



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

ECUACIONES DE CORRELACIÓN DEL CBR CON PROPIEDADES ÍNDICE DE SUELOS PARA LA CIUDAD DE PIURA

William Araujo-Navarro

Piura, octubre de 2014

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Civil

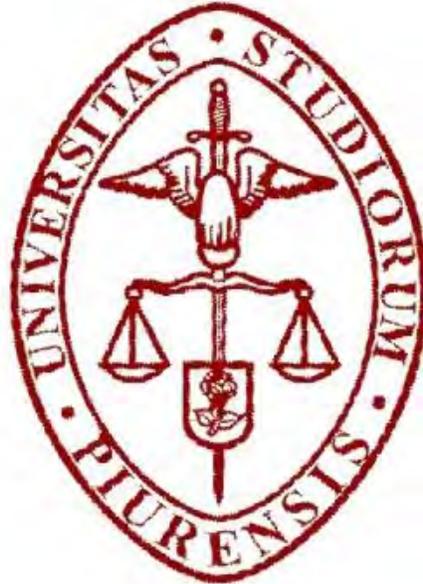
Araujo, W. (2014). *Ecuaciones de correlación de CBR con propiedades índice de suelos para la ciudad de Piura*. Tesis de pregrado no publicado en Ingeniería Civil. Universidad de Piura. Facultad Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una [licencia](#)
[Creative Commons Atribución-](#)
[NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](#)

Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura

UNIVERSIDAD DE PIURA
FACULTAD DE INGENIERÍA



Ecuaciones de correlación del CBR con propiedades índice de suelos para la ciudad de Piura

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Civil

William Segundo Araujo Navarro

Asesora: Mg. Ing. Gaby Patricia Ruiz Petrozzi

Piura, Octubre 2014

PRÓLOGO

Dado que todo pavimento requiere para su diseño y evaluación, de un parámetro conocido como el California Bearing Ratio (CBR) es útil encontrar mejores modos y técnicas para medirlo. Hasta el momento el principal obstáculo para la obtención de su valor es el tiempo y costo que representa.

Uno de los motivos que llevó a seleccionar este tema de tesis, fue el de buscar otra manera de obtener el valor del CBR reduciendo tiempo y costos. Una de ellas es a través de correlaciones con otros parámetros del suelo; cuyo tiempo de obtención y costo sean menores en comparación al CBR. Aunque estas correlaciones son muy útiles en algunos casos; nunca reemplazará al CBR experimental. No obstante su aplicación queda abierta a ser utilizada en fases conceptuales de proyectos y en aplicaciones menores como bacheos.

Para concluir quisiera hacer mi agradecimiento especial a la Ing. Gaby Ruiz Petrozzi, por su calidad de asesora en mi tesis; a la Ing. Blanca Jiménez Crisanto por permitirnos el acceso a la base de datos del Laboratorio de Ensayo de Materiales de Construcción de la Universidad de Piura y a los alumnos de pregrado, mis amigos Rafael Morante Moscol y Diana Moreno Córdova quienes me ayudaron en el ordenamiento de los datos.

ÍNDICE

Introducción.....	1
Capítulo 1: Marco teórico.	
1.1 California Bearing Ratio.....	5
1.2 Propiedades índice de los suelos y su correlación con el CBR.....	9
1.2.1 Distribución del tamaño de partículas.....	9
1.2.2 Límites de consistencia.....	10
1.2.2.1. Límite líquido.....	10
1.2.2.2. Límite plástico.....	11
1.2.2.3. Índice de plasticidad.....	12
1.3 Propiedades de compactación y su correlación con el CBR.....	12
1.3.1 Contenido óptimo de humedad (OMC)	13
1.3.2 Máxima densidad seca (MDD)	13
1.4 Correlaciones de otros autores.....	15
Capítulo 2: Correlación del CBR con cada parámetro del suelo	
2.1 Naturaleza de los datos.....	19
2.2 Selección de los datos.....	19
2.3 Correlaciones de los parámetros con el CBR.....	20
2.3.1 Relación entre el CBR y el contenido de grava (%G).....	20
2.3.2 Relación entre el CBR y el contenido de arena (%S).....	21
2.3.3 Relación entre el CBR y el contenido de finos (%F).....	22
2.3.4 Relación entre el CBR y el límite líquido (LL).....	23
2.3.5 Relación entre el CBR y el límite plástico (LP).....	25
2.3.6 Relación entre el CBR y el índice de plasticidad (IP).....	25

2.3.7 Relación entre el CBR y la máxima densidad seca MDD).....	27
2.3.8 Relación entre el CBR y el contenido máximo de humedad (OMC).....	28
2.4 Consideraciones finales.....	28
Capítulo 3:	
Análisis de regresión y discusión de resultados	
3.1 Parámetros estadísticos para la correlación.....	30
3.2 Análisis de Regresión Lineal Simple.....	31
3.2.1. Análisis de regresión entre %G y CBR.....	32
3.2.2. Análisis de regresión entre %S y CBR.....	33
3.2.3. Análisis de regresión entre %F y CBR.....	34
3.2.4. Análisis de regresión entre LL y CBR.....	35
3.2.5. Análisis de regresión entre LP y CBR.....	36
3.2.6. Análisis de regresión entre IP y CBR.....	37
3.2.7. Análisis de regresión entre MDD y CBR.....	38
3.2.8. Análisis de regresión entre OMC y CBR.....	39
3.3 Análisis de Regresión Lineal Múltiple.....	42
3.4 Validación de los modelos propuestos.....	47
3.5 Análisis de los modelos de correlación existentes.....	47
Conclusiones y recomendaciones.	51
Bibliografía.	53
Apéndices	
Apéndice A: Base de datos empleada en la investigación.....	57
Apéndice B: Error medido del modelo 1 del ARLS.....	59
Apéndice C: Error medido del modelo 2 del ARLS.....	60
Apéndice D: Error medido del modelo 3 del ARLS.....	61
Apéndice E: Error medido del modelo 4 del ARLS.....	62
Apéndice F: Error medido del modelo 5 del ARLS.....	63

Apéndice G: Error medido del modelo 6 del ARLS.....	64
Apéndice H: Error medido del modelo 7 del ARLS.....	65
Apéndice I: Error medido del modelo 8 del ARLS.....	66
Apéndice J: Error medido del CBR de laboratorio y CBR predicho de las ecuaciones de los autores.....	67
Apéndice K: CBR predichos del ARLS	68

RESUMEN

El propósito de esta tesis es proponer un método alternativo para la obtención del valor del CBR de diseño mediante correlaciones con propiedades índice y de compactación de los suelos.

Se correlacionaron datos del CBR de laboratorio en condición remoldeada y saturada con nueve parámetros del suelo: Contenido de grava, de arena, de limo, de arcilla, límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, máxima densidad seca y contenido óptimo de humedad, usando datos históricos de un laboratorio local en Piura acumulados entre los años 2004 y 2014. Se aplicó tanto la correlación lineal simple como la múltiple.

Los resultados muestran que el contenido de grava y el contenido óptimo de humedad presentan una buena correlación lineal simple con el CBR ($R= 0.84$ y 0.81 respectivamente). Así mismo, la máxima densidad seca y el contenido de grava son directamente proporcionales al CBR, mientras que el contenido de arena, de arcillas y limos, los límites de consistencia y el contenido máximo de humedad lo son de modo inverso.

Finalmente se demuestra que la correlación múltiple tiene mayor correlación que la simple por lo que ningún parámetro analizado individualmente es determinante para hallar el CBR.

Introducción

En el diseño de un pavimento flexible o rígido, ya sea mediante el método de la American Association of State Highway and Transportation Official (AASHTO), el método racional o el del Portland Cement Association (PCA), un valor indispensable es el del California Bearing Ratio (CBR). El valor del CBR es un indicador del esfuerzo cortante o de punzonamiento en subrasantes, subbases y bases. El ensayo del CBR fue introducido por el Departamento de Carreteras de California durante la Segunda Guerra Mundial (1930) y posteriormente fue adoptado en varias partes del mundo como un método estándar. En Perú, los métodos de diseño de pavimentos comúnmente usados son los de AASHTO 93 y PCA, para los cuales se requiere del valor del CBR.

Este ensayo puede ser evaluado tanto en laboratorio como en campo, siendo en ambos casos de un alto costo y tiempo. Para caracterizar el material de base se usa el CBR de laboratorio (CBR lab), con muestras recopiladas en campo, remoldeadas y sometidas a condiciones saturadas por 4 días (ASTM, 2007), lo que supone aproximadamente una semana de duración para la obtención del resultado. Según el Manual de diseño de carreteras pavimentadas de bajo volumen de tránsito (2008) para obtener el valor del CBR en subrasantes y poder caracterizar un suelo se necesitan como mínimo 6 valores de CBR y éstos se deben tomar cada 2 Km de espaciamiento como máximo. Sin embargo la cantidad de muestras se ve influenciada por la variabilidad del terreno, longitud, importancia del proyecto, recursos técnicos y económicos disponibles. Además el valor de un CBR equivale al promedio de tres especímenes ensayados (NTP 339.145 – 1999), lo cual en Piura tiene un costo entre 120 a 250 soles (UNP, SENCICO, UDEP). Por encima del costo que todo esto representa, el número de muestras siempre es limitado y el valor del CBR puede ser poco significativo. Obtener el CBR por tramos en una carretera resulta siempre complicado porque cualquier retraso en la construcción representa un incremento en el costo del proyecto y para la ingeniería de transportes esto siempre ha significado un problema.

Para subsanar esta debilidad se han hecho varios intentos por correlacionar el CBR con propiedades índices del suelo (AASHTO, 2002; Chattopadhyay y Data, 2011, Kumar, 2014; Patel y Desai, 2010; Ramasubbaro y Siva, 2013; Saklecha et al., 2011; Yildirim y Gunaydin, 2011). Las propiedades índice evaluadas en estas investigaciones han sido el porcentaje de grava (%G), porcentaje de arena (%S), porcentaje de finos: limos y arcillas (%F), límite líquido (LL), límite plástico (LP), índice de plasticidad (IP), máxima densidad seca (MDD) y contenido máximo de humedad (OMC). Estos son fácilmente determinables en comparación con el CBR (por tiempo y costo).

De este modo, es posible predecir un valor del CBR mediante una ecuación en función de esos parámetros para usarlo como un método alternativo más económico y más rápido que el método convencional; especialmente en las fases conceptuales de un proyecto (anteproyecto, perfil, prefactibilidad, etc.) en la que muchas veces no se cuenta con los medios económicos suficientes (Yildirim y Gunaydin, 2011). Estas ecuaciones servirían de orientación para obtener el CBR y armar un primer presupuesto, dejando claro que no reemplazarán al CBR experimental y será para ciertas aplicaciones como la anteriormente mencionada.

Por otro lado, estas investigaciones trabajan con menos de 30 muestras, con suelos finos (Limos de baja plasticidad (ML), arcillas de baja y alta plasticidad (CL y CH)) y ubicados en principalmente en la India, a excepción de Yildirim y Gunaydin (2011) quienes trabajan con una data de 124 suelos de Turquía, de los cuales sólo 5 corresponden a suelos de grano grueso como gravas y arenas arcillosas. El presente trabajo explora la relación de estas propiedades índice en suelos que van desde 2004 hasta 2014 aprovechando un total de 75 muestras procedentes de un país de Latinoamérica.

Capítulo 1 Marco teórico

1.1 California Bearing Ratio (CBR)

El CBR es un método utilizado para evaluar la calidad relativa del suelo para sub-rasante, sub-base y base de pavimentos. Este método fue propuesto en 1929 por los ingenieros Stanton y Porter del Departamento de Carreteras de California, de ahí su nombre California Bearing Ratio que en español significa Relación de Soporte California. En algunos países también se le conoce como Valor Relativo Soporte (VRS). Desde esa fecha tanto en Europa como en América, el método CBR se ha generalizado y es una forma de clasificación de un suelo para ser utilizado como sub-rasante o material de base en la construcción de carreteras. Durante la Segunda Guerra Mundial, el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos adoptó este ensayo para utilizarlo en la construcción de aeropuertos. El CBR fue concebido en 1933 para diseñar pavimentos flexibles basados en la resistencia al corte. En 1964, aparece la versión para laboratorio en la norma ASTM D 1883 (Ver figura 1) y para campo en la norma ASTM D 4429 (Ver figura 2) dadas por la American Society for Testing and Materials (Sánchez, 2012).



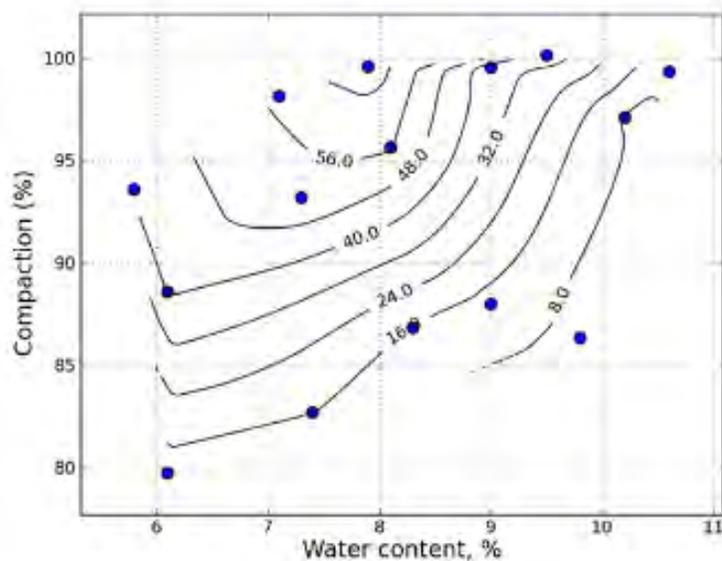
Figura 1. Ensayo del CBR en laboratorio
Fuente: Soils and Land Survey Lab. Bin, N (2000)



Figura 2. Ensayo del CBR en campo
Fuente: CBR Test. Southern Testing (2014)

En este método, al aplicarse una carga a través de una superficie de contacto se desarrollan dos resistencias: una referida al corte perimetral y otra de compresión. El CBR no es una constante del suelo, sino un indicador de la resistencia al corte del suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas, obtenidas del ensayo de compactación del Proctor Modificado.

Este método puede realizarse tanto en campo como en laboratorio. Para evaluar el desempeño de campo a través de ensayos de laboratorio, se utilizan gráficos de contorno de humedad versus densidad. A estos se les llaman “mapas de resistencia” como se aprecia en la Figura 3 y dentro de éstos, se ubican las regiones de humedad y densidad que cumplen con el nivel de respuesta requerido, a las que se llama “regiones de aceptación” (Sánchez, 2012). Los ensayos de CBR en laboratorio se hacen sobre muestras remoldeadas y compactadas con un contenido de humedad óptimo y una máxima densidad seca (Proctor Modificado) que se comentan más adelante.



Mapa de resistencia

Figura 3. Mapa de resistencia de CBR

Fuente: ¿Qué es el CBR en un suelo? Sánchez, F. (2012)

Antes de determinar la resistencia a la penetración, las probetas se saturan durante 96 horas para simular las condiciones de trabajo más desfavorables y para determinar su posible expansión. Se confeccionan 3 probetas como mínimo, las que poseen distintas energías de compactación (lo usual es con 56, 25 y 10 golpes).

El método CBR en laboratorio requiere de 3 ensayos: determinación de la densidad y humedad, determinación de las propiedades expansivas del material y determinación de la resistencia a la penetración (AASHTO, 2003). El suelo al cual se aplica el ensayo debe contener una pequeña cantidad de material que pase por el tamiz de 50 mm y quede retenido en el tamiz de 20 mm. Se recomienda que esta fracción no exceda del 20% (Constructor Civil, 2010).

Por cada espécimen de suelo se calculan dos valores de CBR, uno a 0.1" de penetración, y el otro a 0.2" de penetración. El valor que se registra es el que corresponde a 0.1" mientras éste sea menor que el de 0.2". En el caso en el que el valor de CBR para 0.1" fuera mayor que el de 0.2" habría que repetir el ensayo para ese espécimen. Pero si el valor del CBR a una penetración de 0.2" es ligeramente mayor que el de la de 0.1", se registra éste como el valor del ensayo.

Para hallar el valor del CBR de un material se toma como material de comparación la piedra triturada o chancada, es decir que el CBR de ésta es el 100%. Por lo que el cálculo del CBR de cualquier material se realiza como una regla de tres simple directa: % CBR = (carga unitaria del ensayo / carga unitaria patrón) * 100 %, teniendo en cuenta que la carga unitaria patrón varía en función de la penetración (a 0.1", 1000 psi; a 0.2", 1500 psi; a 0.3", 1900 psi).

En la figura 4 se puede apreciar la curva penetración esfuerzo que sirve como definición para el CBR y en la tabla 1, los esfuerzos requeridos para diferentes profundidades de penetración del pistón.

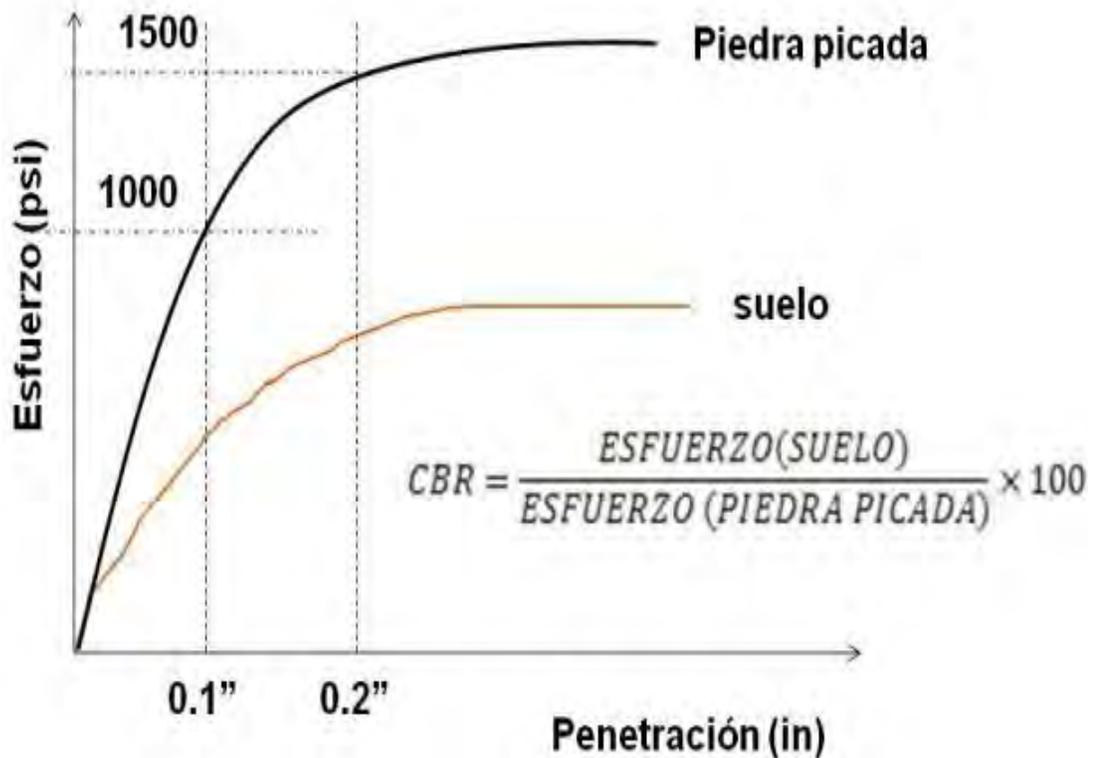


Figura 4. Curva Penetración versus Esfuerzo del CBR
Fuente: ¿Qué es el CBR en un suelo? Sánchez, F. (2012)

Tabla1. Esfuerzos requeridos para diferentes profundidades de penetración

Penetración del pistón	mm	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5
	pulg	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Esfuerzo	MPa	6.89	10.34	13.10	15.86	17.93
	Lb/pulg ²	1000	1500	1900	2300	2600

Fuente: Evaluación de la subrasante. Ejecución de ensayos de resistencia. California Bearing Ratio. Sánchez F. (2012)

Los valores de CBR cercanos a 0% representan, los suelos de pobre calidad (es decir que no poseen una buena resistencia a esfuerzos cortantes), mientras que los más cercanos a 100% son indicativos de la mejor calidad (Sánchez, 2012). En la práctica se utiliza el número de CBR omitiendo el porcentaje (%) y se presenta como un número entero.

