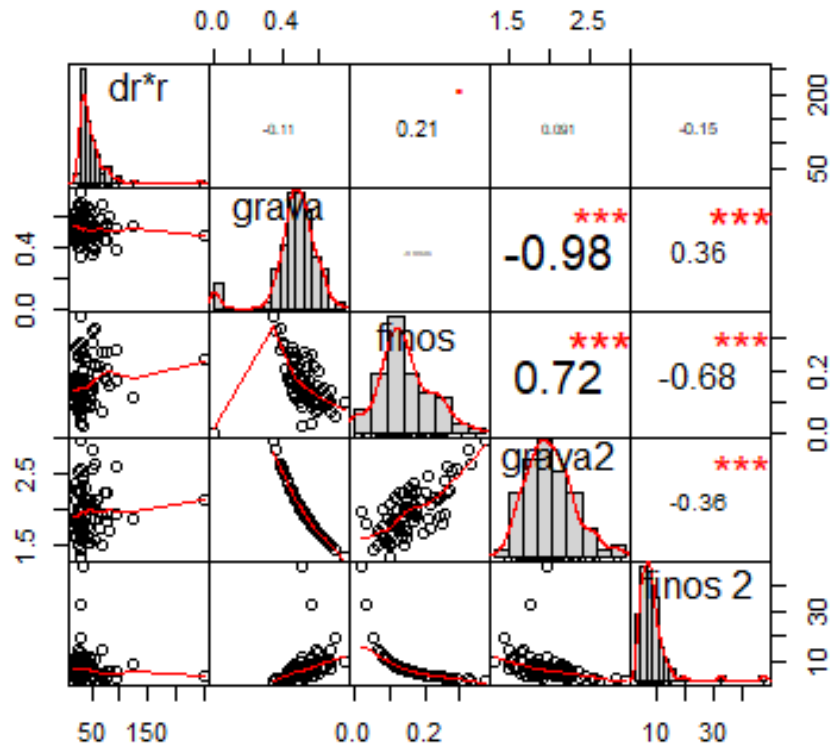
% finos: porcentaje de finos

% gravas: porcentaje de gravas

Tabla 4. Valores de coeficiente de correlación, gravas CBR WLab

| | % gravas | % finos | 1 / % gravas (gravas 2) | 1 / % finos (finos 2) |
|-------------|----------|----------|----------------------------|--------------------------|
| CBR WLab | 0.25 | -0.38 | -0.26 | 0.42 |
| Correlación | Baja | Baja | Baja | Moderada |
| MR | 0.11 | -0.21 | -0.11 | 0.13 |
| Correlación | Muy baja | Baja | Muy baja | Muy baja |
| dr*r | -0.11 | 0.21 | 0.091 | -0.15 |
| Correlación | Muy baja | Muy baja | Muy baja | Muy baja |





**ANEXO 5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO, MODELO MLG PARÁMETROS MÉTODO
DIRECTO**

1 Empleando los parámetros obtenidos por el método directo

1.1 Modelos de regresión para suelos finos, CBR muestra inalterada humedad natural

Utilizando los parámetros dr , r_{50} y humedad natural (HN) para crear los modelos de regresión lineal generalizado, se tiene las siguientes ecuaciones empleando los betas del modelo:

$$\frac{1}{f(x)} = 0.0520434 + 0.0010484 * dr * r_{50} + 0.0024452 * HN$$

| Coefficients: | | | | |
|--|-----------|------------|---------|--------------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| (Intercept) | 0.0520434 | 0.0113799 | 4.573 | 6.77e-06 *** |
| `dr*r` | 0.0010484 | 0.0001085 | 9.662 | < 2e-16 *** |
| HN | 0.0024452 | 0.0004633 | 5.278 | 2.35e-07 *** |
| --- Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | |
| rsq (R ²) = 0.37 | | | | |

Ecuación 1

$$\frac{1}{f(x)} = 0.1201 + 0.00003658 * dr * r_{50} * HN$$

| Coefficients: | | | | |
|--|-----------|------------|---------|------------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| (Intercept) | 1.201e-01 | 6.044e-03 | 19.86 | <2e-16 *** |
| `dr*r*HN` | 3.658e-05 | 3.117e-06 | 11.73 | <2e-16 *** |
| --- Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | |
| rsq (R ²) = 0.40 | | | | |

Ecuación 2

$$\frac{1}{f(x)} = 0.1321 + 0.00003696 * dr * r_{50} * HN - 0.000517 wPI$$

| Coefficients: | | | | |
|--|------------|------------|---------|------------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| (Intercept) | 1.321e-01 | 8.879e-03 | 14.872 | <2e-16 *** |
| `dr*r*HN` | 3.696e-05 | 3.371e-06 | 10.963 | <2e-16 *** |
| wPI | -5.170e-04 | 4.157e-04 | -1.244 | 0.215 |
| --- Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | |
| rsq (R ²) = 0.40 | | | | |

Ecuación 3

Como se puede apreciar, los tres parámetros son significativos dentro de los modelos ya que su p-value es menor a 0.05.

La diferencia entre los R² entre los dos modelos es casi que despreciable, por tanto, su definición será determinada a partir del siguiente análisis de verificación de los modelos planteados.

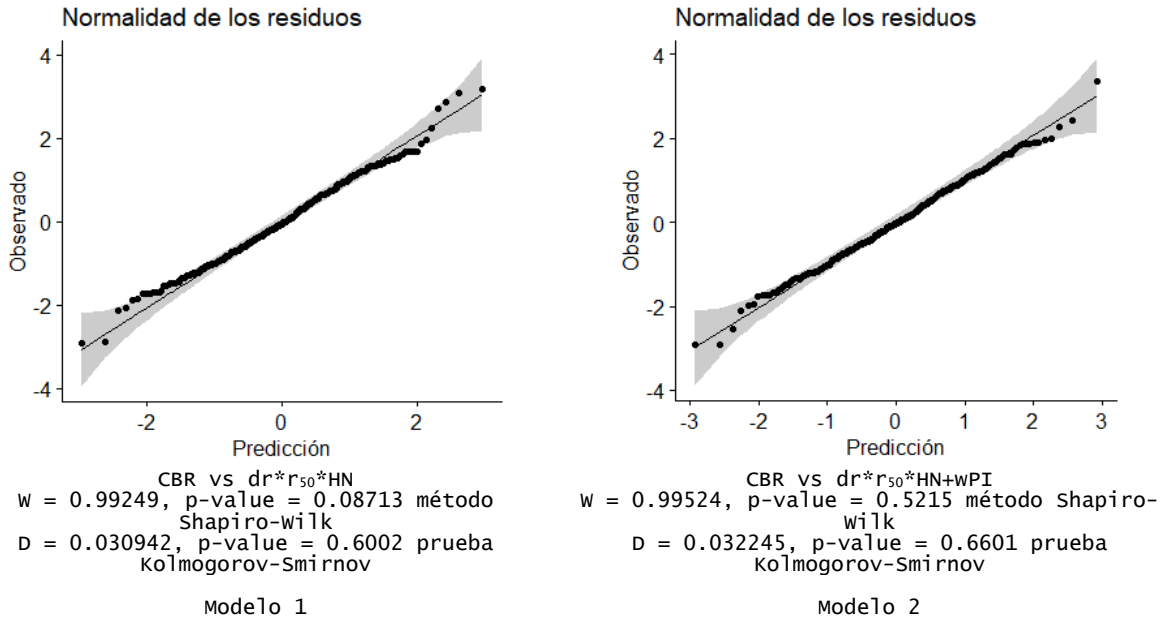


Figura 1 Gráfica de normalidad de residuos, suelos finos, CBR Wn

- Según la prueba de Shapiro y la prueba de Kolmogorov-Smirnov en los dos modelos, el valor de probabilidad p-value es mayor a 0.05, por lo que se puede indicar que los datos siguen una distribución normal, tal como se muestra en la figura de normalidad de residuos.

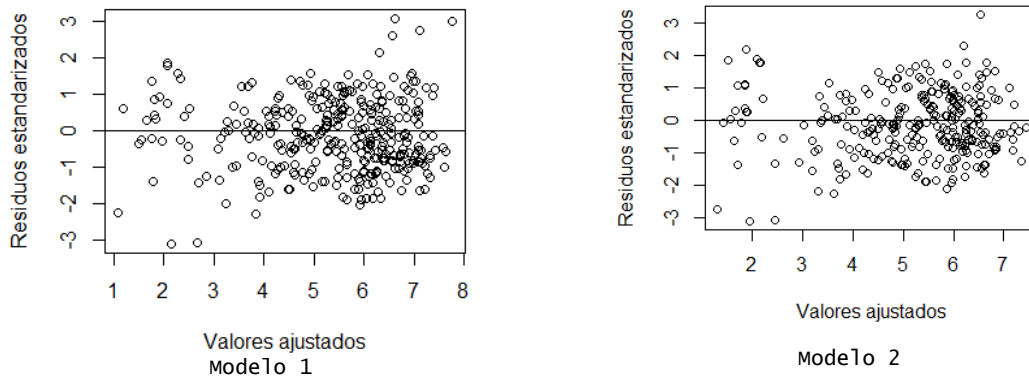


Figura 2 Gráficas análisis de residuos estandarizados vs valores ajustados, suelos finos CBR Wn

- Por otro lado, la Figura 3, presenta las gráficas de residuos estandarizados vs los valores ajustados, de los modelos CBR Wn vs $dr \cdot r_{50} \cdot HN$ y CBR Wn vs $dr \cdot r_{50} \cdot HN + wPI$ para suelos finos, aquí se presenta la dispersión de los residuos y que la variabilidad se mantenga constante a lo largo de todo el dominio, basados en los resultados no se ve síntomas de deficiencia en los modelos, esto descarta el incumplimiento del modelo por heterocedasticidad.

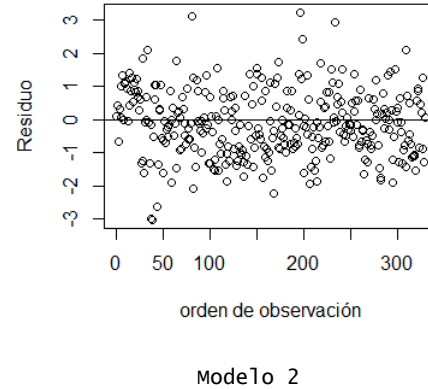
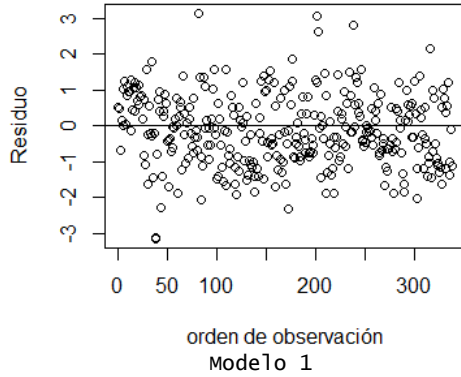


Figura 3 Graficas análisis de residuos vs orden de observación, suelos finos CBR Wn

- También se presenta las gráficas de residuos vs orden de observaciones, se aprecia que los errores no presentan un patrón, están distribuidos de manera aleatoria lo que implica que son independiente.