En la tabla 2 se muestra una calificación que se le da al suelo de subrasante, base y subbase en función del CBR.

Tabla 2. Calificación del suelo en función de la subrasante

CBR	Calificación	Uso	SUCS	AASHTO
0-3	Muy pobre	Subrasante	CH, MH	A5,A6,A7
3-7	Pobre - Regular	Subrasante	CH, MH	A4,A5,A6,A7
7-20	Regular	Subrasante	CL, ML,SC, SM, SP	A2,A4,A6,A7
20-50	Bueno	Base-Subbase	GM, GC, SW,SM, SP, GP	A1b, A2-5,A3,A2-6
>50	Excelente	Base	GW, GM	A1a, A2-4, A3

Fuente: Manual de laboratorio de suelos para ingeniería civil. Bowles J.(1980)

El valor del CBR es útil tanto para evaluación como para diseño de pavimentos. Para evaluar el CBR (en subrasante o superficie de colocación de estructuras) de un suelo donde se va a fundar una estructura se emula en laboratorio lo más próximo las condiciones del suelo en sitio y así se obtiene el CBR del suelo que mejor represente esa situación según la ASTM D 698-70. Por otro lado, cuando se trata de diseño (en subbases y bases) dado un determinado suelo (de préstamo o de un área de corte) el objetivo es encontrar la combinación de condiciones óptima de confinamiento, grado de saturación, etc., para alcanzar la resistencia querida para un material de base, subbase o relleno estructural. (Sánchez, 2012).

El CBR, frente a otros ensayos que ofrecen datos de resistencia al corte como los ensayos triaxiales, representa un bajo costo. No obstante, debido a la cantidad de muestras que se tienen que recopilar y además la demanda de tiempo para obtener su valor (aproximadamente una semana) encarece el valor del proyecto.

Según Sánchez (2012), el valor del CBR de laboratorio, en condición saturada, tiene serias limitaciones puesto que no es un parámetro geomecánico; aunque esté asociado a múltiples correlaciones y métodos semiempíricos de diseños de pavimentos. No obstante se le puede convertir en un módulo elástico analizándolo como un ensayo de placa a escala.

Otra limitación es la condición de inmersión a 4 días en laboratorio (Ver figura 5), puesto que no es posible controlar el grado de saturación del suelo y cuando se deja escurrir el agua 15 minutos antes del ensayo, esto incrementa la succión de forma descontrolada lo que da lugar a resultados sesgados. Para empezar no se mide o verifica que el ensayo se realiza con el 100% de saturación y al aumentar descontroladamente la succión del material la curva obtenida no sería formalmente una curva de diseño. Algunos autores (Sánchez, 2012) sugieren elaborar un espectro de curvas de diseño a través de un experimento factorial siguiendo la variante de CBR de 15 puntos (Ver figura 6), y analizando los resultados. Sin embargo, la complejidad de este análisis hace que un mismo suelo puede tener tantos valores de CBR como condiciones de ensayo se tengan o de las combinaciones que tengan los factores que influyen en su resistencia.



Figura 5. Muestras de suelo en condición de inmersión de 4 días para el CBR
Fuente: ¿Qué es el CBR en un suelo? Sánchez, F. (2012)

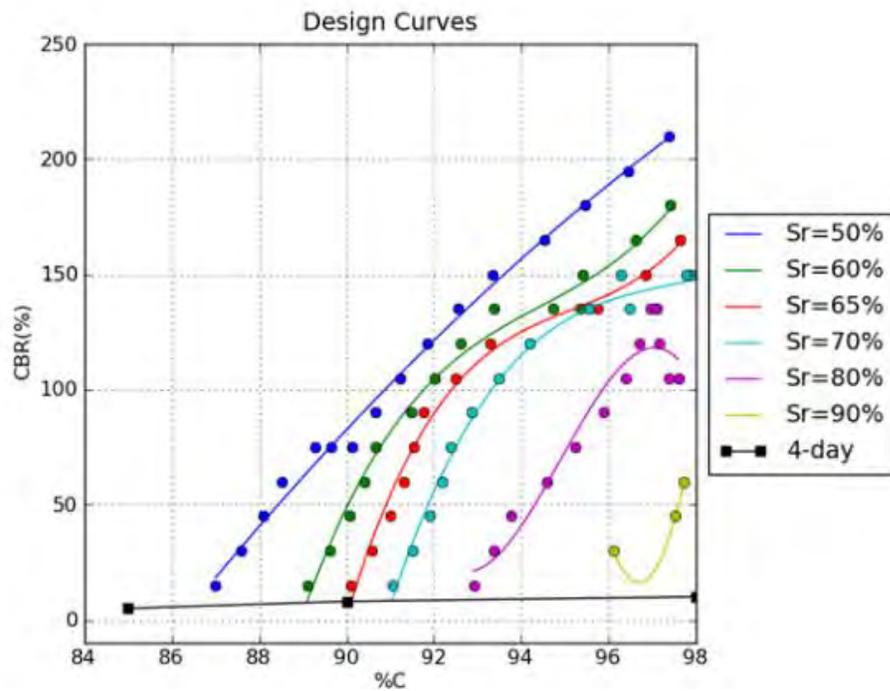


Figura 6. Curva de diseño para diferentes grados de saturación
Fuente: ¿Qué es el CBR en un suelo? Sánchez, F. (2012)

1.2 Propiedades índices de los suelos y su influencia en el CBR

Las propiedades índices de los suelos son propiedades que ayudan en la identificación y clasificación de un suelo. Los principales índices de propiedad del suelo son: distribución del tamaño de partícula, límites de consistencia, contenido de humedad, gravedad específica, densidad in situ y la densidad relativa. Todas estas propiedades son generalmente determinadas en laboratorio y sus ensayos son los siguientes: análisis granulométrico, límites de Atterberg, equivalente de arena, contenido de humedad y gravedad específica.

De las propiedades anteriormente mencionadas definiremos las de interés para esta investigación:

1.2.1. Distribución del tamaño de partícula: Es la determinación de las proporciones de los diferentes tamaños de grano (Granulometría), debido que existen en la naturaleza suelos de diferente tamaño, forma y apariencia. Su ensayo es el análisis granulométrico y se emplea una serie normalizada de tamices (marcos rígidos con mallas con espaciamentos uniformes). Con el porcentaje de suelo retenido en cada tamiz se construye una gráfica semilogarítmica, en las ordenadas se coloca el porcentaje en peso de la muestra retenida en los tamices y en las abscisas se coloca la abertura de cada tamiz.

Con el ensayo granulométrico se puede obtener el contenido de grava (%G), el contenido de arena (%S) y la cantidad de finos: limos y arcillas que pasan el tamiz 200 (%F).

En la figura 7 se puede observar el ensayo de granulometría.



Figura 7. Ensayo granulométrico en laboratorio

Fuente: Ensayo de granulometría MECSYPASA Laboratorio de suelos para construcción (2009)

El **porcentaje de grava** influirá en el valor del CBR dependiendo de la forma de las partículas del agregado (lo cual no se registra). Mientras más angulosa sea la partícula, mayor trabazón tendrá, mayor su resistencia al corte y mayor será el valor de CBR siempre y cuando no haya otro factor de influencia. Probablemente el origen mineralógico de la grava influya en el valor del CBR por su dureza. Unos agregados son más duros y esto favorecerá su resistencia y valor de CBR.

El **porcentaje de arena** influiría en algo en el valor del CBR. Los suelos con mayor contenido de arena presentan un comportamiento más rígido y probablemente mayor resistencia. No obstante, una mayor cantidad de arena implica menor contenido de grava y de finos, lo que daría como resultado menor CBR. Ya desde aquí se puede decir que el contenido de arena analizado de manera individual no será determinante para predecir el CBR.

El **porcentaje de finos** dará mayor resistencia y estabilidad al suelo. Estos parámetros se verán reflejados en los límites de consistencia quienes a su vez, se ven reflejados en el contenido de humedad, relación de vacíos o presión intersticial de un suelo que influye en su resistencia al corte y en consecuencia al valor del CBR.

Según lo comentado, de estos tres parámetros al parecer el que más influirá en el CBR es el contenido de grava ya que como lo mencionamos en el concepto el CBR patrón se estableció teniendo como consideración la piedra triturada. Entonces esto puede indicar que a mayor cantidad de grava mayor será el CBR obtenido.

1.2.2. Límites de consistencia: La consistencia de un suelo es la relativa facilidad con la que un suelo se puede deformar. Atterberg, un agricultor sueco, observó en 1911 cuatro estados de consistencia: estado líquido, plástico, sólido y semisólido. Los límites de consistencia son útiles en ingeniería para poder clasificar un suelo debido a que el comportamiento de un suelo se ve influenciado por la presencia de agua y esto se acentúa cuanto menor es el tamaño de las partículas que componen dicho suelo. Los ensayos para tener estos resultados son: los Límites de Atterberg y el Equivalente de Arena, siendo el primero más preciso que el segundo.

1.2.2.1. Límite líquido (LL): Contenido de humedad con el cuál el suelo deja de ser líquido y pasa a plástico (*Whitlow, 1989*). El LL se determina mediante el método de la cuchara de Casagrande siguiendo lo establecido en la *NTP 339. 129*. (Ver figura 8) El cual consiste en una dejar caer una copa metálica sobre una superficie dura de características específicas.



Figura 8. Ensayo de Casagrande para determinar el Límite Líquido
Fuente: Resultados de laboratorio. Cimentaciones Udea. (2010)

1.2.2.2. Límite plástico (LP): Contenido de humedad con el cual el suelo deja de ser plástico y se convierte en semiplástico. (*Whitlow, 1989*) mediante el método descrito por la *NTP 339. 129*. (Ver figura 9)

Dado que ambos son contenidos de humedad, probablemente mientras mayor sea, menor será el CBR debido a que un estado plástico o líquido no representa resistencia.



Figura 9. Ensayo de plasticidad
Fuente: Límite plástico. Límite de plasticidad. Civil Labs. (2010)

1.2.2.3. Índice de plasticidad (IP): Es el intervalo de humedad en el estado plástico. Se determina por la diferencia entre LL y LP. (Whitlow, 1989)

El ensayo de Equivalente de Arena nos permite una rápida determinación del contenido de finos de un suelo, dándonos además una idea de su plasticidad. El método se describe en la NTP. 339.146. (Ver figura 10)



Figura 10. Ensayo de equivalente de arena

Fuente: Equivalente de arena. G y S Nuestros Servicios (2010)

1.3 Propiedades de compactación y su relación con el CBR

La compactación de un suelo es una propiedad importante, al estar directamente relacionada con la resistencia, capacidad de deformación y estabilidad. En pavimentos, un suelo debe quedar lo más consolidado posible para evitar asentamientos causantes de variaciones en la rasante y alabeo de la capa de rodadura durante el uso de la vía. Cuanto más compacto esté un suelo, más difícil será volverlo a compactar.

La humedad juega un papel decisivo. Mientras que un suelo seco necesita una determinada energía de compactación para vencer los rozamientos internos entre sus partículas, el mismo suelo ligeramente húmedo precisará un menor esfuerzo, ya que el agua se comporta como un agente lubricante formando una película alrededor de los granos y disminuyendo la fricción entre ellos.

Si se sigue añadiendo agua al suelo, llegará un momento en el que ésta haya ocupado la totalidad de los huecos del mismo. Este hecho acarreará un aumento de volumen dado la incompresibilidad del líquido elemento y una mayor dificultad para evacuarlo del suelo, por lo que su compactación disminuirá. Entonces existe una humedad óptima con la que se obtenga una compactación máxima, para una misma energía de compactación (Bañón, 1999).

En una gráfica humedad - densidad (Figura 11) para un mismo suelo pero con distintas energías de compactación, el punto de humedad óptima varía en función de la energía que se haya aplicado y la humedad óptima es menor, mientras menor sea la energía de compactación. Para humedades mayores que la óptima, el aumento de la densidad conseguido con un apisonado más enérgico es mucho menor que el obtenido con humedades bajas. Se concluye que en terrenos secos, una consolidación enérgica puede ser más eficaz.

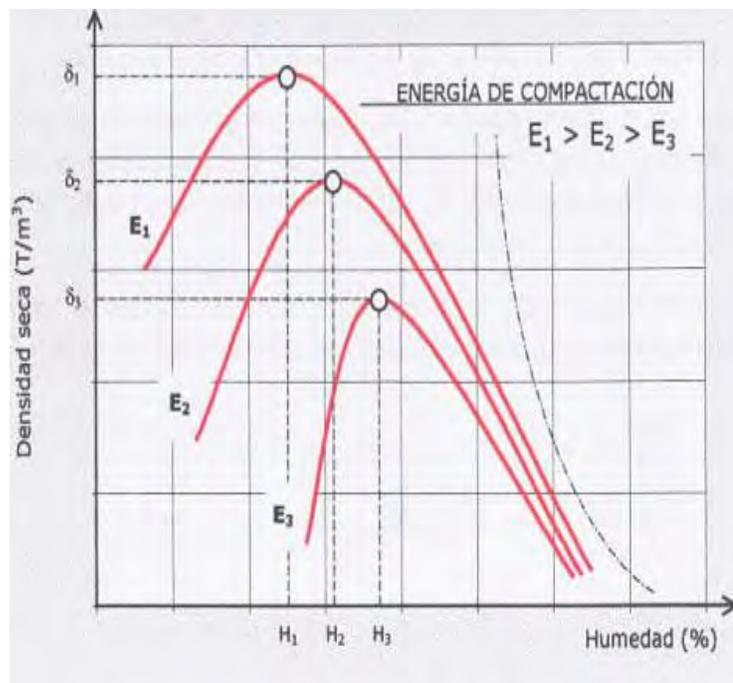


Figura 11 Influencia de la energía de compactación

Fuente: Propiedades de los suelos y su determinación. Compactación del suelo, Bañón, L. (1999).

Dentro de los ensayos de compactación están: el Proctor normal o estándar y el Proctor modificado.

El **ensayo de Proctor** (Figura 12) toma su nombre en honor al ingeniero estadounidense Ralph Proctor y su fin es la determinación de la humedad óptima de compactación de una muestra de suelo. La diferencia única entre usar el Proctor normal y el Proctor modificado, con energía de compactación 4.5 veces mayor el modificado que el normal, es la necesidad de utilizar en campo maquinaria más pesada durante la construcción dado el aumento de la carga por eje experimentado por los vehículos.



Figura 12 Ensayo de Proctor

Fuente: Ensayos de Laboratorio. Geocimientos S.A (2012).

1.3.1. Máxima Densidad Seca (MDD): Es la máxima densidad para un esfuerzo de compactación específico obtenido ensayando el material con varios contenidos de humedad. (*Whitlow, 1989*)

La influencia de este parámetro con el CBR, puede deberse a que mientras más denso sea un suelo (granular) habrá más contacto entre sus partículas, lo que genera mayor resistencia del suelo y por ende mayor valor del CBR. Según Sánchez (2010), para un mismo grado de saturación (contenido de humedad) y carga constante, el CBR aumenta a medida que aumenta la máxima densidad seca.

1.3.2. Óptimo Contenido de Humedad (OMC): Es el contenido de humedad con el que se obtiene la máxima densidad seca para una determinada energía de compactación. (*Whitlow, 1989*)

La influencia de este parámetro con el CBR, se debe a que el grado de saturación hará cambiar la resistencia del suelo produciendo diferentes valores de CBR para un mismo suelo. Depende del grado de succión que éste tenga. Un suelo seco tendrá mayor resistencia que el mismo con un mayor contenido de humedad. Según la norma ASTM D 1883 07 cuando el ensayo se hace con inmersión (saturado 4 días) se debe sacar el espécimen del agua dejándolo escurrir por 15 minutos antes del ensayo. Durante esa fase el grado de

saturación del suelo puede cambiar, la succión del suelo aumentar, generándose diferentes valores de CBR para un mismo suelo.

En la figura 13 se puede observar la gráfica curva cóncava hacia abajo donde el par ordenado máximo representa al OMC, MDD.

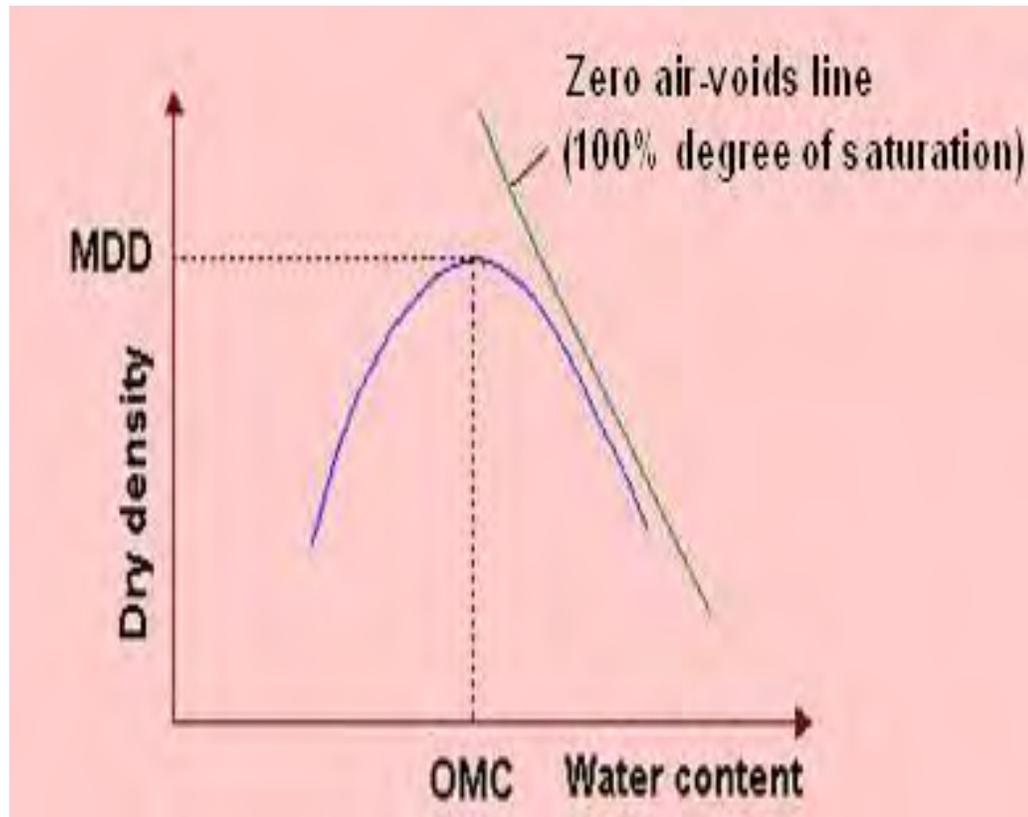


Figura 13 Contenido máximo de humedad vs Máxima densidad seca
Fuente: Dry Density-Water Content Relationship (s/f).