Tabla 1. Test Durbin – Watson, suelos finos CBR Wn

| lag | Autocorrelation | D-w | Statistic | p-value |
|----------------------------------|-----------------|----------|-----------|---------|
| 1 | 0.2658548 | 1.463901 | | 0.946 |
| Alternative hypothesis: rho != 0 | | | | |
| Modelo 1 | | | | |
| lag | Autocorrelation | D-w | Statistic | p-value |
| 1 | 0.1971276 | 1.603989 | | 0.962 |
| Alternative hypothesis: rho != 0 | | | | |
| Modelo 2 | | | | |

- Mediante la prueba de Durbin-Watson, queremos detectar si los residuos de la regresión estimada están auto correlacionados o no. Puesto que el valor p-value es mayor que el nivel de significación (5%), la hipótesis nula no puede ser rechazada, por tanto, se considera que los datos de la muestra son independientes.

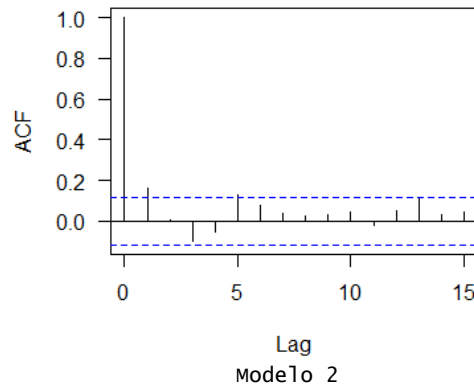
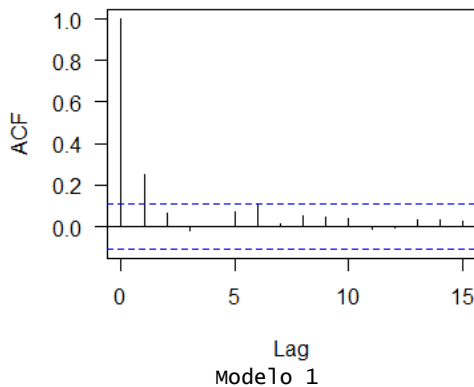


Figura 4 Graficas de autocorrelación, suelos finos CBR Wn

- Basados en la Figura 4, los correlogramas para ambos modelos, se omite la primera barra ya que corresponde a la autocorrelación con la misma observación, retraso/lag =0. La mayoría de las líneas a excepción de la segunda, se encuentra entre el intervalo de confianza (95%, líneas azules), indicando una autocorrelación cero, sin embargo, como se presenta una línea fuera del intervalo se indicaría que los residuos no presentan una independencia, que por el análisis de la prueba de

Durbin-Watson, analizada anteriormente, si se cumple el supuesto de que los residuos son independientes (no se rechaza la hipótesis nula).

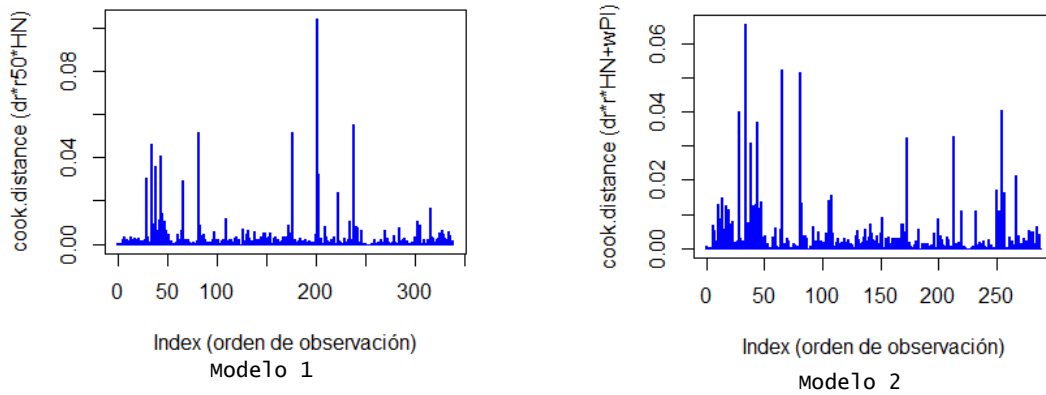


Figura 5 Graficas distancia de Cook, suelos finos CBR Wn

- Como se puede observar en la Figura 5, ninguna de las líneas de distancia Cook superar el umbral de 1.0, llegando a un rango máximo de 0.10, lo que nos indica que no se cuenta con muchos valores atípicos que afectan el modelo de regresión con respecto a las observaciones, lo que nos indica que el modelo predice de forma adecuada la variable CBR con resaca al CBR observado para las dos ecuaciones planteadas.