1.4 Correlaciones de otros autores

Patel y Desai (2010) analizaron los suelos de Gujarat, una localidad de India tomando 12 muestras de suelos de grano fino (consistentes en arcilla, arena y limo), de un total de 6 zonas diferentes tanto de campo como de laboratorio. Al hacer su modelo de **análisis de relación lineal simple (ARLS)** y de **análisis de relación lineal múltiple (ARLM)** encontraron que el valor de CBR, tanto de campo como de laboratorio, disminuía al aumentar el índice de plasticidad (IP), el óptimo contenido de humedad (OMC) o la máxima densidad seca (MDD). Patel et al (2010) no detallan el rango de valores del CBR. Sin embargo, precisan que el valor máximo de error entre los valores predichos y los medidos en laboratorio fue del 12%. Ellos utilizan un lenguaje de programación con SPSS software llegando a la conclusión de que el porcentaje de error es mayor que el arrojado con Microsoft Excel. Por lo tanto, es posible establecer una correlación entre CBR de laboratorio y los parámetros físicos usando Microsoft Excel con suficiente precisión.

Por otro lado en la localidad de Kokata, India, **Chattopadhyay y Datta** (2011) también plantearon su ecuación de **correlación simple y múltiple** para 28 muestras de suelos de grano fino, entre CBR de campo y dos propiedades índices de suelo: máxima densidad seca (MDD) y el contenido óptimo de humedad (OMC). Esta ecuación fue comparada con una de las planteadas por **Patel y Desai** (2010) donde consideraba MDD, OMC y adicional a ellos también PI y con otra planeada por otros autores donde los parámetros relacionados fueron CBR con LL y la fracción de arcilla. En sus análisis llegaron a la conclusión que los valores de CBR de estos últimos mostraban mucho alejamiento de los resultados experimentales, especialmente en suelos arcillosos de baja plasticidad (CL), mientras que los valores de CBR predichos en la ecuación de Patel y Desai eran mucho menores que los experimentales. También notaron que para ambas propuestas los valores coincidían con los valores de CBR de laboratorio en el caso de suelos arcillosos de alta plasticidad (CH). La regresión fue múltiple y el programa utilizado fue Microsoft Excel.

Otra de las más recientes publicaciones también fue hecha en la India en Enikepadu, por **Ramasubbaro y Siva** (2013) quienes presentaron un análisis de regresión lineal simple donde el mejor coeficiente de correlación ($R= 0.91$) se dio entre CBR de campo y MDD. Pudieron observar que dentro de los parámetros analizados, los que tuvieron una buena correlación fueron el límite de plasticidad (LP), porcentaje de finos (%F), porcentaje de arena (%S), porcentaje de grava (%G), límite líquido (LL) y contenido máximo de humedad (OMC). No obstante cuando realizaron su análisis de correlación lineal múltiple su coeficiente de correlación fue de 0.96 para 25 muestras de suelos de grano fino [12 arcillas de alta plasticidad (CH), 10 arcillas de baja plasticidad (CL), 2 limos de baja plasticidad ML y 1 limo de alta plasticidad (MH)]. Los autores sugieren que es mejor una correlación múltiple donde se involucran todos los parámetros que una correlación simple, donde cada parámetro individualmente se correlaciona con el CBR. Encontraron también que los valores predichos por otros autores y los valores de CBR de laboratorio eran muy aproximados, de modo que se verifica que el CBR depende del tamaño del grano del suelo (%G, %S y %F), características de plasticidad (LL, LP e IP) y de las características de compactación (MDD y OMC).

Finalmente, **Kumar** (2014) estableció una correlación entre CBR de campo con las propiedades índices de los suelos para 16 muestras de diferentes partes de la localidad de Nagaom en India. Nueve de estas localidades fueron suelos limosos de baja plasticidad (ML) y siete, suelos limosos de alta plasticidad (MH), todos con valores de CBR entre 5.5% y 9%. El modelo que empleó fue un análisis de regresión lineal simple para cada propiedad índice del suelo con el CBR notando que cuando el índice de plasticidad (IP) y el óptimo contenido de humedad (OMC) aumentaban, el valor del CBR disminuía. Pero a diferencia de Patel y Desai (2010), cuando el valor de la máxima densidad seca (MDD) aumentaba, el CBR también aumentaba. Kumar, estableció una ecuación que predecía el valor del CBR en función de estos cinco parámetros con una máxima diferencia de solo 3.67% para valores de CBR de laboratorio menores a 6.3%.

A diferencia de los anteriores autores, la presente investigación se centrará en el CBR de laboratorio en condición saturada y el aporte está en el uso de una base de datos más extensa (75 datos) y que incluye más tipos de suelos (suelos de grano fino y grano

grueso), lo que permitirá no solo verificar las relaciones propuestas por la literatura disponible, sino su ámbito de aplicación y proponer una nueva relación que incluya todo tipo de suelos. (Ver apéndice A).

Capítulo 2

Correlación del CBR con cada parámetro del suelo

2.1 Naturaleza de los datos

Las muestras seleccionadas de la base de datos del Laboratorio de Ensayos de Materiales de Construcción (LEMC) la Universidad de Piura (UDEP) fueron 75. Los años estudiados datan desde el 2004 hasta agosto del 2014.

Los suelos que se encontraron fueron diversos entre los de grano fino: arcillas limosas, arcillas de alta plasticidad, arcillas de baja plasticidad, limos de alta plasticidad y limos de baja plasticidad y de grano grueso: gravas bien graduadas, gravas arcillosas, gravas limosas, arenas arcillosas y arenas limosas.

El porcentaje de grava oscila entre 0 y 68 %, el porcentaje de arena entre 0 y 83 %, el contenido de finos (arcillas y limos) entre 7 y 98%, el límite líquido entre 15 y 75 %, el límite plástico entre 13 y 26 %, el índice de plasticidad entre 1 y 49 %. La máxima densidad seca oscila entre 1.62 y 2.29 g/cm³, el óptimo contenido de humedad entre 4.5 y 19.2 % y los valores de CBR entre 1 y 81 %.

Las localidades estudiadas fueron: Piura (Terminal Terrestre – Ex peaje Piura Sullana, Asentamiento Humano Los Jardines, Urbanización San Eduardo, Urbanización Las Casuarinas, Carretera Km 21 Tambogrande), donde los suelos predominantes fueron arcillas, arenas limosas y arcillosas, así como limos de baja plasticidad; Paita (Zona Industrial, Yacila, La Huaca), con suelos gravosos, limosos y arcillosos; Morropón (Carretera Chalaco – Paicapampa, 109 Km 50 – Chulucanas, Paltashaco), donde los suelos son arenas y gravas limosas y arcillosas. La mayor concentración de datos se ubica en la zona urbana de la ciudad de Piura (Ver figura 14).

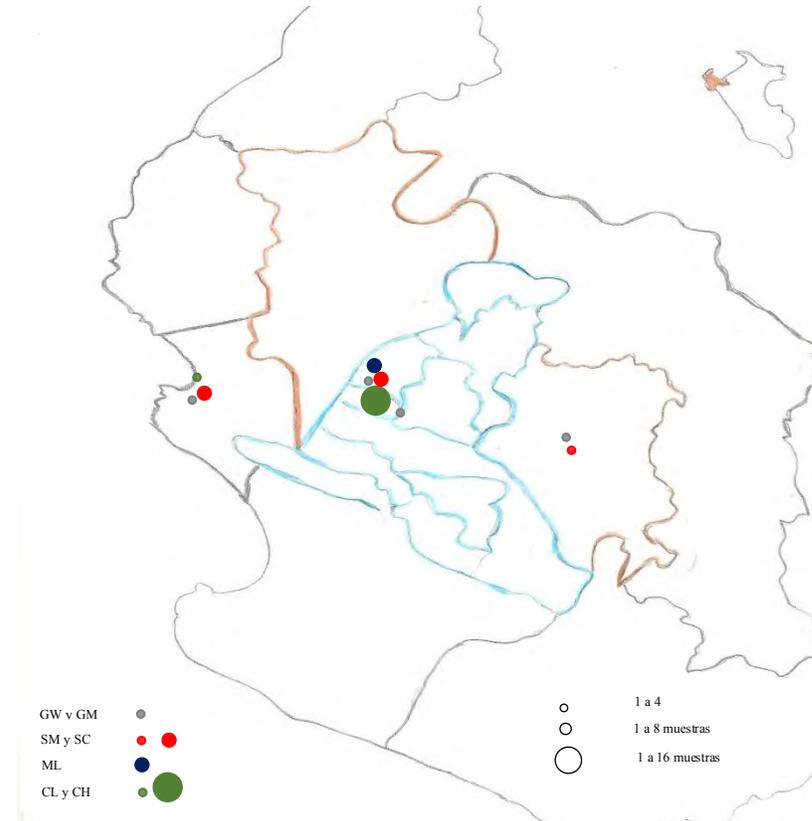


Figura 14. Ubicación de las muestras de la base de datos usada.

2.2 Selección de los datos

El primer paso fue proceso de selección minuciosa de los datos. Para poder considerar una muestra para la investigación se requería que para el mismo suelo se hubieran realizado ensayos de granulometría (%G, %S y %F), límite de consistencia (LL, LP e IP), ensayo proctor modificado (MDD y OMC) así como el ensayo de CBR.

El segundo paso fue completar la clasificación del suelo, tanto en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) como en el American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).

2.3 Correlaciones de los parámetros de suelo con el CBR

2.3.1. Relación entre el CBR y el contenido de grava (%G)

Al graficar el CBR en relación al contenido de grava (Figura 15) podemos observar que mientras mayor sea el contenido de grava, mayor será el valor del CBR. Se podría sugerir una correlación lineal. Si se tiene en cuenta el concepto de CBR, hay que recordar que la muestra patrón es la piedra triturada cuyo CBR es el 100%, por lo que cuanto más grava esté presente en la muestra, más se acercará el CBR al 100%.

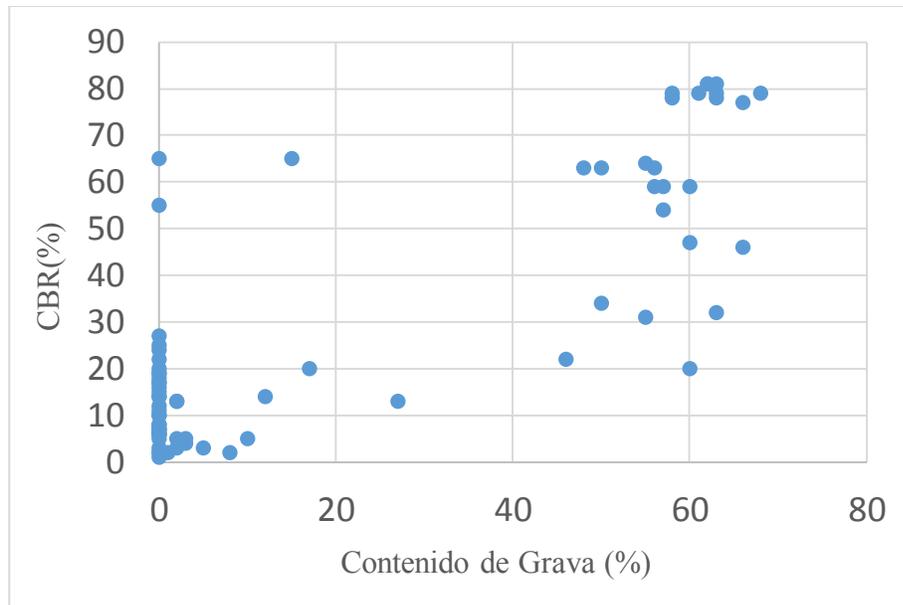


Figura 15. Relación entre el CBR y el contenido de grava (%G).

Para contenidos de grava cercanos al 60% se nota que la dispersión es alta en relación al rango entre 0 y 20 %. Esto podría indicar que puede haber otros factores con significativa influencia, además del contenido de grava.

Es interesante observar que aún en ausencia de grava (%G = 0), algunos suelos alcanzan valores de CBR por encima del 20%. Esto podría confirmar la influencia de otros factores en el valor de CBR. Dado que se está trabajando con CBR saturados, el valor de CBR alto podría estar determinado no solo por el contenido de arena y de finos, sino quizás de la naturaleza de los finos. Los suelos en esta zona corresponden a Piura, Paita. En la zona de Paita se puede especular que hay cierto contenido de finos aglomerantes, posiblemente calcáreos que mejorarían su resistencia con la saturación.

2.3.2 Relación entre el CBR y el contenido de arena (% S)

Se ha graficado el CBR con el contenido de arena. Se observa una tendencia del CBR a aumentar conforme aumenta el contenido de arena en el suelo. (Figura 16)

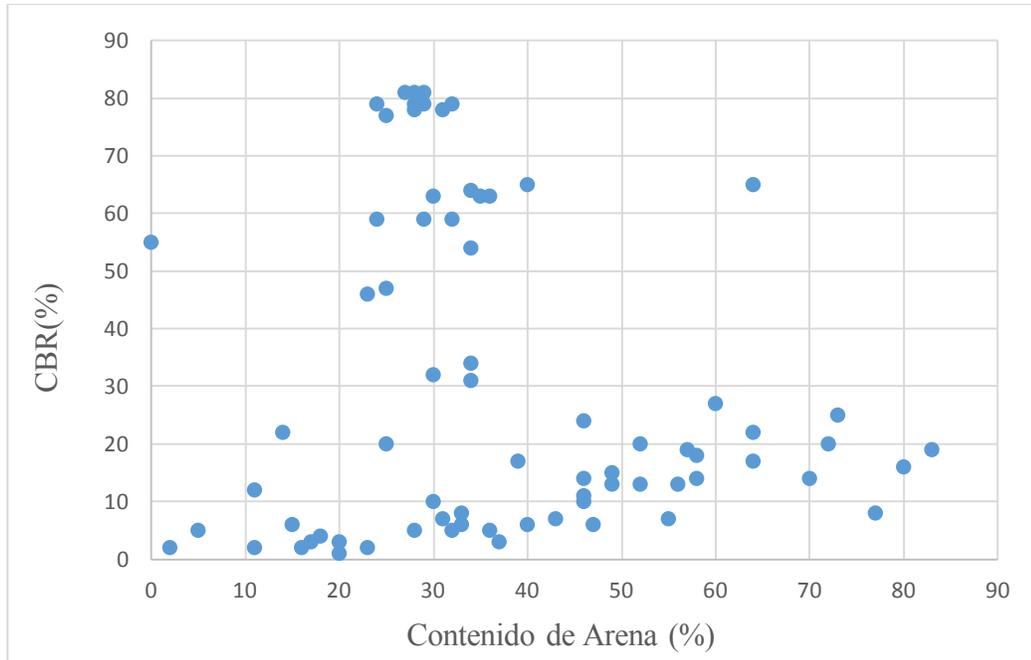


Figura 16. Relación entre el CBR y el contenido de arena (%S).

La presencia de arena supone la presencia de grava o finos, que son los que tendrán un papel más determinante en el comportamiento del CBR. Sin embargo, se nota que tampoco el contenido de arena es un factor determinante del CBR. Hay rangos en los cuales el CBR se dispara, aún con contenidos de arena bajos. Esto se nota más alrededor del 30%, donde además hay una mayor dispersión del CBR. El comportamiento de esta gráfica puede asemejarse a la forma de una campana, en donde hay un rango creciente entre 0 y 30 % de %S y un comportamiento decreciente para valores de %S mayores al 30%.

2.3.3 Relación entre el CBR y el contenido de finos (%F)

Se ha graficado 75 muestras tomando de ellas, el contenido de finos (limos y arcillas) con su respectivo CBR (Figura 17). El contenido de finos viene representado por el porcentaje que pasa el tamiz 200 en la curva granulométrica.

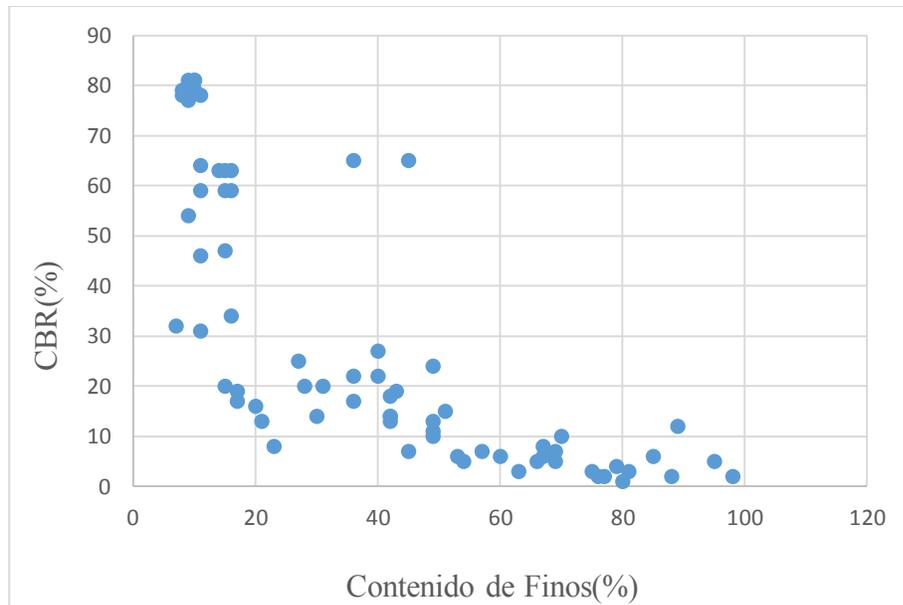


Figura 17. Relación entre el CBR y el contenido de finos (%F)

Se nota una tendencia clara a disminuir el CBR a medida que aumenta la cantidad de finos. La relación entre estos dos valores no parece ser lineal; más bien parece ser potencial (asintótica en ambos ejes positivos), dada la gran variación de los datos entre 0 a 20% del CBR. Este comportamiento puede estar influenciado por la presencia de grava, puesto que el contenido de finos no discrimina las características de alta o baja plasticidad.

2.3.4 Relación entre CBR y el límite líquido (LL)

Al comparar el CBR con el LL (Figura 18), se puede observar que hay una tendencia exponencial decreciente y asintótica. En esta gráfica de 75 muestras, se pueden diferenciar suelos granulares y finos.

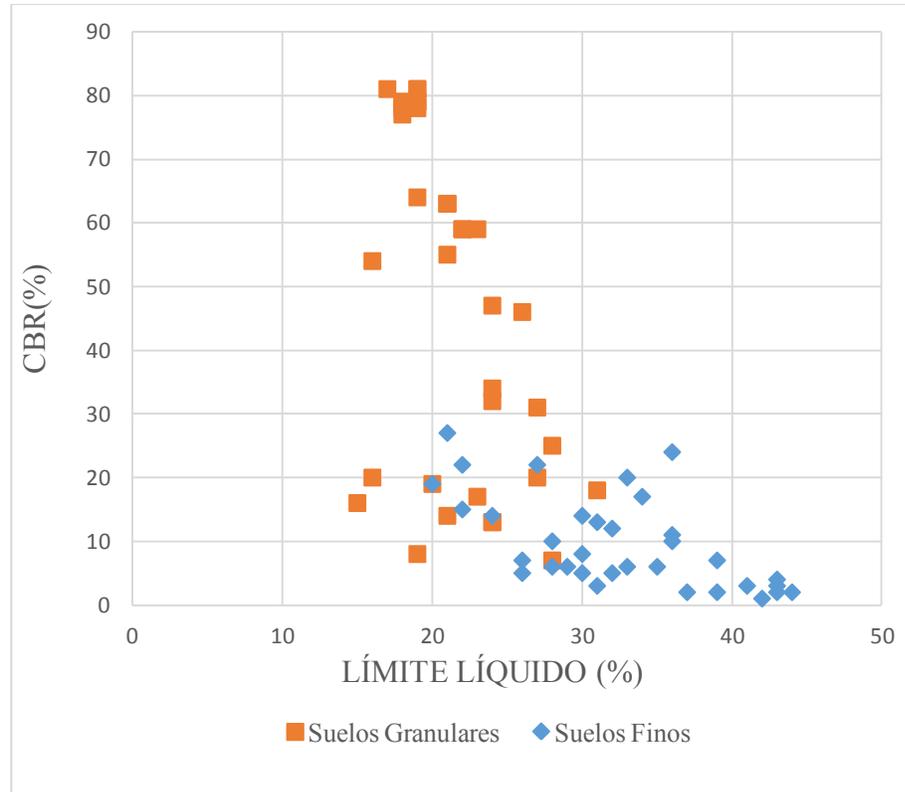


Figura 18. Relación entre el CBR y el límite líquido (LL).

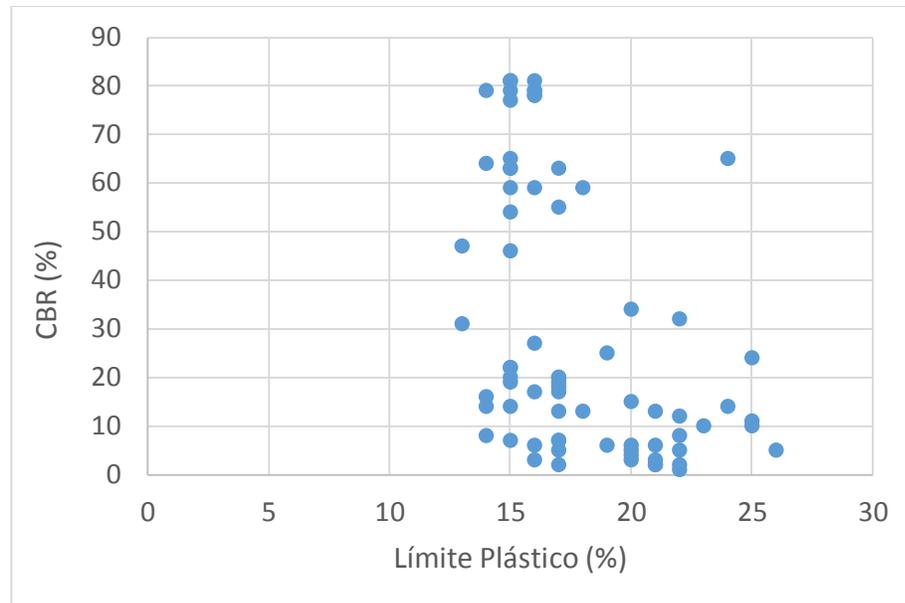
Para un mismo valor de LL en algunos casos existen CBR diferentes y opuestos (CBR de 8 y 64 para un límite líquido de 19), lo cual podría significar que aunque el LL influye en el valor del CBR, lo determinante es el porcentaje de grava presente. Si bien a mayor límite líquido se espera menor CBR, el comportamiento del conjunto del suelo dependerá del contenido de gruesos y finos presentes.

Al discriminar los datos para suelos granulares y suelos finos, se puede observar que para los suelos granulares la tendencia tienen una pendiente más pronunciada que los finos, lo que indica que el contenido de grava dispara rápidamente el valor del CBR, a diferencia de los suelos de grano fino. Si se analizan de manera independiente, se aprecia una tendencia lineal para ambos, aunque con pendientes diferentes. Si se analizan en conjunto, se aprecia una relación exponencial similar a la del contenido de finos.

Se observa también que para un mismo tipo de suelo, se tienen CBR de 22 y 65 (Suelo A-4 (0) o ML). Esto podría confirmar la hipótesis de que hay otras condiciones que influyen en el CBR, como sugiere Sánchez (2012) cuando discute la confiabilidad de los resultados del CBR saturado. Al parecer, el CBR es muy sensible al tipo de suelo y al tamaño de partículas. A diferencia de las investigaciones realizadas en Gujarat, Kokata, Enkikepadu, Nagaome (India) donde se limitan a suelos finos; la base de datos del presente trabajo abarca adicionalmente suelos granulares.

2.3.5 Relación entre el CBR y límite plástico (LP)

Al comparar el CBR con el LP (Figura 19), se puede observar nuevamente una tendencia exponencial decreciente y asintótica.



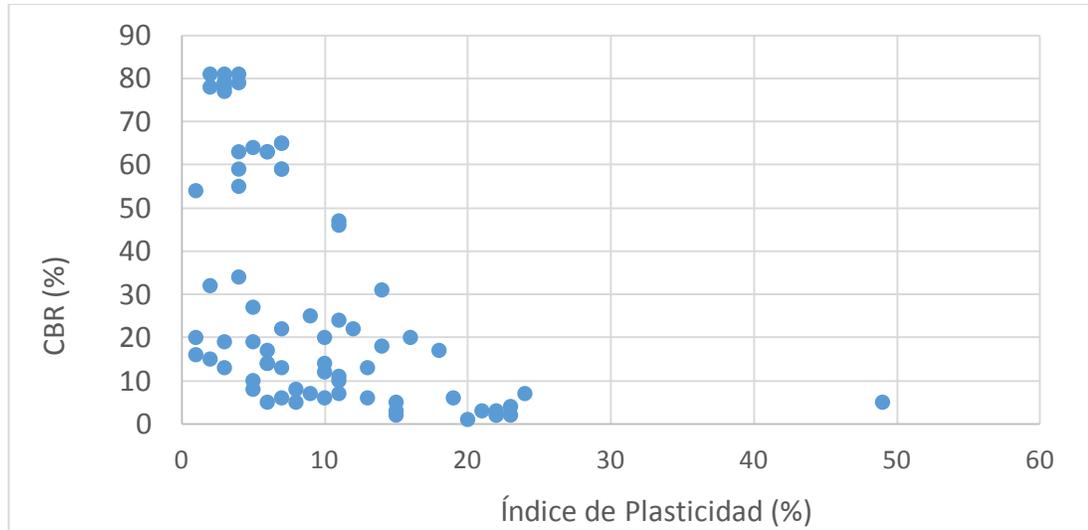


Figura 20 Relación entre el CBR y el índice de plasticidad (IP).

Ya otros autores han propuesto una correlación exponencial, con una mayor base de datos como se puede observar en la figura 21.

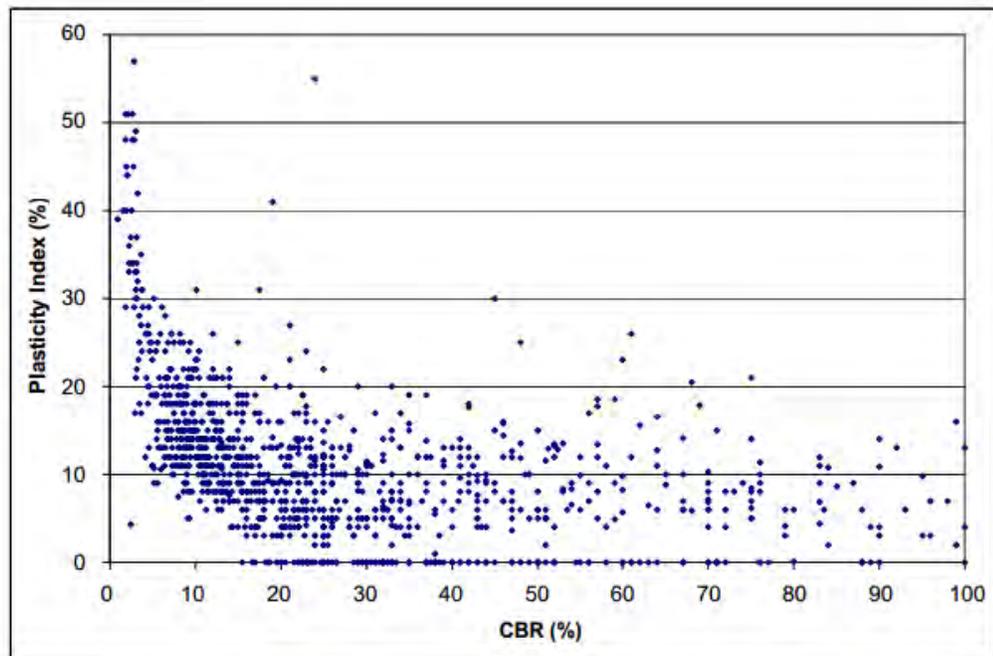


Figura 21. Relación entre el CBR y el índice de plasticidad en suelos de Sudáfrica.
Fuente: *The relationship between index testing and CBR values for natural road construction materials in South Africa.* Breytenbach (2009)

En cualquier caso, se observa que mientras menor es el valor del CBR (menor a 10), menor es la dispersión, lo que nos lleva a decir que las arcillas o limos altamente plásticos tienen una mayor correlación con el CBR.

2.3.7 Relación entre el CBR y la máxima densidad seca (MDD)

Se comparó la máxima densidad seca (MDD) con el CBR, cuyos resultados se ven en la figura 22.

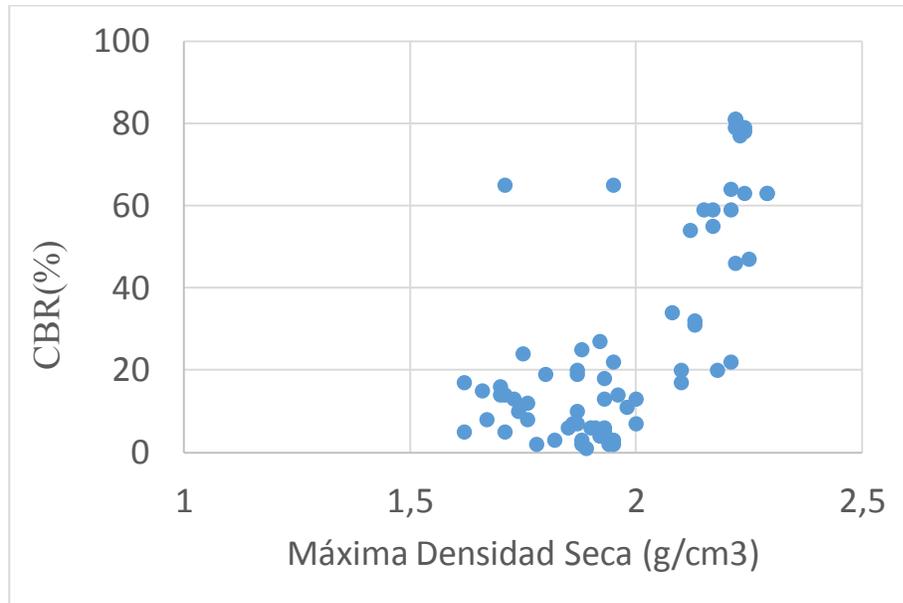


Figura 22. Relación entre el CBR y la máxima densidad seca (MDD).

Al igual que con el contenido óptimo de humedad, se ve una clara relación de la MDD con el CBR. Hay una tendencia del CBR a aumentar a medida que aumenta la MDD también. Esto es muy lógico, dado que cuanto más compacto esté un suelo, su capacidad de soporte será mayor. Aunque la relación se propone lineal, se podría especular una tendencia exponencial o potencial creciente.

2.3.8 Relación entre el CBR y el contenido óptimo de humedad (OMC)

Como último parámetro podemos analizar el OMC versus el CBR. Esta relación se puede observar en la figura 23.

Capítulo 3

Análisis de regresión y discusión de resultados

El propósito de la correlación es poder estimar una variable dependiente (CBR) en función de una o más variables independientes. (G, S, F, LL, LP, IP, MDD y OMC).

En esta investigación se propone usar dos tipos de correlación: correlación lineal simple y correlación lineal múltiple. Otros autores (AASHTO, 2002; Chattopadhyay y Data, 2011, Kumar, 2014; Patel y Desai, 2010; Ramasubbaro y Siva, 2013; Saklecha et al., 2011; Yildirim y Gunaydin, 2011) han probado ya estas correlaciones para estimar el CBR con bastante acercamiento a los resultados experimentales (errores menores al 5%) usando herramientas de hojas de cálculo que están al alcance, como el Microsoft Excel.

Los dos parámetros estadísticos más importantes que se emplearán para evaluar las correlaciones en esta investigación son el coeficiente de correlación lineal de Pearson (R) y el coeficiente de determinación (R²).

El primero ayudará a cuantificar la intensidad de la relación lineal entre dos o más variables; un valor próximo a 1 indica una buena correlación lineal directa, mientras que más cercano a -1, una buena correlación lineal indirecta. Por otro un R de 0 indicará que no existe correlación entre las variables analizadas. (Vila et al, 2001).

En la figura 24 se observa una recta con valores numéricos señalando el significado de cada coeficiente de correlación lineal de Pearson. (R)



Figura 24. Diagrama resumen del significado del coeficiente de correlación lineal de Pearson

Fuente: Análisis de regresión y correlación lineal. Vila, et al. (2001)

La desviación estándar muestra que los valores menos dispersos se encuentran en la MDD y el OMC (menor a 5). En general, se puede decir que se cuenta con una data más continua mientras que en el caso del %G, CBR, %F y %S la desviación estándar es mayor a 18, lo cual indica la carencia de datos en algunos rangos, lo cual podría generar un valor bajo en el ajuste de la ecuación (bajo R^2).

La distribución de los valores de CBR de la data se muestra en el histograma de frecuencia de la figura 25. Se puede notar que la porción más larga de la data se encuentra para CBR menores a 30% y en el rango de 60 a 80%.

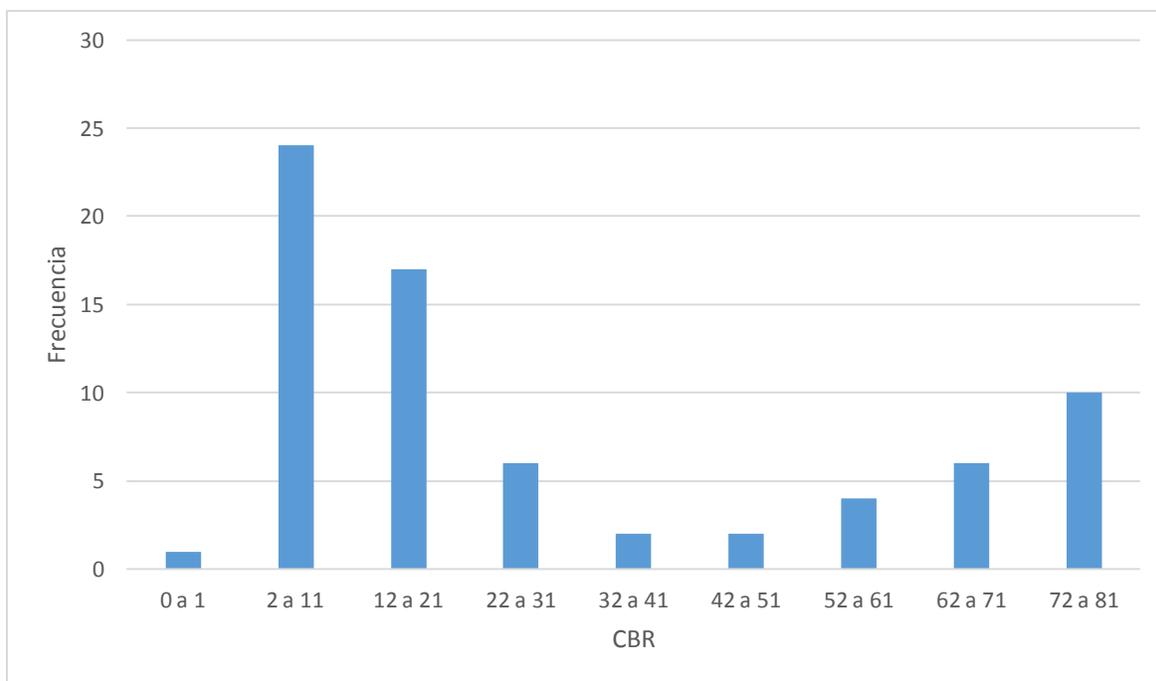


Figura 25. Histograma del CBR en la base de datos.

Dentro del rango de valores de CBR menores al 30%, la mayor base de datos es para suelos arcillosos (0-10%), seguidos de los arenosos y limosos (11-20%). Mientras que el rango de valores de CBR entre 60 y 80% la mayor frecuencia la presentan los suelos gravosos. Al existir una mayor frecuencia de valores de CBR en los suelos arenosos-limosos, se podría esperar que la validez de los modelos se limite a este tipo de suelos.

3.2 Análisis de regresión lineal simple (ARLS)

Se realizaron ocho modelos con análisis de regresión lineal simple con la finalidad de mostrar la influencia de cada parámetro índice de propiedad del suelo de manera individual con el valor del CBR de laboratorio para subrasantes. Los modelos propuestos fueron:

Modelo 1: G vs CBR

Modelo 2: S vs CBR

Modelo 3: F vs CBR

Modelo 4: LL vs CBR

Modelo 5: LP vs CBR

Modelo 6: IP vs CBR

Modelo 7: MDD vs CBR

Modelo 8: OMC vs CBR

Las correlaciones lineales simples son mostradas de la Figura 15 a la Figura 22.

3.2.1. Análisis de regresión entre %G y CBR

En la Figura 26 se muestra que la correlación entre %G y CBR es **buena** según la tabla de criterio de bondad de ajuste de parámetros estadísticos (*Pellinen, 2001*). Sin embargo a pesar de que el R^2 de 0.706 es aceptable, no se observa una tendencia lineal clara, como lo hacen otros autores (Yildirim y Gunaydin, 2011). Esta diferencia se debe a una ausencia de datos entre 20 al 40 % en el contenido de grava.