1.2 Modelos de regresión para suelos arenosos

1.2.1 Correlación CBR inalterado, muestra inalterada humedad natural

Para el caso de los suelos arenosos, se tiene el análisis para el CBR inalterado en condición de humedad natural y CBR compactado en laboratorio. Utilizando los parámetros deflexión (dr), localización del sensor (r_{50}) y humedad natural (HN), se presenta a continuación los modelos planteados:

$$\frac{1}{f(x)} = 0.083774 + 0.020200 * dr * HN$$

| Coefficients: | | | | |
|---------------|----------|------------|---------|-------------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| (Intercept) | 0.083774 | 0.014307 | 5.855 | 1.2e-06 *** |
| `dr*HN` | 0.020200 | 0.006821 | 2.961 | 0.00547 ** |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

$$rsq (R^2) = 0.27$$

Ecuación 4

$$\frac{1}{f(x)} = 0.08578 + 0.00002904 * dr * r_{50} * HN$$

| Coefficients: | | | | |
|---|-----------|------------|---------|-------------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| (Intercept) | 8.578e-02 | 1.403e-02 | 6.112 | 5.5e-07 *** |
| `dr*r*HN` | 2.901e-05 | 9.982e-06 | 2.907 | 0.0063 ** |
| --- | | | | |
| Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | |

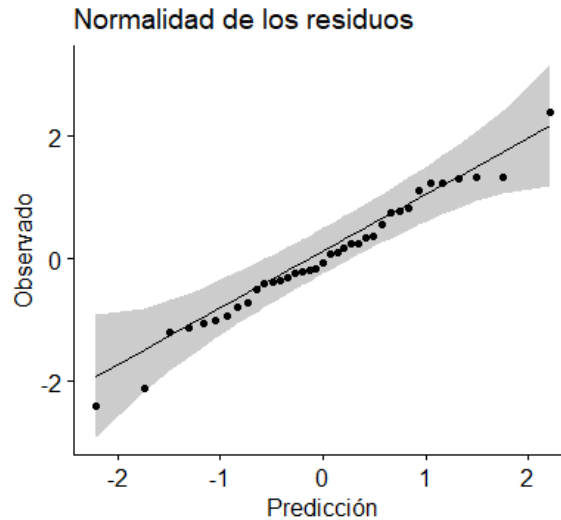
rsq (R²) = 0.28

Ecuación 5

Para los dos modelos las variables dr, r₅₀ y HN son significativas ya que su p-value es menor de 0.05, según la hipótesis nula planteada, aunque su valor tiene una significancia baja. También se puede observar valores de R² pobre, de 0.27 y 0.28 respectivamente.

La diferencia entre los R² entre los dos modelos es de 0.01, por tanto, su definición será determinada a partir del siguiente análisis de verificación de los modelos planteados, analizado solo para el modelo 2 que vincula la variable dr*r₅₀*HN.

A continuación, se ilustra la gráfica de normalidad de los residuos y los resultados del test de Shapiro Wilk y Kolmogorov-Smirnov. En el modelo, el valor de probabilidad p-value es mayor a 0.05, indicando que los datos siguen una distribución normal.



CBR Wn vs dr*r*HN
W = 0.99249, p-value = 0.0873 prueba Shapiro-wilk
D = 0.030942, p-value = 0.6002 prueba Kolmogorov-Smirnov

Figura 6 Gráfica de normalidad de residuos, suelos arenosos, CBR Wn

La Figura 7 presenta las gráfica de residuos estandarizados vs los valores ajustados, del modelo CBR Wn vs dr*r₅₀*HN para suelos arenosos, y esta se puede encerrar en una banda horizontal, por tanto, no se ve síntomas de deficiencia en el modelo, esto descarta el incumplimiento del modelo por heterocedasticidad, sin embargo, los datos se concentran más hacia el lado derecho.

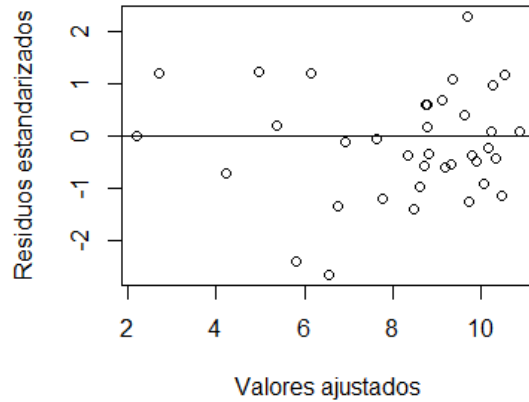


Figura 7 Graficas análisis de residuos estandarizados vs valores ajustados, suelos arenosos CBR Wn

Basados en la gráfica de residuos o errores vs orden de observación, se observa que los errores presentan cierto patrón, sin tener un componente aleatorio, lo que implica que pueden ser dependientes (correlacionados).

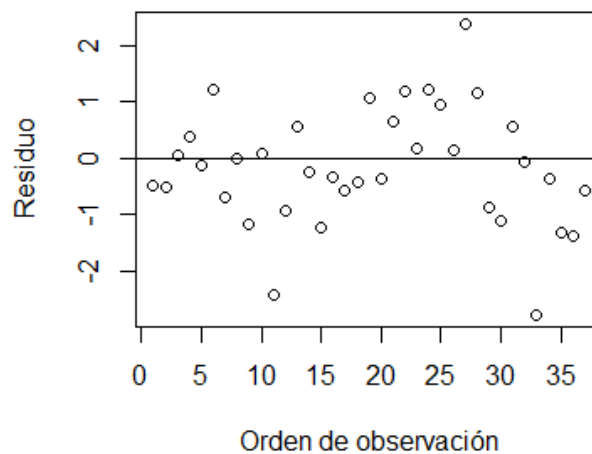


Figura 8 Graficas análisis de residuos vs orden de observación, suelos arenosos CBR Wn

Mediante la prueba de Durbin-Watson, el valor p-value es menor que el nivel de significación (5%), la hipótesis nula es rechazada, se considera que los datos de la muestra están correlacionados o presentan una dependencia.

Tabla 2. Test Durbin – Watson, suelos arenosos CBR Wn

| lag | Autocorrelation | D-w | Statistic | p-value |
|-----|-----------------|----------|-----------|---------|
| 1 | 0.2581264 | 1.467951 | 0.014 | |

Alternative hypothesis: rho != 0

Según el análisis de autocorrelación, todas las líneas se encuentra entre el intervalo de confianza (95%, líneas azules), indicando una autocorrelación cero, sin embargo, según la prueba de Durbin-Watson, los residuos presentan una dependencia.

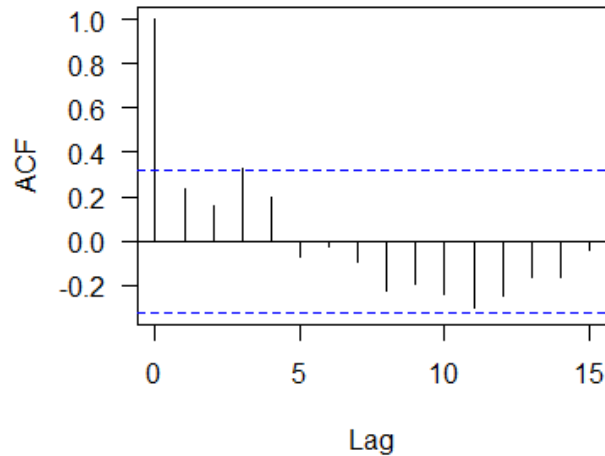


Figura 9 Graficas de autocorrelación, suelos arenosos CBR Wn

Como se puede observar en la Figura 10 ninguna de las líneas de distancia Cook superar el umbral de 1.0, llegando a un rango máximo de 0.25 aproximadamente, lo que nos indica que no se cuenta con muchos valores atípicos que afectan el modelo de regresión con respecto a las observaciones. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, los residuos no presentan una independencia, lo que indicaría que la aproximación de los valores predichos no es válida, ya que se incumple la condición de independencia

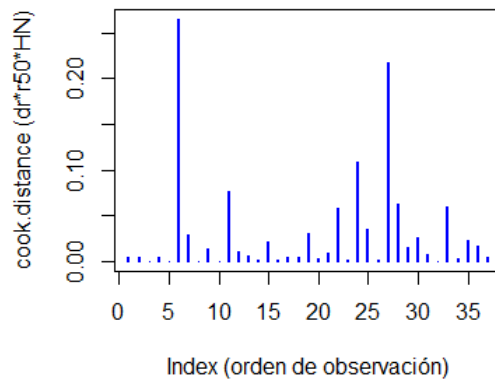


Figura 10 Graficas distancia de Cook, suelos arenosos CBR Wn

1.2.2 Correlación CBR compactado en laboratorio, en inmersión

En cuanto al análisis para el CBR de muestras compactadas en laboratorio, en suelos arenosos, este se relacionara con los parámetros de porcentaje de finos, deflexión (dr), localización del sensor (r_{50}) y humedad natural (HN) para crear el modelo de regresión lineal generalizado, al igual que para los demás análisis, se emplea una función de enlace Inversa y con el modelo perteneciente a una familia de distribución Gamma, se obtiene los siguientes resultados:

Empleando los Betas del modelo, se tiene las siguientes ecuaciones:

$$\frac{1}{f(x)} = 0.0243623 + 0.0007642 * dr * r_{50} * \% finos$$

| Coefficients: | | | | |
|---|-----------|------------|---------|--------------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| (Intercept) | 0.0243623 | 0.0036065 | 6.755 | 3.66e-08 *** |
| `dr*r*%finos` | 0.0007642 | 0.0002305 | 3.315 | 0.00193 ** |
| --- | | | | |
| Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | |

rsq (R²) = 0.26

Ecuación 6

$$\frac{1}{f(x)} = 0.01741 + 0.0003541 * dr * r_{50}$$

| Coefficients: | | | | |
|---|-----------|------------|---------|--------------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| (Intercept) | 1.741e-02 | 4.755e-03 | 3.662 | 0.000708 *** |
| `dr*r` | 3.541e-04 | 9.619e-05 | 3.682 | 0.000670 *** |
| --- | | | | |
| Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | |

rsq (R²) = 0.35

Ecuación 7

$$\frac{1}{f(x)} = 0.02311 + 0.0000266 * dr * r_{50} * HN$$

| Coefficients: | | | | |
|---|-----------|------------|---------|--------------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| (Intercept) | 2.311e-02 | 3.197e-03 | 7.230 | 7.83e-09 *** |
| `dr*r*HN` | 2.660e-05 | 6.427e-06 | 4.139 | 0.000169 *** |
| --- | | | | |
| Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | |

rsq (R²) = 0.38

Ecuación 8

$$\frac{1}{f(x)} = 0.05552 - 0.00008718 * MR$$

| Coefficients: | | | | |
|---|------------|------------|---------|--------------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| (Intercept) | 5.552e-02 | 6.489e-03 | 8.556 | 1.16e-10 *** |
| MR | -8.718e-05 | 2.006e-05 | -4.346 | 8.92e-05 *** |
| --- | | | | |
| Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | |

rsq (R²) = 0.28

Ecuación 9

Para los cuatro modelos planteados el parámetro p-value es menor a 0.05, por lo que las variables empleadas son significativas dentro del modelo. Por otro lado, su coeficiente de determinación, R² son de 0.26, 0.35, 0.38 y 0.28 respectivamente, presentando todos los modelos una correlación pobre.