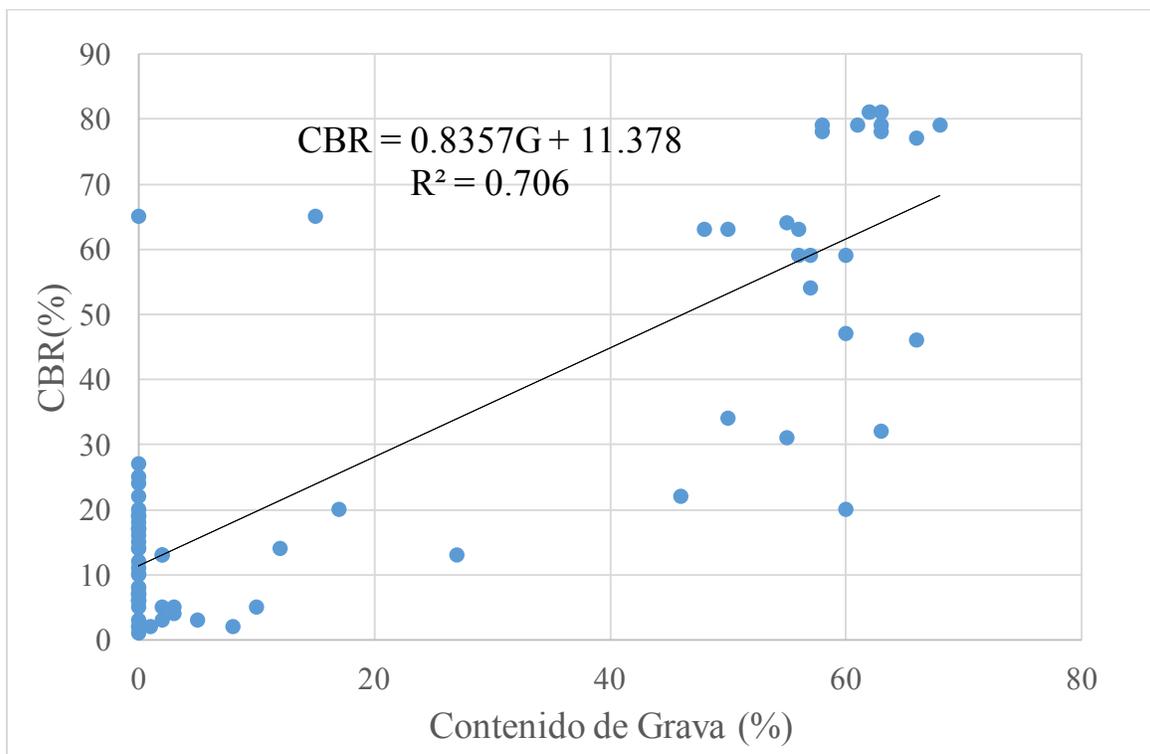


Figura 26. Análisis de regresión entre %G y CBR

Al aplicar la ecuación obtenida del análisis de regresión entre %G y CBR en la base de datos (Ver Apéndice B), se puede observar que para %G menores al 20% en su mayoría para los suelos arcillosos (CH, CL), el error calculado entre el CBR de laboratorio y el CBR calculado es mayor al 50% con lo que se puede decir que esta ecuación no aplica a suelos arcillosos. También se puede observar que para errores mayores al 50% (Figura 27), los CBR experimentales son menores al 7% y mayores al 23%. A diferencia de los suelos limosos (ML) y arenosos (SM) donde el error es menor del 50%. En general, los valores de CBR experimentales oscilan entre 8 y 22% cuando el error es menor al 50%.

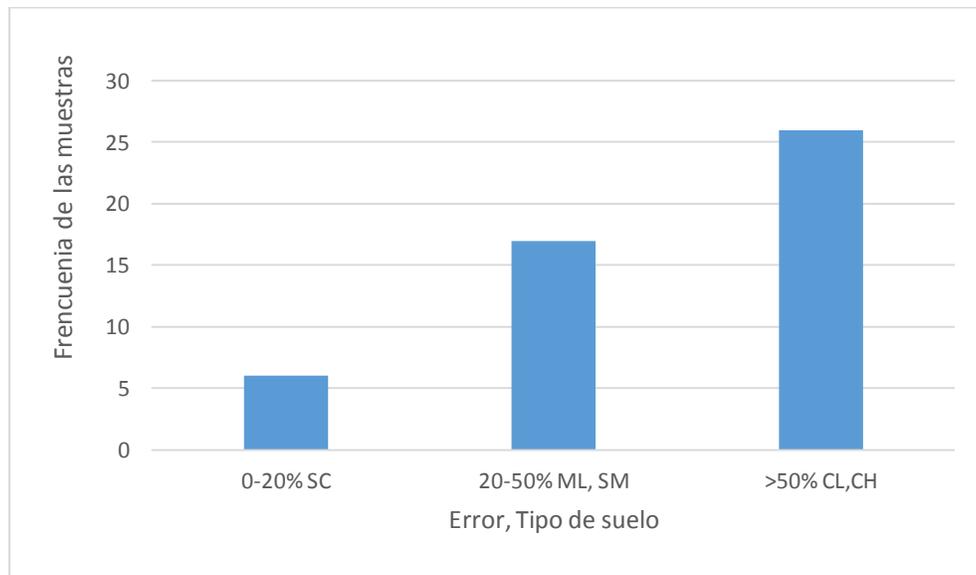


Figura 27. Frecuencia de error según tipo de suelo para modelo G vs CBR.

Así mismo para %G entre 50% al 70% según la base de datos, el error en su mayoría es menor al 30% y pertenece a suelos gravosos (GM, GW). Entonces podemos concluir que esta ecuación lineal serviría para una aproximación de CBR para suelos limosos, arenosos y gravosos, excluyendo a los suelos arcillosos.

3.2.2. Análisis de regresión entre %S y CBR

En la figura 28 se muestra el análisis de regresión del %S con el CBR.

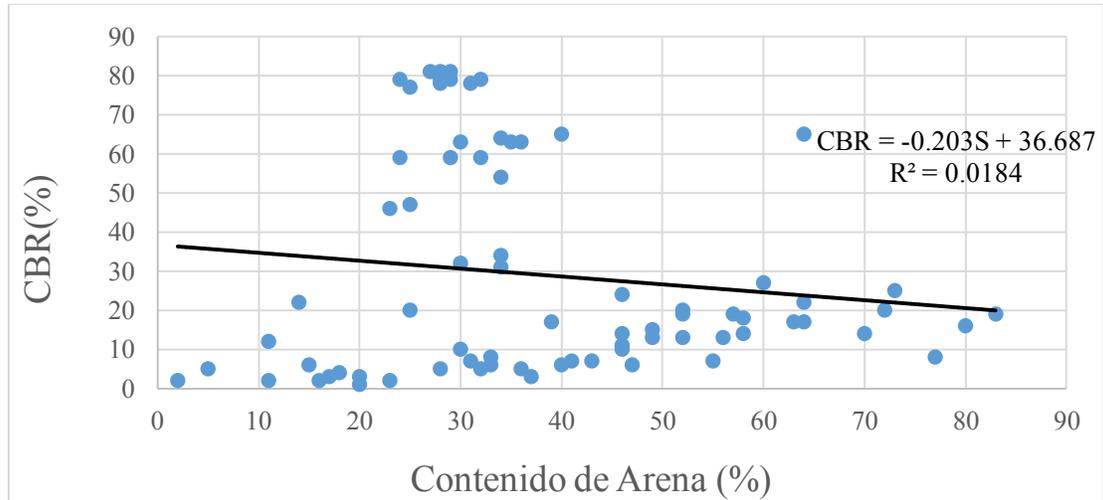


Figura 28. Análisis de regresión entre S y CBR

Se puede observar que el coeficiente de determinación bajo ($R^2 = 0.0184$) ya indica que la ecuación no tiene un buen ajuste o que su ajuste es **muy pobre** (Pellinen, 2001). Esto se debe a la gran dispersión de valores que existe entre 20 y 40 % de contenido de arena y como se mencionó anteriormente puede deberse a la alta desviación estándar en la base de datos de los valores de %S. Como se comentó en el capítulo 1, se esperaba una mayor rigidez en el suelo a medida que se incrementaba el contenido de arena, manifestado como un mayor valor de CBR. No obstante se observa lo contrario, una razón puede ser a mayor cantidad de arena significa que hay menor cantidad de grava o finos, en tal caso la carencia de finos provoca falta de confinamiento en la porción de suelo evaluado y por ende menor valor de CBR.

Al evaluar los errores, no se puede identificar ninguna relación entre la magnitud del error con el tipo de suelo. Para diferentes rangos de errores se muestran diferentes tipos de suelo. Solo se rescata que para porcentajes de arena menores al 20% los errores de aproximación entre el valor de CBR experimental y el CBR predicho con la ecuación de %S son bastante altos (mayores al 50%). Pero para porcentajes de arena entre 40 y 80% se observa que el error varía entre 10 al 40% (Ver apéndice C). En este rango, los suelos son arenosos (SM).

3.2.3. Análisis de regresión entre %F y CBR

En la figura 29 se muestra el análisis de regresión del %F con el CBR.

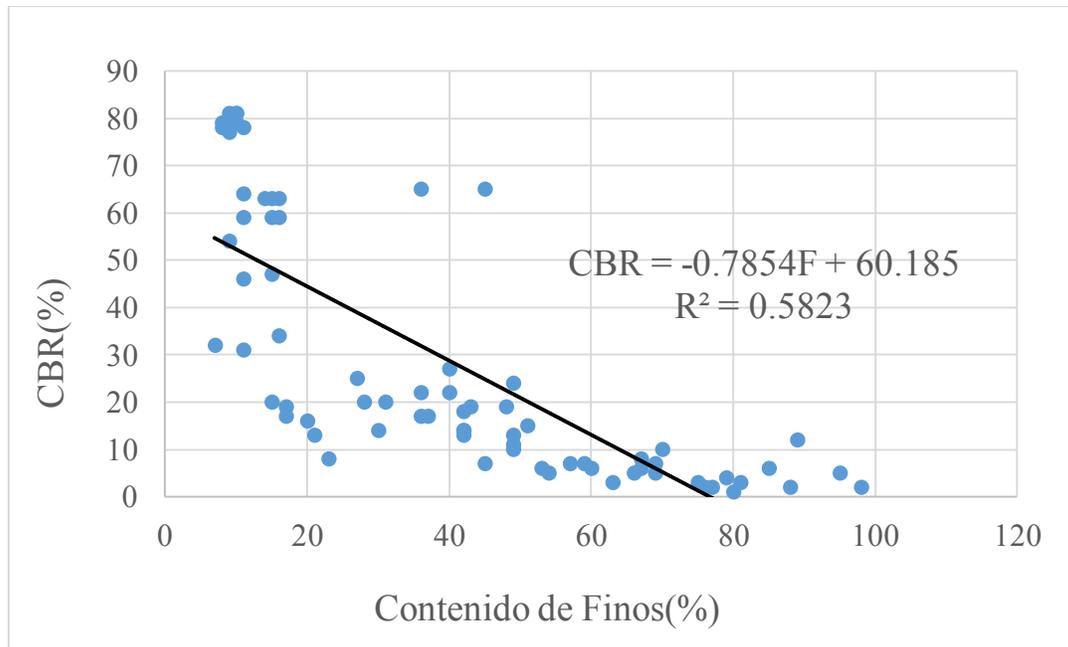


Figura 29. Análisis de regresión entre F y CBR

Al analizar el porcentaje de finos, el R^2 de 0.5823 indica que el modelo es aceptable. Debido a que el modelo propuesto es lineal, se obtienen valores de CBR predichos negativos, lo cual no es posible en la realidad. Para todos los valores de %F el error es mayor del 50% a pesar de que el ajuste es aceptable. (Ver apéndice D).

3.2.4. Análisis de regresión entre LL y CBR

Al hacer el análisis de regresión entre el CBR y el LL (Figura 30) se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.3482. Esto indicaría que la correlación es pobre (Pellinen, 2001).

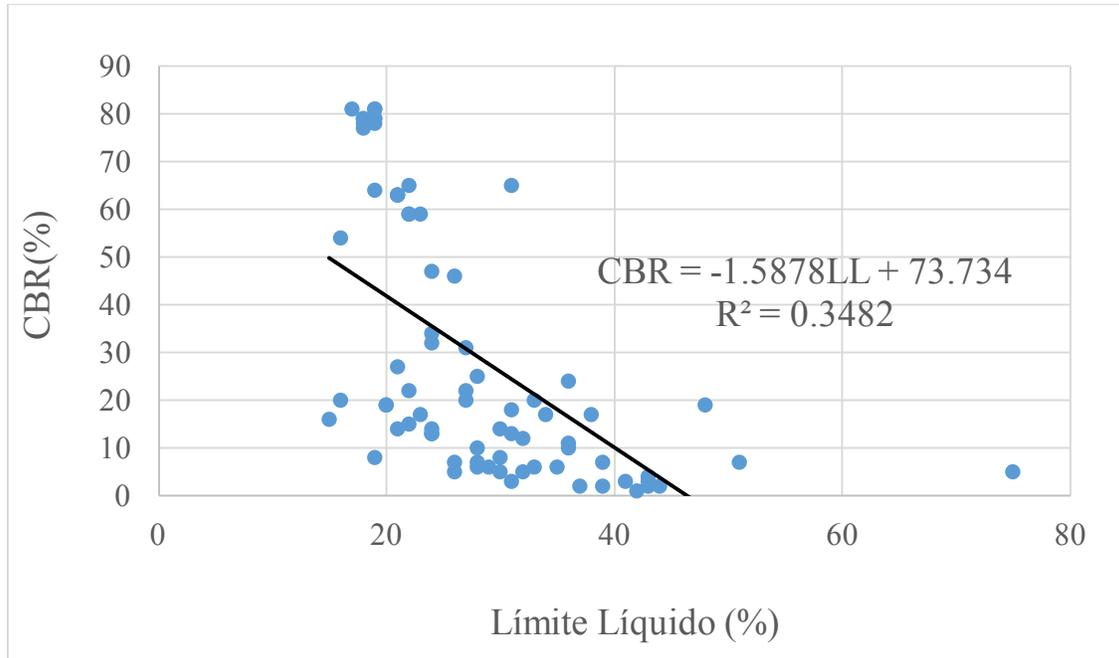


Figura 30. Análisis de regresión entre LL y CBR

Se observa una influencia inversa del LL en el valor del CBR. No obstante, al predecir los valores de CBR se obtienen valores negativos. Esto podría ser un indicador de que la correlación lineal no es la más apropiada para correlacionar estos dos parámetros.

En el apéndice E se detallan los errores para una simulación del presente modelo usando los datos experimentales. Se encontró que el error es mayor al 50% para suelos arcillosos (CL).

3.2.5. Análisis de regresión entre LP y CBR

En la figura 31 se muestra el análisis de regresión del LP con el CBR.

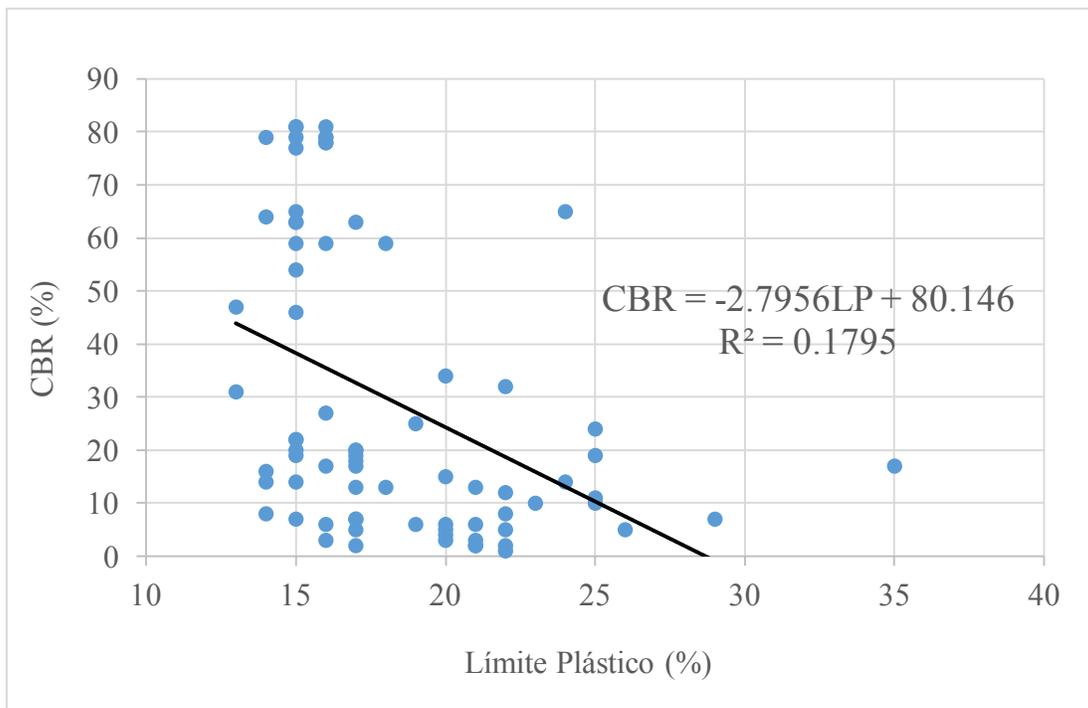


Figura 31. Análisis de regresión entre LP y CBR

El coeficiente de determinación con una correlación lineal es bajo y al reemplazar la data en la ecuación predicha de este análisis de regresión, se observa que solo en suelos gravosos (GC y GM) el error es menor del 50%; (Ver apéndice F).

3.2.6. Análisis de regresión entre IP y CBR

En este modelo (Figura 32) se presenta un coeficiente de determinación bajo ($R^2=0.2756$), por lo que se confirma que la regresión lineal no es la mejor correlación entre estos dos parámetros.

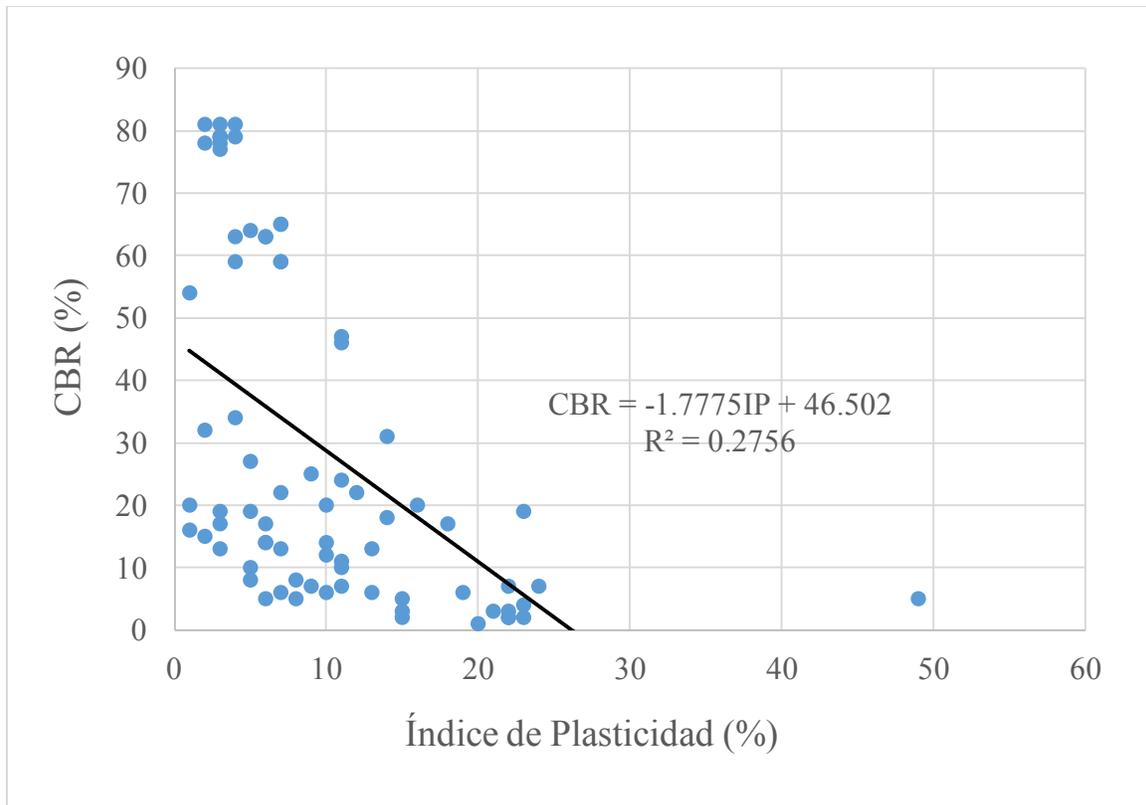


Figura 32. Análisis de regresión entre IP y CBR

El error del modelo propuesto para el IP y el CBR es menor al 50% cuando se trata de suelos gravosos (GW) y mayor al 50% cuando se trata de suelos arcillosos (CL). (Ver apéndice H).