La diferencia entre los R² entre los modelos 2 y 3, es despreciable, por lo que su definición será determinada a partir del siguiente análisis de verificación del modelo que vincula las variables dr*r₅₀ y dr*r₅₀*HN.

Seguidamente, se ilustra la gráfica de normalidad de los residuos y los resultados del test de Shapiro Wilk y Kolmogorov-Smirnov. En el modelo, el valor de probabilidad p-value es mayor a 0.05, indicando una distribución normal de los datos, con una mejor distribución para el modelo 2.

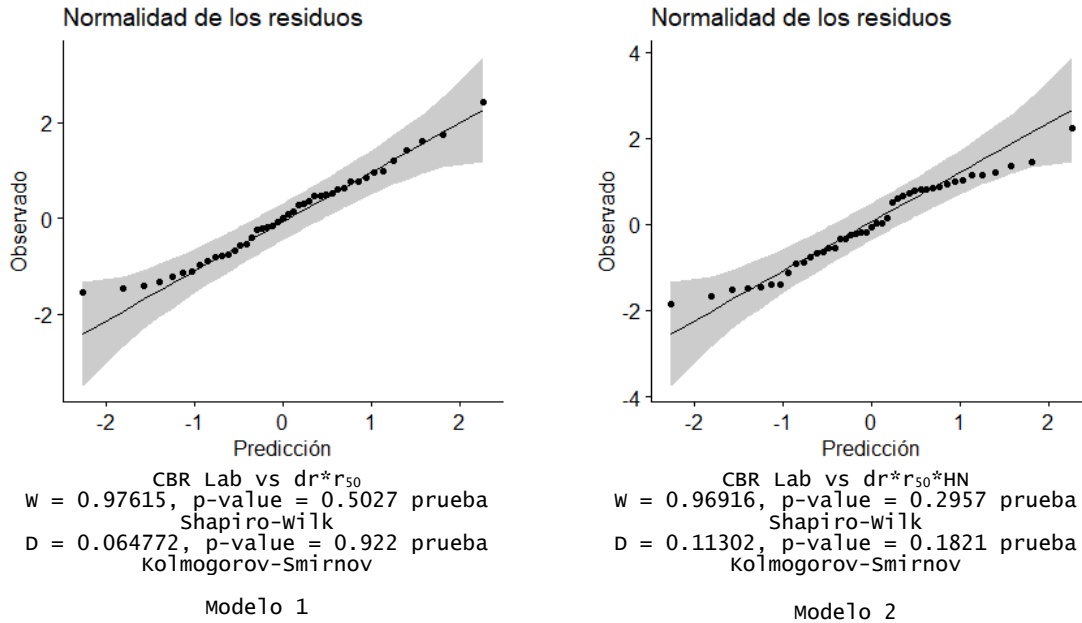


Figura 11 Gráfica de normalidad de residuos, suelos arenosos, CBR Lab.

Según la gráfica de residuos estandarizados vs los valores ajustados, de los modelos planteados para el CBR Lab para suelos arenosos, y estos se puede encerrar en una banda horizontal, lo que nos indica que no se ve síntomas de deficiencia en el modelo, por el incumplimiento del modelo por heterocedasticidad.

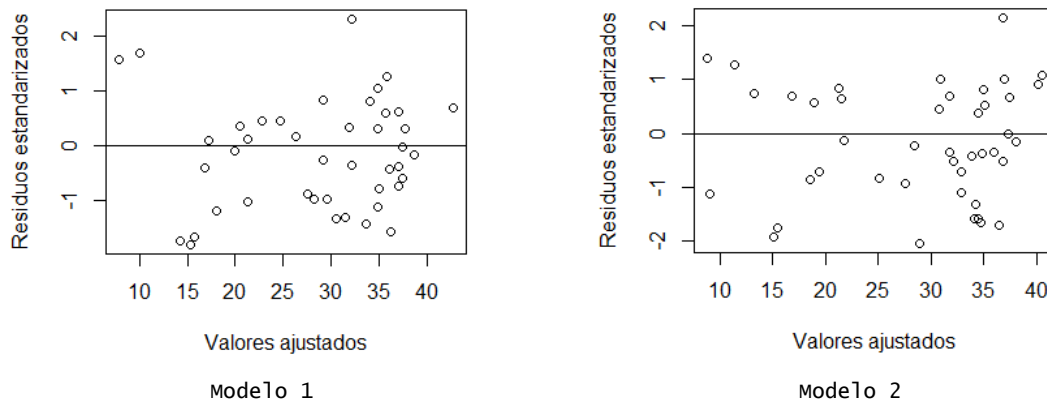


Figura 12 Graficas análisis de residuos estandarizados vs valores ajustados, suelos arenosos CBR Lab

En cuanto a la gráfica de residuos o errores vs orden de observación, se observa que los errores no presentan un patrón, están distribuidos de manera aleatoria lo que implica que son independientes (no correlacionados).

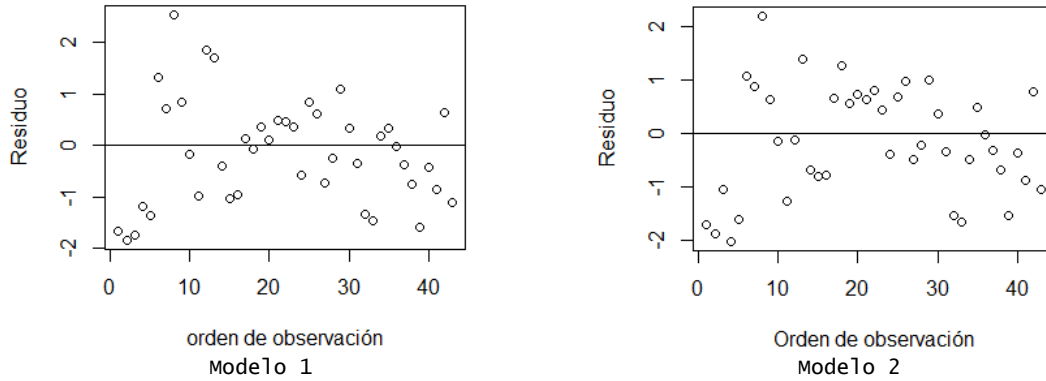


Figura 13 Graficas análisis de residuos vs orden de observación, suelos arenosos CBR Lab

Basados en la prueba de Durbin-Watson, para los dos modelos, el valor de p-value es menor que el nivel de significancia (5%), por tanto, se considera que los datos de la muestra están correlacionados o presentan una dependencia.

Tabla 3. Test Durbin – Watson, suelos arenosos CBR Lab

| lag | Autocorrelation | D-w | Statistic | p-value | lag | Autocorrelation | D-w | Statistic | p-value |
|----------------------------------|-----------------|----------|-----------|---------|----------------------------------|-----------------|----------|-----------|---------|
| 1 | 0.407225 | 1.092923 | | 0 | 1 | 0.4518439 | 1.006054 | | 0 |
| Alternative hypothesis: rho != 0 | | | | | Alternative hypothesis: rho != 0 | | | | |
| Modelo 1 | | | | | Modelo 2 | | | | |

Adicionalmente, se analiza autocorrelación, a partir del correlograma, los cuales contienen bandas con un intervalo de confianza del 95%, que son representación gráfica de las auto correlaciones de una muestra consigo mismo. Lo que nos indicaría que la aproximación de los valores predichos no es válida, ya que se incumple la condición de independencia.

1.3 Modelos de regresión para suelos tipo grava, CBR compactado en laboratorio en inmersión

Por último, para los suelos tipo grava, se quiere correlacionar el CBR compactado en laboratorio con las variables d_r , r_{50} y % de finos:

Empleando los Betas del modelo, se tiene la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{f(x)} = 0.0173971 + 0.0007776 * d_r * r_{50} * \% \text{ finos}$$

| Coefficients: | | | | |
|---|-----------|------------|---------|--------------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| (Intercept) | 0.0173971 | 0.0014166 | 12.281 | < 2e-16 *** |
| `dr*r*%finos` | 0.0007776 | 0.0001827 | 4.255 | 5.57e-05 *** |
| --- | | | | |
| Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | |

rsq (R²) = 0.23

Ecuación 10

$$\frac{1}{f(x)} = 0.01070 + 0.000127 * d_r * r_{50} + 0.04435 \% \text{ finos}$$

| Coefficients: | | | | |
|---|-----------|------------|---------|--------------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| (Intercept) | 1.070e-02 | 2.508e-03 | 4.266 | 5.41e-05 *** |
| `dr*r` | 1.270e-04 | 4.343e-05 | 2.925 | 0.00448 ** |
| finos | 4.435e-02 | 1.495e-02 | 2.967 | 0.00396 ** |
| --- | | | | |
| signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | |

rsq (R²) = 0.25
Ecuación 11

Como se puede apreciar, los tres parámetros son significativos dentro del modelo ya que su p-value es menor a 0.05. Por otro lado, su coeficiente de determinación, R² son de 0.23 y 0.25 respectivamente, presentando una correlación pobre.

La definición del modelo será definida a partir del siguiente análisis de verificación estadístico.