3.2.7. Análisis de regresión entre MDD y CBR

En la figura 33 se muestra el análisis de regresión de la MDD con el CBR.

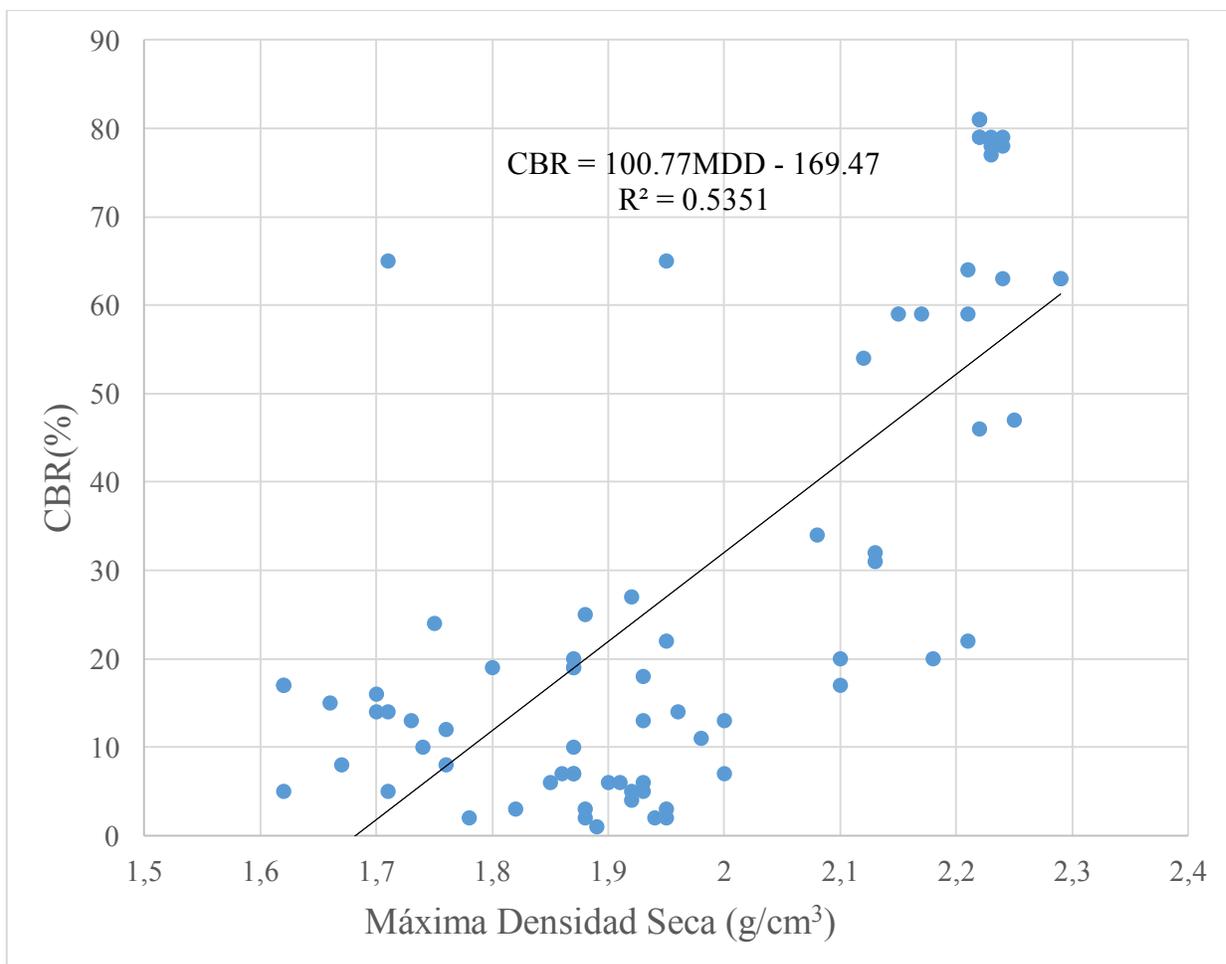


Figura 33. Análisis de regresión entre MDD y CBR

Para MDD entre 1.5 a 2 g/cm³ se observa que la ecuación aplica mejor para suelos arenosos y limosos (error menor al 50%) que para suelos arcillosos (mayor al 50%). Para MDD mayor a 2, se observa nuevamente que la ecuación si aplica para suelos gravosos (GW, GM y GC) donde el error es menor al 40%. Cabe resalta que este modelo también tiene una tendencia exponencial más que lineal.

3.2.8. Análisis de regresión entre OMC y CBR

Por último en la figura 34 se muestra el análisis de regresión de la OMC con el CBR.

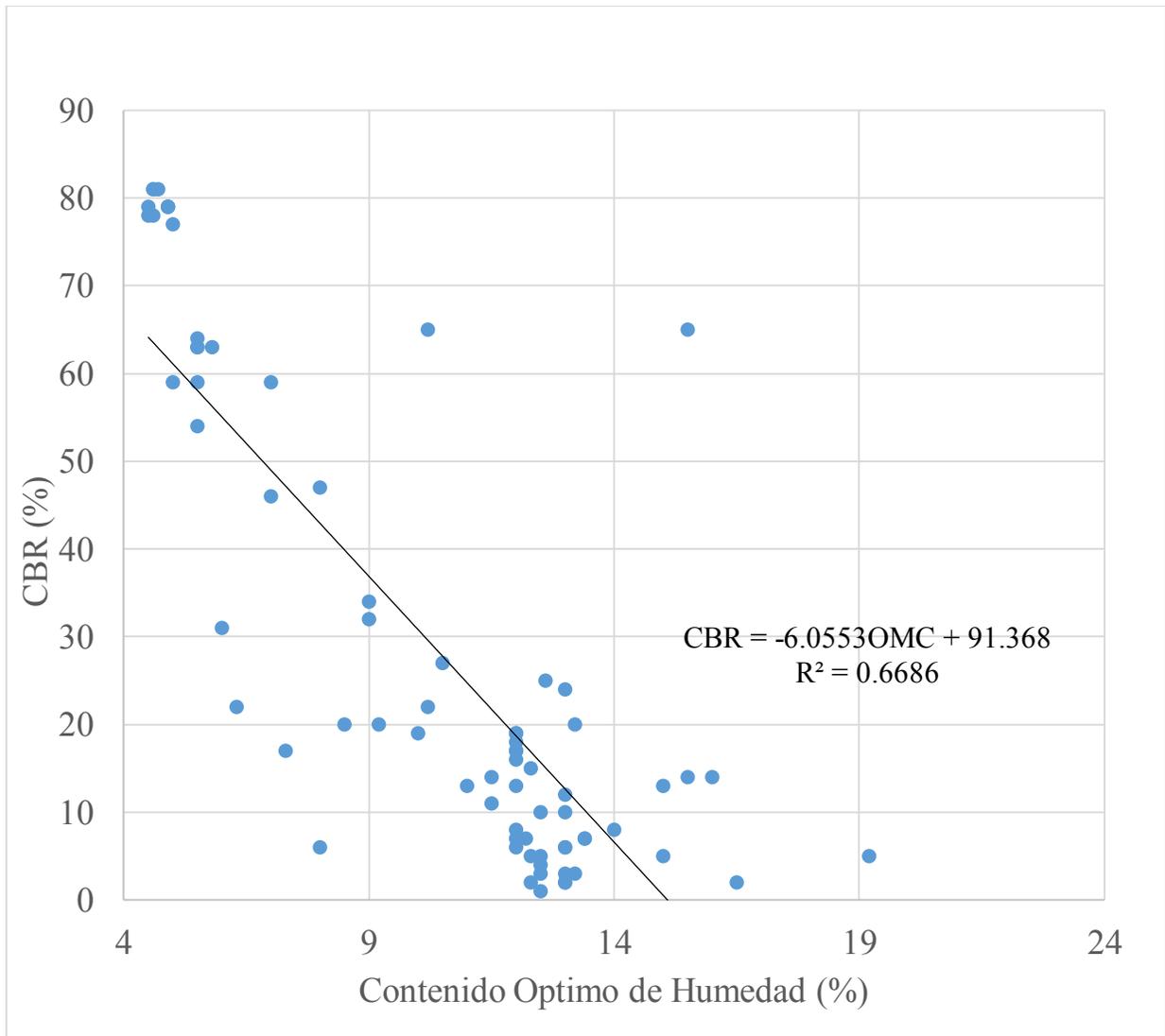


Figura 34. Análisis de regresión entre OMC y CBR

En esta investigación el óptimo contenido de humedad es el que mejor correlación tiene con el CBR ($R^2 = 0.67$). La tendencia es decreciente. Para valores de OMC entre 4.5 y 6 % se observa que el error es menor al 20% para suelos GW. No obstante cuando se analizan las zonas mayores al 6% de OMC, las arcillas nuevamente vuelven a tener el porcentaje de error más alto (mayor al 50%). (Ver apéndice J)

Las ecuaciones de correlación entre los índices de propiedad del suelo y el CBR mediante regresión lineal simple se resumen en la tabla 5.

Tabla 5. Ecuaciones de correlaciones y parámetros estadísticos obtenidos del ARLS

Modelo	Ecuación de correlación	R	R²
Modelo 1	$CBR = 0.8357G + 11.378$	0.84	0.70
Modelo 2	$CBR = -0.203S + 36.687$	0.12	0.02
Modelo 3	$CBR = -0.7854F + 60.185$	0.76	0.58
Modelo 4	$CBR = -1.5878LL + 73.734$	0.60	0.35
Modelo 5	$CBR = -2.7956LP + 80.146$	0.45	0.21
Modelo 6	$CBR = -1.7775IP + 46.502$	0.53	0.28
Modelo 7	$CBR = 103.34MDD - 174.71$	0.74	0.54
Modelo 8	$CBR = -6.0553OMC + 91.368$	0.81	0.66

Los parámetros estadísticos indican que el modelo 1 (G vs CBR) ofrece la mejor correlación lineal simple con un R de 0.84 y un R² de 0.70. Aunque se muestran valores de correlación buenos, los modelos no son los indicados para ciertos tipos de suelos como los arcillosos. Según el análisis realizado, las ecuaciones planteadas aplican más para suelos gravosos.

En orden decreciente de la mayor a la menor correlación de las que quedan tenemos al modelo 8 (OMC vs CBR), modelo 3 (F vs CBR), modelo 7 (MDD vs CBR), modelo 4 (LL vs CBR), modelo 6 (IP vs CBR), modelo 5 (LP vs CBR) y modelo 2 (S vs CBR), con un R de 0.81, 0.76, 0.74, 0.60, 0.53, 0.45 y 0.12 respectivamente, y valores de R² de 0.66, 0.58, 0.54, 0.35, 0.28, 0.21 y 0.02 respectivamente también.

A pesar de que se puede considerar que los modelos aplican a suelos gravosos, el error típico es muy alto en todos los modelos propuestos. Esto sería indicador de que la

regresión lineal no permite generar un modelo que se acerque suficientemente a los datos, dando pie a otra investigación aplicando probablemente un modelo de correlación exponencial.

3.3 Análisis de regresión lineal múltiple

En la tabla 6, ocho modelos con diferentes combinaciones de propiedades índices de los suelos con sus respectivos CBR de laboratorio para subrasantes de suelos de Piura fueron evaluados mediante el análisis de regresión múltiple con Microsoft Excel 2013. La base de datos fue de 75 muestras. A continuación también se muestran los parámetros estadísticos R y R².

Los resultados muestran que el mejor modelo según el R y R² es el modelo 7, donde se consideran todos los parámetros del suelo considerados para este estudio. Le sigue el modelo 6,5 y 4. Esto demuestra que cada uno de los parámetros es de importancia para el suelo. No obstante, se analizará la cercanía entre el CBR predicho con las ecuaciones del ARLM y el CBR experimental de la base de datos, para comprobar si el modelo 7 es el que mejor correlación guarda como lo muestra su coeficiente de determinación R.

Tabla 6. Ecuaciones de correlaciones y parámetros estadísticos obtenidos del ARLM

Modelo	Ecuación de correlación	R	R²
Modelo 1: G, OMC vs CBR	$CBR = 0.526G - 2.75OMC + 46.145$	0.862	0.743
Modelo 2: G, OMC, F vs CBR	$CBR = 0.452G - 1.972OMC - 0.222F + 48.583$	0.872	0.761
Modelo 3: G, OMC, F, MDD vs CBR	$CBR = 0.537G - 3.211OMC - 0.174F - 31.493MDD + 119.757$	0.876	0.768
Modelo 4: G, OMC, F, MDD, LL vs CBR	$CBR = 0.570G - 2.588OMC - 0.108F - 25.306MDD - 0.296LL + 105.940$	0.878	0.771
Modelo 5: G, OMC, F, MDD, LL, IP vs CBR	$CBR = 0.524G - 2.689OMC - 0.139F - 19.206MDD + 0.366LL - 0.746IP + 86.116$	0.880	0.775
Modelo 6: G, OMC, F, MDD, LL, IP, LP vs CBR	$CBR = 0.524G - 2.689OMC - 0.139F - 19.206MDD + 0.366LL - 0.746IP + 0LP + 86.116$	0.880	0.775
Modelo 7: G, OMC, F, MDD, LL, IP, LP, S vs CBR	$CBR = 0.681G - 2.917OMC + 0.032F - 17.991MDD + 0.510LL - 0.820IP + 0LP + 0.205S + 64.890$	0.881	0.776
Modelo 8: G, OMC, LP vs CBR	$CBR = 0.524G - 2.794OMC + 0.056LP + 45.657$	0.862	0.744

Se utilizaron las ecuaciones del ARLM para predecir el valor del CBR y compararlo con el CBR experimental de la base de datos del LEMC de la UDEP, generando el mejor

ajuste lineal y el encontrando el coeficiente de correlación entre ellos. (Figura 35 a la figura 42).