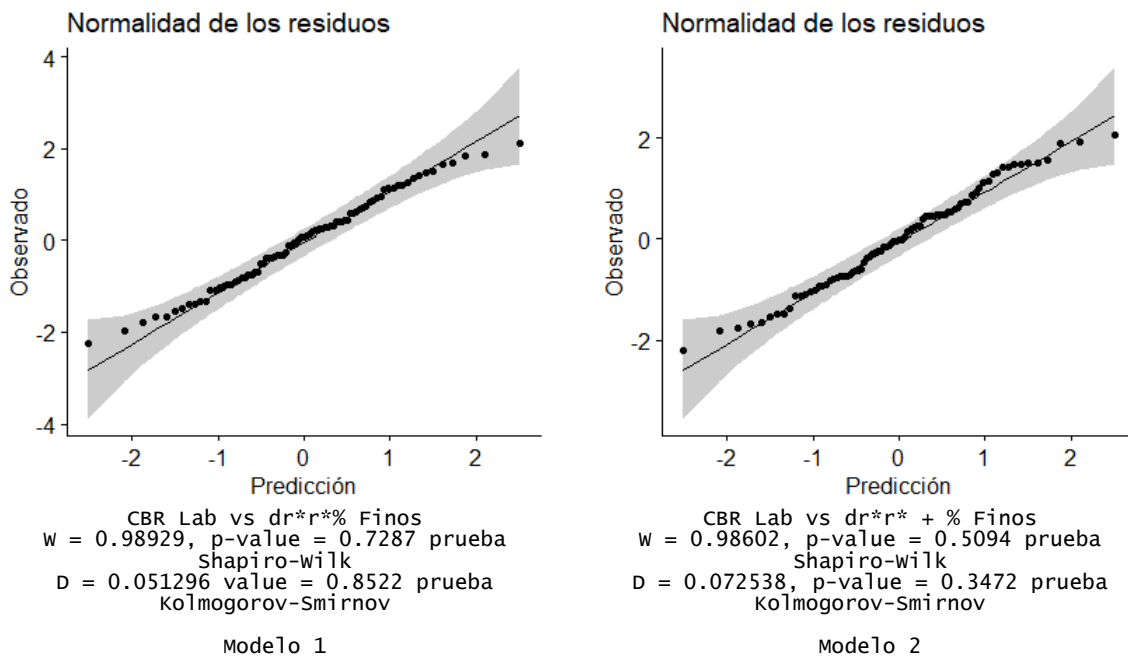


Figura 14 Gráfica de normalidad de residuos, suelos tipo grava, CBR Lab.

- La normalidad de los residuos y los resultados del test de Shapiro Wilk y Kolmogorov-Smirnov, indican que los datos siguen una distribución normal.

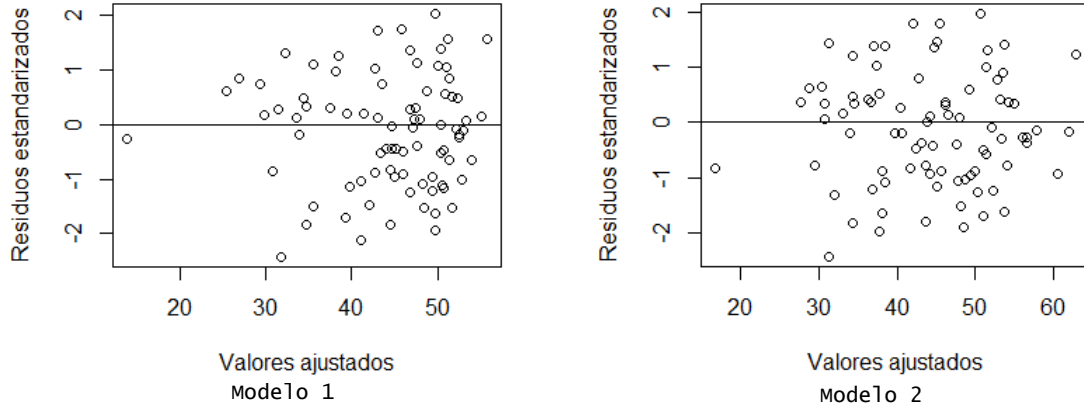


Figura 15 Graficas análisis de residuos estandarizados vs valores ajustados, suelos tipo grava CBR Lab

- La Figura 15 presenta las gráfica de residuos estandarizados vs los valores ajustados, de los modelos analizados para suelos tipo grava, y estos se pueden encerrar en una banda horizontal, lo que nos indica que no se ve síntomas de deficiencia en el modelo, por el incumplimiento del modelo por heterocedasticidad, como mejor distribución en el modelo 2.

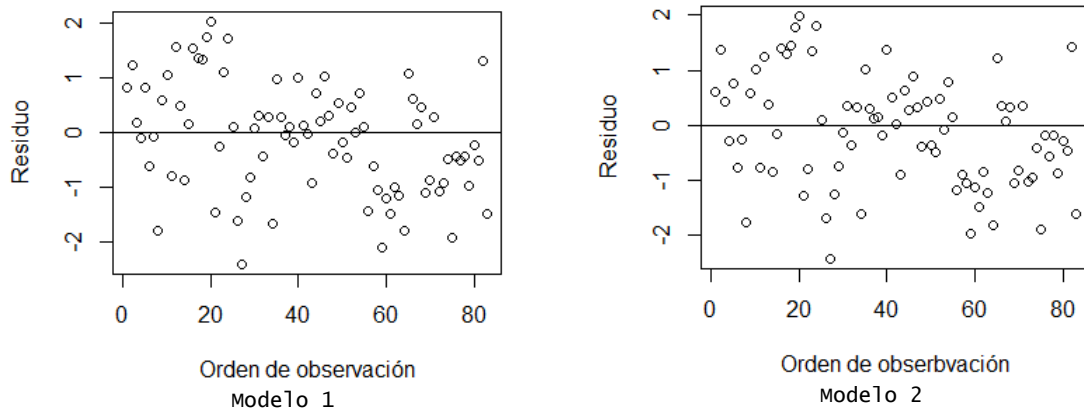


Figura 16 Graficas análisis de residuos vs orden de observación, suelos tipo grava CBR Lab

- Con base en la gráfica de residuos o errores vs orden de observación, se observa que los errores no presentan un patrón, están distribuidos de manera aleatoria lo que implica que son independientes (no correlacionados).

Basados en la prueba de Durbin-Watson, para los dos modelos planteados los valores de p-value son menores que el nivel de significancia (5%), por tanto, se considera que los datos de la muestra están correlacionados o presentan una dependencia, evaluado por el test de Durbin-Watson.

Tabla 4. Test Durbin – Watson, suelos tipo grava CBR Lab

| lag | Autocorrelation | D-w | Statistic | p-value |
|----------------------------------|-----------------|----------|-----------|---------|
| 1 | 0.3076478 | 1.350334 | 0 | 0 |
| Alternative hypothesis: rho != 0 | | | | |
| lag | Autocorrelation | D-w | Statistic | p-value |
| 1 | 0.3071575 | 1.350225 | 0 | 0 |
| Alternative hypothesis: rho != 0 | | | | |