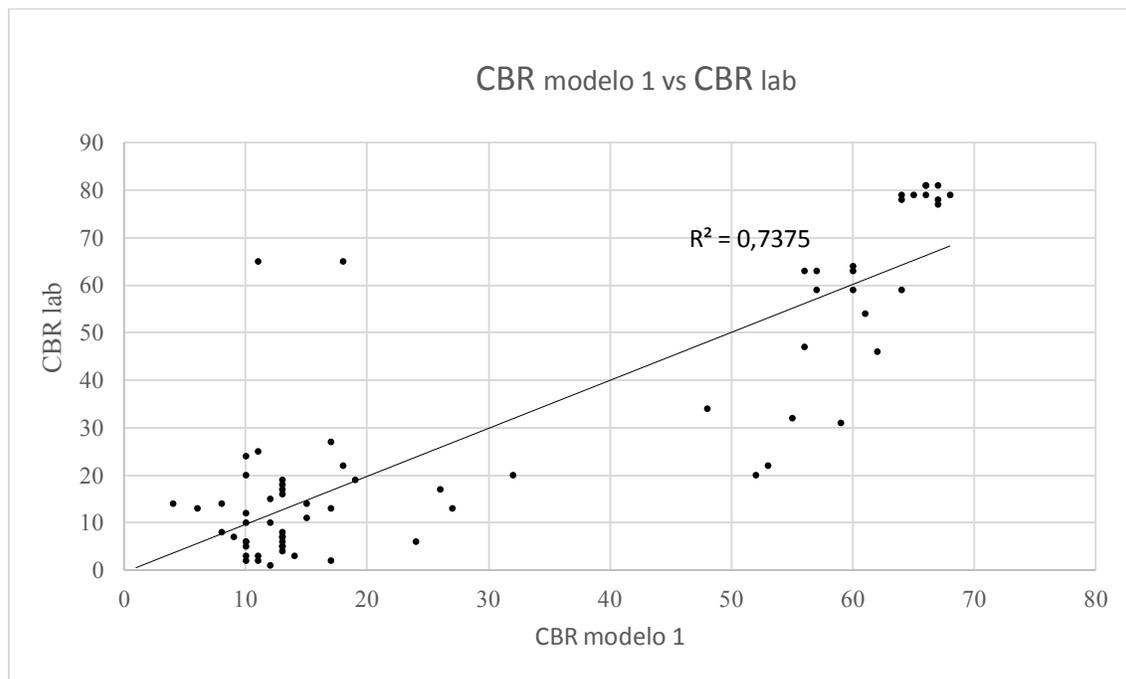


Figura 35. CBR modelo1 vs CBR lab

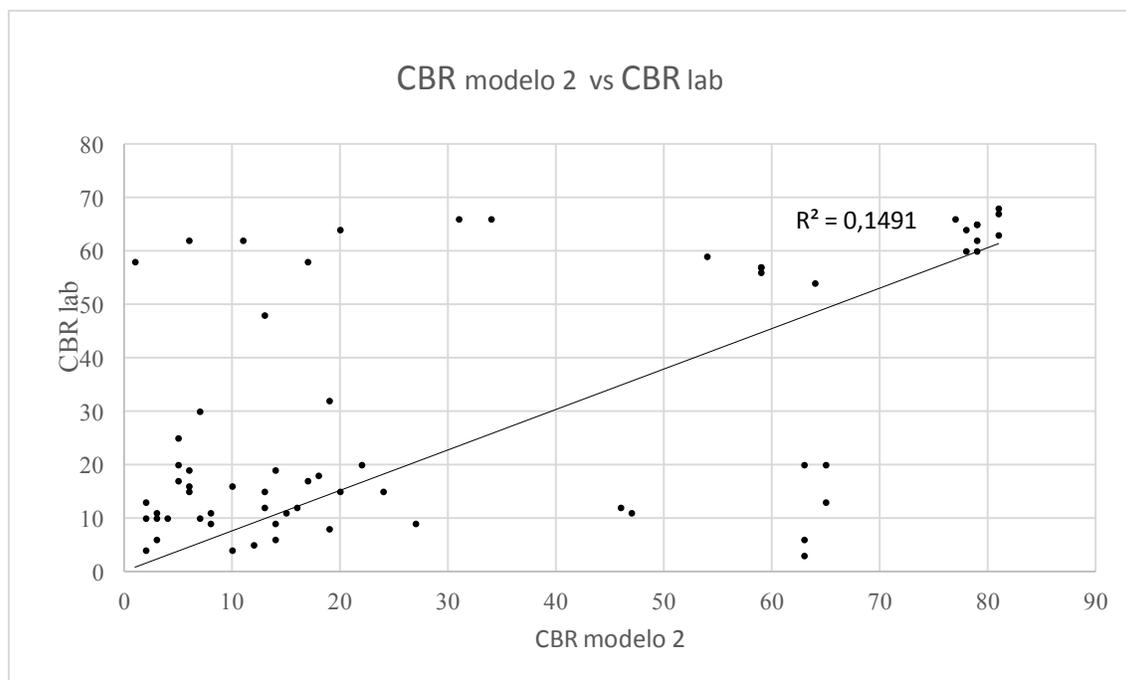


Figura 36. CBR modelo2 vs CBR lab

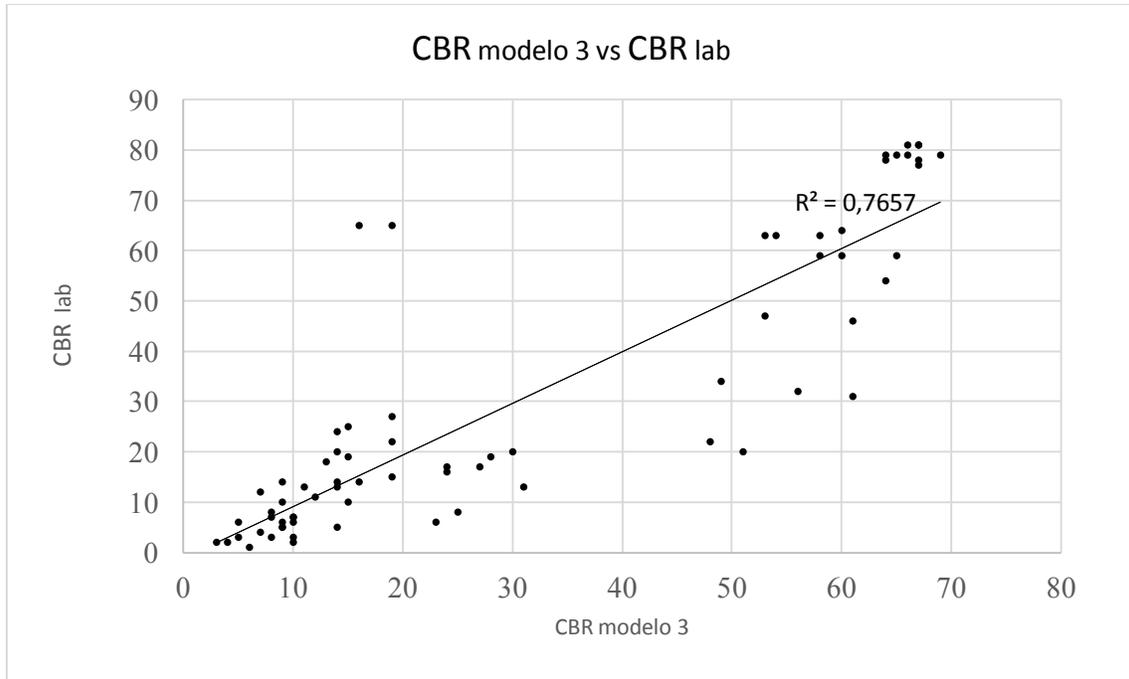


Figura 37. CBR modelo3 vs CBR lab

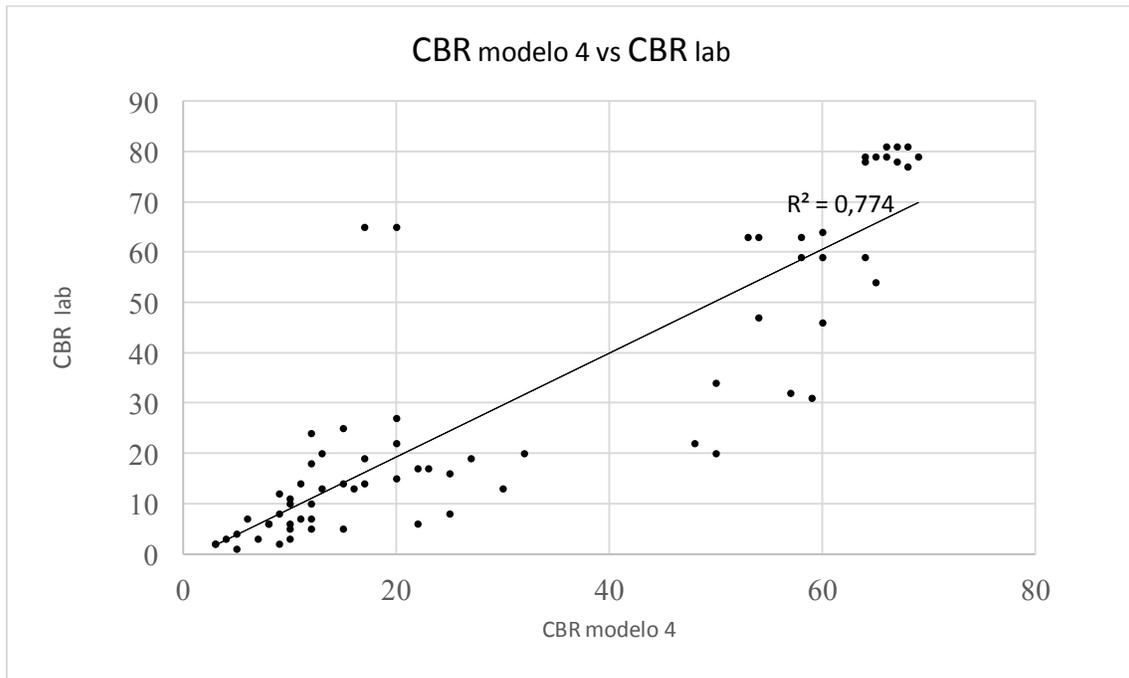


Figura 38. CBR modelo4 vs CBR lab

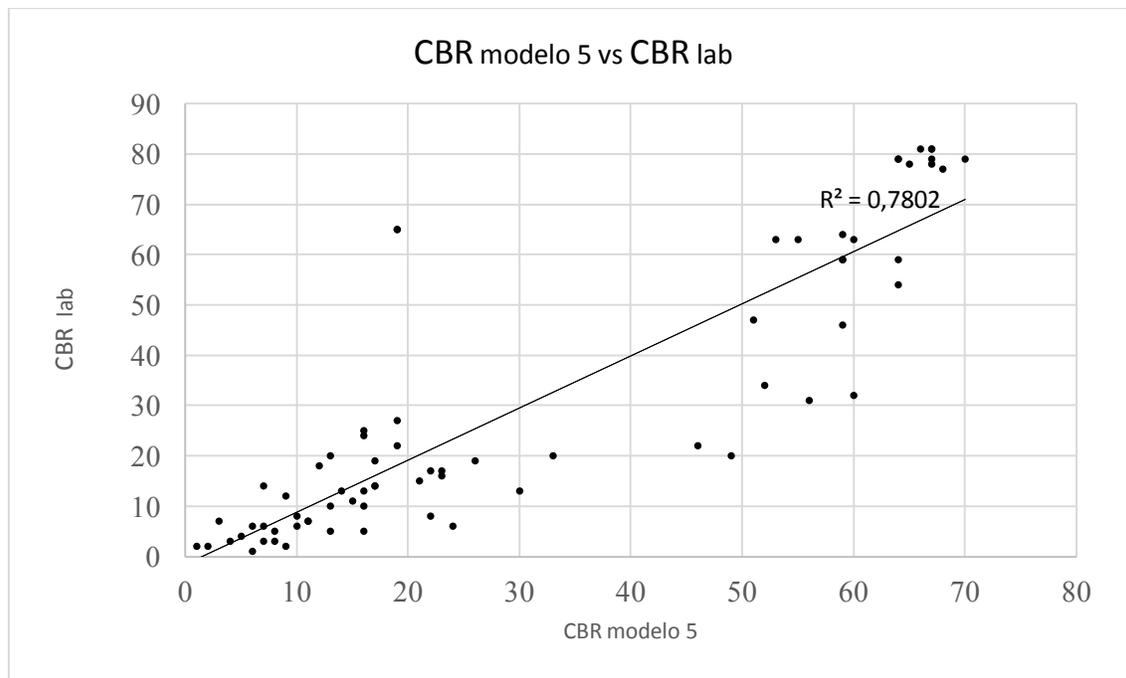


Figura 39. CBR modelo5 vs CBR lab

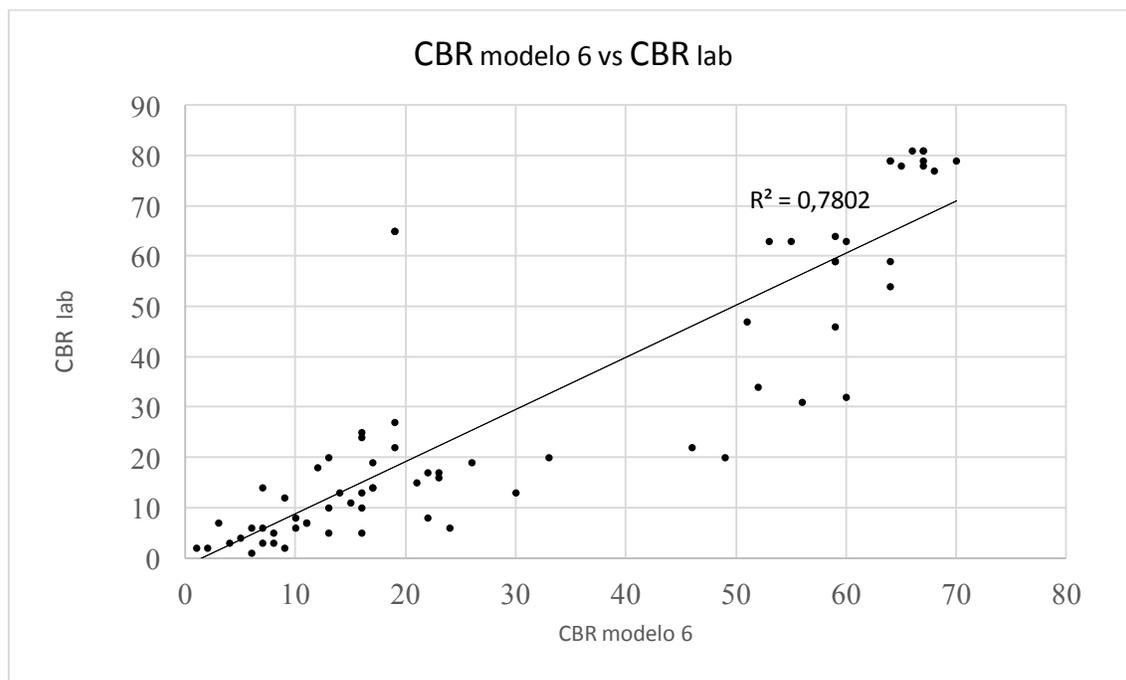


Figura 40. CBR modelo6 vs CBR lab

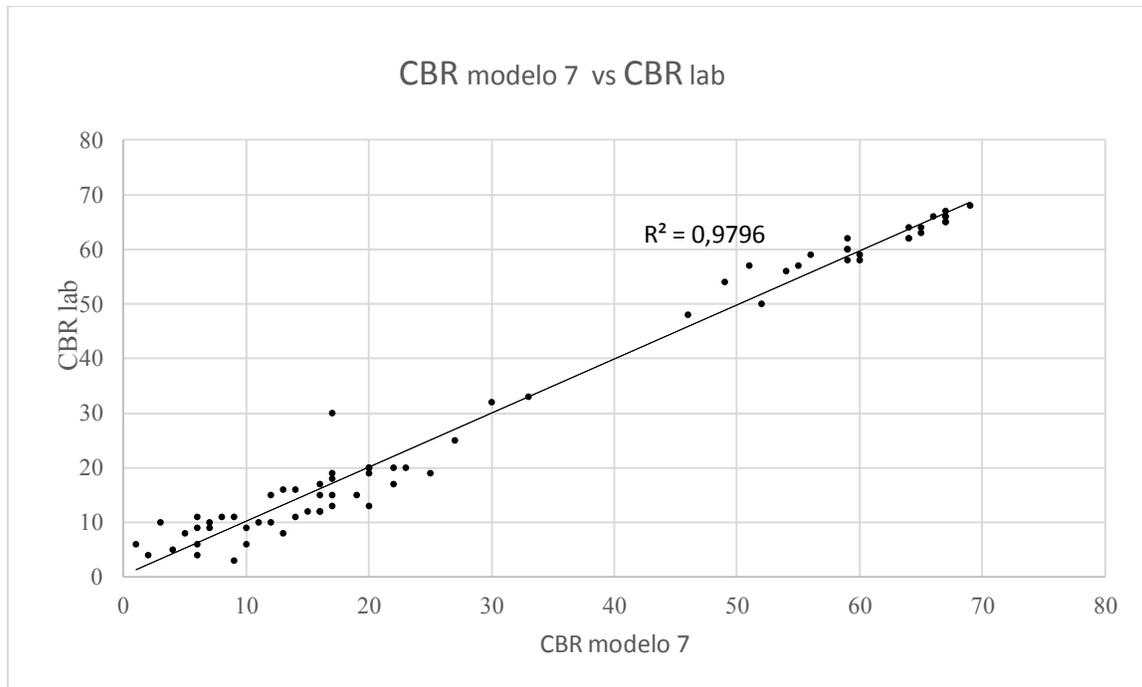


Figura 41. CBR modelo7 vs CBR lab

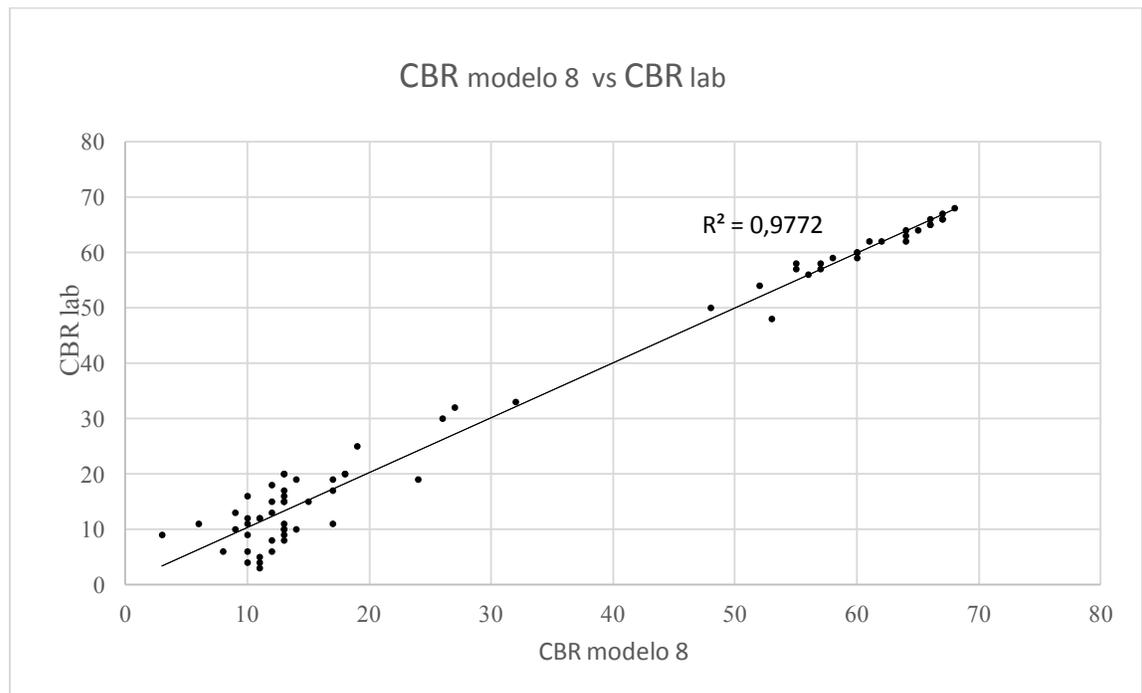


Figura 42 CBR modelo8 vs CBR lab

Al observar en las gráficas se puede ver que el menor error predicho se da en el modelo 7 donde el ajuste entre el valor del CBR experimental y el CBR predicho de la ecuación de ese modelo es bastante alto. ($R^2 = 0.9796$).

3.4 Validación de los modelos propuestos

Se analizó la varianza de medias entre los valores de CBR predichos de todos los modelos del ARLS y el valor de CBR experimental (Tabla 7) y se rechaza la hipótesis nula de que las medias de sus valores no varían mucho y la probabilidad es valor estadístico de F (coeficiente entre las varianzas) es menor que el 0.05 de nivel de significancia establecido. Por lo tanto, se puede considerar que los modelos propuestos de ARLS no son convenientes para la estimación de los valores.

Tabla7. ANOVA del ARLS y del ARLM

ANÁLISIS DE VARIANZA(ANOVA)				
	ARLS		ARLM	
Origen de las variaciones	Entre grupos	Dentro de los grupos	Entre grupos	Dentro de los grupos
Suma de cuadrados	16.56756757	230749.7162	68858.51833	105636.88
Grados de libertad	8	657	7	592
Promedio de los cuadrados	2.070945946	351.2172241	9836.93119	178.4406757
F	0.005896482	-	55.12717968	-
Probabilidad	0.999999987	-	1.38181E-60	-
Valor crítico para F	1.952479578	-	2.02503207	-

Lo mismo se aplicó para el modelo 7 del ARLM y el CBR experimental, cuyos resultados se muestran en la tabla 5. Se acepta la hipótesis nula de que las medias no difieren mucho. Con esto no sólo se confirma que el modelo 7 es adecuado para estimar los valores de CBR, sino que una correlación múltiple es mejor que una simple.

3.5 Análisis de modelos de correlación existentes

En la Tabla 8 se muestran los modelos de correlación en la literatura existente en comparación con el modelo de correlación múltiple propuesto en la presente investigación, con sus parámetros estadísticos (coeficiente de correlación (R) y el coeficiente de determinación (R^2), indicando también algunas consideraciones respecto a las ecuaciones planteadas.

Tabla 8. Cuadro comparativo de los modelos del ARLM propuestos por diferentes autores y la actual propuesta.

N ^o	Investigador	Consideraciones	Modelo	Parámetro estadístico
1	AASHTO (2002)	Suelos granulares con finos	$CBR = 75 / (1+0.728(P_{200} * IP))$	-
2	Patel y Desai(2010)	Suelos Finos	$CBR (lab) = 43.907 - 0.093 (IP) - 18.78 (MDD) - 0.3081(OMC)$	-
3	Saklecha et al (2011)	CBR= 1-70%	$CBR = 0.62 OMC + 58.9 MDD + 0.11 LL + 0.53 LP - 126.18$	R=0.80
4	Yildirim y Gunaydin (2011)	Suelos granulares y finos	$CBR = 0.22G + 0.045S + 4.739MDD + 0.122OMC$	R ² =0.88
5	Ramasubbarao (2013)	Suelos Finos CL, CH CBR=0.8-6%	$CBR (Lab) = 0.064F + 0.082S + 0.033G - 0.069LL + 0.157LP - 1.810MDD - 0.061OMC$	R ² =0.92
6	Kumar (2014)	Suelos Finos ML CBR=5-7%	$CBR (lab) = 0.127(LL) + 0.00 (LP) - 0.1598(PI) + 1.405(MDD) - 0.259(OMC) + 4.618$	-
7	Modelo propuesto (2014)	Todos los tipos de suelo	$CBR = 0.681G - 2.917OMC + 0.032F - 17.991MDD + 0.510LL - 0.820IP + 0LP + 0.205S + 64.890$	R=0.89

Como se puede ver, los valores de R² que presentan corresponde a la base de datos propia (se limita a un tipo de suelo y una región geográfica). Al introducir la base de datos de esta investigación en sus modelos (Figura 43) se observa que el error entre el CBR predicho y CBR experiencial fue alto en la mayoría de los modelos.

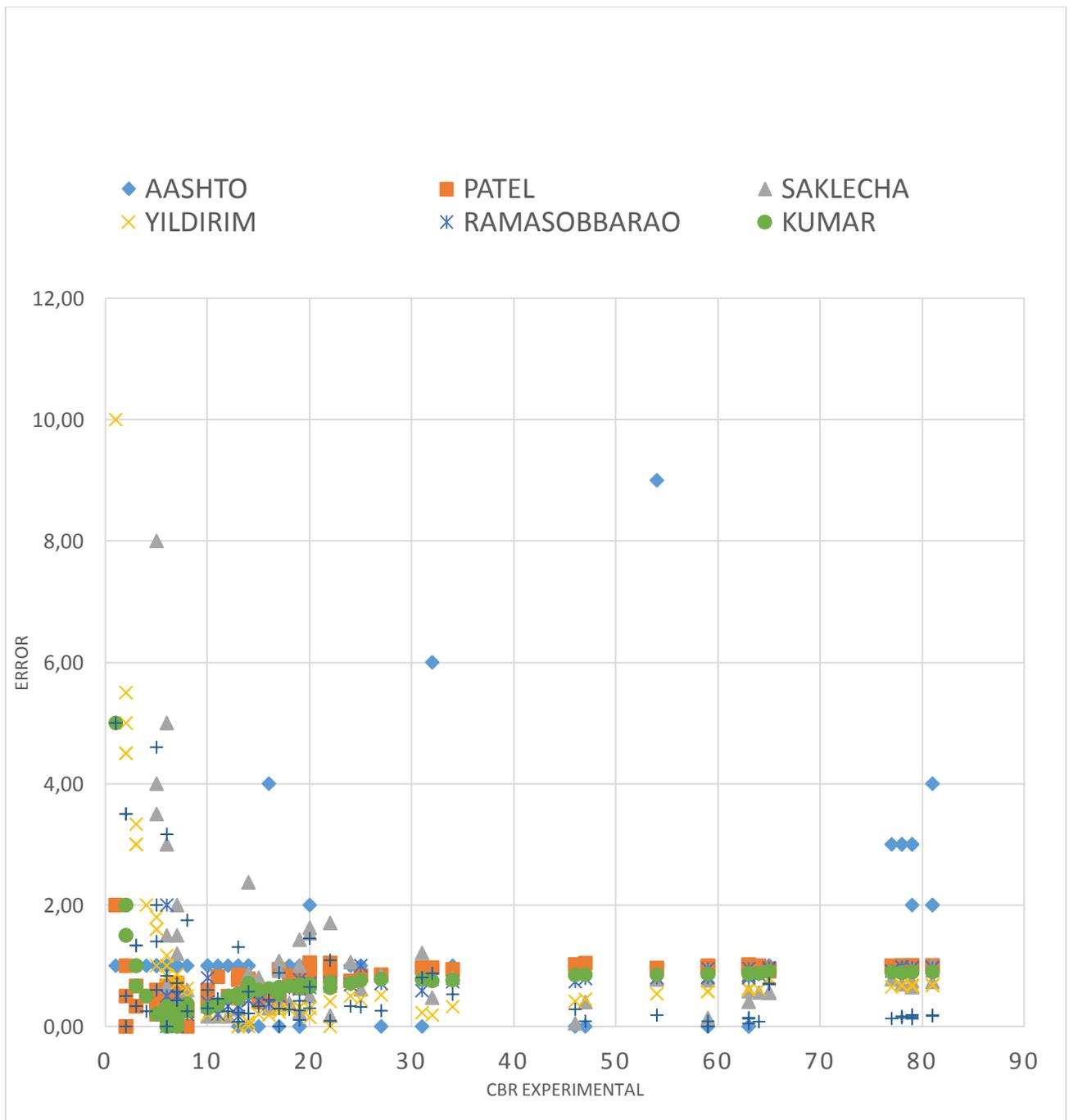


Figura 43. CBR lab vs CBR modelos existentes

En general, se puede observar que los errores más bajos se obtienen en esta investigación con el modelo 7, seguidos de la ecuación de Kumar. Por lo tanto se puede decir que el modelo propuesto es aceptable.

No obstante se considera que esta investigación no agota la posibilidad de proponer modelos de correlación más complejos. Se ha visto que un modelo lineal, simple o múltiple tendrá muchas limitaciones y corresponde desarrollar modelos de correlación no lineales, atendiendo a la relación no lineal de los parámetros evaluados.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES:

1. La relación entre el CBR y los parámetros físicos de los suelos no es siempre del tipo lineal. En algunos casos, la relación es potencial o exponencial, según el parámetro de que se trate (%F, LL, LP, IP).
2. Los parámetros más influyente en el CBR son el %G, OMC, %F, MDD, LL como lo muestran sus R de 0.84, 0.81, 0.76, 0.74, 0.60 respectivamente.
3. Los menos influyentes son el IP, LP, %S con un R de 0.53, 0.45 y 0.12 respectivamente.
4. El CBR no depende de un único parámetro, sino de la combinación de varios de ellos, especialmente en determinados rangos de valores. Esto propone dos condiciones: que una correlación múltiple siempre reflejará mejor el valor del CBR que una correlación simple y que las correlaciones deben plantearse por tipo de suelo.
5. En esta investigación el modelo 7 del ARLM que considera todo los parámetros del suelo (%G, OMC, %F, MDD, LL, IP, LP, %S) fue el que mejor correlación arroja (R=0.881).

RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES:

Se sugiere ampliar la base de datos para desarrollar uno o varios modelos de correlación más complejos entre los parámetros de suelo y el CBR, tomando en cuenta la relación entre estos parámetros, su influencia en el comportamiento del suelo y el tipo y naturaleza del suelo.

BIBLIOGRAFÍA

1. AASHTO (2003). Standard method of test for California bearing ratio. AASHTO T 193-99.
2. AASHTO (2009). Standard method of test for California bearing ratio of laboratory compacted soils. ASTM D1883-07.
3. BAHABRA, O, ASI, I., AL- ABDUL, H y KHAN, Z. (2002) Clegg Hammer California Beating Ratio Correlations. Journal of materials in civil engineering. PP 512-523.
4. BAÑÓN, L. (1999). Capítulo 2. Propiedades de los suelos y su determinación. Suelos. Infraestructura.
5. BREYTENBACH, (2009) I. The relationship between index testing and California Bearing Ratio values for natural road construction material in South Africa. University of Pretoria.
6. CHANG, Luis. Universidad Nacional de Ingeniería. CBR (California Bearing Ratio). CISMID.
7. CHOTTOPADHYAY, B y T. DATTA. (2011). Correlation between CBR and index properties of soil. Proceedings of Indian Geotechnical Conference. Paper N° A-350.
8. CHOTTOPADHYAY, B, ROY T. y ROY S. (2010). California Bearing Ratio, evaluation and estimation: a study on comparisons. Indian Geotechnical Conference.
9. KHRISNA, K (2013). Correlation between California Bearing Ratio and shear strength on artificially prepared solids with varying plastic index. *International journal of civil engineering and technology*. Vol. 4, N°.6pp. 61-66.

10. KUMAR TALUKDAR, D. (2014.) A study of correlation between California Bearing Ratio Value (CBR) with other properties of soil. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. Vol. 04, Issue 1.
11. MINAYA, S. y ORDÓÑEZ, A. (2001) Universidad Nacional de Ingeniería. Laboratorio N°2 de Mecánica de Suelos y Pavimentos. Manual de Laboratorio Ensayos para pavimentos. Vol I. Lima.
12. NUGROHO, S, HENDRY, A. NINGSIH, R. (2012) Correlation between index properties and California bearing ratio test of Pekanbaru soils with and without soaked. *Canadian Journal on Environmental, Construction and Civil Engineering*. Vol. 3, N°1.
13. OJEDA, S. (s/f) Determinación ensayo capacidad de soporte del suelo. (CBR).
14. PATEL, M. (2012). Correlation between physical properties and California Bearing Ratio test on soils of Gujarat Region in both soak and unsoak condition. *International journal of civil engineering and technology*. Vol. 3, N°2. pp. 50-59.
15. UNI. (2006). Primer taller de mecánica de suelos. California Bearing Ratio. Universidad Nacional de Ingeniería.
16. PRASAD, S. (s/f). Index properties of soil. College of Engineering, Mysore.
17. RASHMI, P y M. DESAI. (2010). CBR Predicted by index properties for alluvial soils of South Gujarat. Indian Geotechnical Conference.
18. RAMASUBBARAO, G y G. SIVA. (2013). Predicting soaked CBR value of fine grained soils using index and compaction characteristics. *Jordan Journal of Civil Engineering*. Vol. 7, N°3.
19. SANCHEZ, F. (2010). Institución Nacional de Vías. Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras. Análisis de una fórmula incluida en la guía AASHTO 2002 para obtener el CBR a partir de las propiedades índices de los suelos. Anexo H.
20. SANCHEZ, F. (2012, 9 de abril). Blog de conceptos y aplicaciones de la tecnología Ramcones en suelos y mezclas asfálticas. Tres formas de diseñar un suelo compactado, ventajas y desventajas. Disponible en:
<http://blogramcodes.blogspot.com/2012/04/tres-formas-de-disenar-un-suelo.html>
21. TASKIRAN, T. (2010). Prediction of California bearing ratio (CBR) of fine grained soils by AI methods. Science Direct.

22. WHITLOW, R. (2000) Fundamentos de la mecánica de suelos. (2°ed.) CECSA. México, 1994

APÉNDICE A
BASE DE DATOS EMPLEADA EN LA INVESTIGACIÓN

G, S, F, LL, LP, IP, MDD, OMC vs CBR(lab)												
M	LOCALIDAD	G	S	F	LL	LP	IP	MDD	OMC	CBR	AASHTO	SUCS
1	TERMINAL TERRESTRE DE PIURA	63	30	7	24	22	2	2.13	9	32	A-1-a (0)	GW
2	TERMINAL TERRESTRE DE PIURA	0	31	69	26	17	9	1.86	12.2	7	A-4 (4)	ML
3	TERMINAL TERRESTRE DE PIURA	0	64	36	22	15	7	1.95	10.2	22	A-4 (0)	ML
4	TERMINAL TERRESTRE DE PIURA	0	20	80	42	22	20	1.89	12.5	1	A-7-6 (16)	CH
5	TERMINAL TERRESTRE DE PIURA	0	60	40	21	16	5	1.92	10.5	27	A-4 (0)	ML
6	TERMINAL TERRESTRE DE PIURA	10	36	54	30	22	8	1.71	15	5	A-4 (2)	ML
7	TERMINAL TERRESTRE DE PIURA	0	37	63	31	16	15	1.82	13	3	A-6 (7)	CL
8	TERMINAL TERRESTRE DE PIURA	0	58	42	24	14	10	1.71	15.5	14	A-4 (1)	ML
9	TERMINAL TERRESTRE DE PIURA	0	80	20	15	14	1	1.7	12	16	A-2-4 (0)	SM
10	TERMINAL TERRESTRE DE PIURA	12	46	42	30	24	6	1.7	16	14	A-4 (0)	ML
11	TERMINAL TERRESTRE DE PIURA	0	77	23	19	14	5	1.67	12	8	A-2-4 (0)	SM
12	CARRETERA MORROPON - PALTASHACO	56	30	14	21	17	4	2.24	5.8	63	A-1-a (0)	GW
13	PAVI DE TERMINAL TERRESTRE DE PIURA	0	64	36	22	15	7	1.95	10.2	65	A-4 (0)	ML
14	PAVI DE TERMINAL TERRESTRE DE PIURA	15	40	45	31	24	7	1.71	15.5	65	A-4 (1)	ML
15	AA. HH. LOS JARDINES	57	34	9	16	15	1	2.12	5.5	54	A-1-a(0)	GW
16	CANTERA LA VIÑA	46	14	40	27	15	12	2.21	6.3	22	A-6(1)	CL
17	HOME CENTER PIURA	0	15	85	29	19	10	1.85	13	6	A-6(7)	CL
18	MAERSK -PAITA	0	46	49	36	25	11	1.98	11.5	11	A-6(3)	SC
19	MAERSK -PAITA	2	56	42	24	21	3	1.73	15	13	A-4(0)	SM
20	MAERSK -PAITA	0	46	49	36	25	11	1.74	13	10	A-6(3)	SC
21	MAERSK -PAITA	0	46	49	36	25	11	1.75	13	24	A-6(3)	SC
22	MAERSK -PAITA	60	25	15	24	13	11	2.25	8	47	A-2-6(0)	GC
23	MAERSK -PAITA	66	23	11	26	15	11	2.22	7	46	A-2-6(0)	SC
24	MAERSK -PAITA	27	52	21	31	18	13	1.93	12	13	A-6(0)	CL
25	AA. HH. LOS JARDINES	57	32	11	22	18	4	2.17	7	59	A-1-b(0)	GM
26	AA. HH. LOS JARDINES	0	40	60	28	21	7	1.93	8	6	A-4(0)	CL-ML
27	CLÍNICA UNIVERSITARIA UDEP	0	57	43	20	17	3	1.87	12	19	A-4(0)	SM
28	AA. HH. LOS JARDINES	0	39	17	34	16	18	2.1	7.3	17	A-2-6(0)	SC
29	CARRETERA Km 21 TAMBOGRANDE	0	5	95	75	26	49	1.62	19.2	5	A-7-6(20)	CH
30	TERMINAL TERRESTRE DE PIURA	0	72	28	27	17	10	1.87	13.2	20	A-2-4(0)	SM
31	URBANIZACION LAS CASUARINAS - I ETAPA	0	43	57	39	15	24	1.87	13.4	7	A-6(10)	CL
32	URBANIZACION LAS CASUARINAS - II ETAPA	0	73	27	28	19	9	1.88	12.6	25	A-2-4(0)	SM
33	PAVI DE TERMINAL TERRESTRE DE PIURA	0	47	53	35	16	19	1.91	13	6	A-6(7)	CL
34	FRANJA CENTRAL DE LA CIUDAD DE PIURA	0	55	45	28	17	11	2	12	7	A-2-6(6)	SC

APÉNDICE A
BASE DE DATOS EMPLEADA EN LA INVESTIGACIÓN (CONTINUACIÓN)

35	FRANJA CENTRAL DE LA CIUDAD DE PIURA	0	58	42	31	17	14	1.93	12	18	A-2-6(13)	SC
36	URBANIZACION LAS CASUARINAS - I ETAPA	0	49	51	22	20	2	1.66	12.3	15	A-4(0)	ML
37	URBANIZACION LAS CASUARINAS - I ETAPA	2	49	49	24	17	7	2	11	13	A-2-5(0)	SC-SM
38	URBANIZACION LAS CASUARINAS - I ETAPA	0	30	70	28	23	5	1.87	12.5	10	A-6(2)	CL-ML
39	URBANIZACION LAS CASUARINAS - I ETAPA	0	23	77	39	17	22	1.95	13	2	A-6(16)	CL
40	URBANIZACION LAS CASUARINAS - I ETAPA	0	64	36	23	17	6	1.62	12	17	A-2-4(0)	SM
41	TIENDAS MAESTRO HOME CENTER - TRUJILLO	0	83	17	20	15	5	1.8	10	19	A-2-5(0)	SC-SM
42	URBANIZACION LAS CASUARINAS - II ETAPA	0	70	30	21	15	6	1.96	11.5	14	A-2-5(0)	SC-SM
43	URBANIZACION LAS CASUARINAS - II ETAPA	2	32	66	32	17	15	1.93	12.3	5	A-6(8)	CL
44	URBANIZACION LAS CASUARINAS - II ETAPA	3	28	69	26	20	6	1.92	12.5	5	A-4(2)	CL-ML
45	URBANIZACION LAS CASUARINAS - II ETAPA	0	33	67	33	20	13	1.9	12	6	A-6(7)	CL
46	URBANIZACION LAS CASUARINAS - II ETAPA	5	20	75	41	20	21	1.95	12.5	3	A-6(15)	CL
47	URBANIZACION LAS CASUARINAS - II ETAPA	1	11	88	44	21	23	1.88	13	2	A-6(21)	CL
48	URBANIZACION LAS CASUARINAS - II ETAPA	3	18	79	43	20	23	1.92	12.5	4	A-6(18)	CL
49	URBANIZACION LAS CASUARINAS - II ETAPA	2	17	81	43	21	22	1.88	13.2	3	A-6(18)	CL
50	URBANIZACION LAS CASUARINAS - II ETAPA	8	16	76	43	21	22	1.94	12.3	2	A-6(16)	CL
51	CARRETERA Km 21 TAMBOGRANDE	0	2	98	37	22	15	1.78	16.5	2	A-6(16)	CL
52	CARRETERA Km 21 TAMBOGRANDE	0	11	89	32	22	10	1.76	13	12	A-6(9)	CL
53	CARRETERA Km 21 TAMBOGRANDE	0	33	67	30	22	8	1.76	14	8	A-6(4)	CL
54	EPC ETANOL-CANTERA RAMSA	60	25	15	33	17	16	2.18	9.2	20	A-2-6(0)	SC
55	109 Km 50 - CHULUCANAS	50	35	15	21	15	6	2.29	5.5	63	A-1-b(0)	GM
56	109 Km 50 - CHULUCANAS	48	36	16	21	15	6	2.29	5.5	63	A-1-b(0)	GM
57	109 Km 50 - CHULUCANAS	55	34	11	19	14	5	2.21	5.5	64	A-1-a(0)	GW
58	109 Km 50 - CHULUCANAS	56	29	15	22	15	7	2.21	5.5	59	A-2-4(0)	SM
59	109 Km 50 - CHULUCANAS	60	24	16	23	16	7	2.15	5	59	A-2-4(0)	SM
60	CARRETERA MORROPÓN-CHALACO- PACAIPAMPA	58	32	10	18	15	3	2.24	4.5	79	A-1-a(0)	GW
61	CARRETERA MORROPÓN-CHALACO- PACAIPAMPA	58	31	11	18	16	2	2.23	4.5	78	A-1-a(0)	GW
62	CARRETERA MORROPÓN-CHALACO- PACAIPAMPA	63	28	9	19	16	3	2.23	4.9	79	A-1-a(0)	GW
63	CARRETERA MORROPÓN-CHALACO- PACAIPAMPA	63	28	8	19	16	3	2.24	4.6	78	A-1-a(0)	GW
64	CARRETERA MORROPÓN-CHALACO- PACAIPAMPA	62	28	10	19	16	3	2.22	4.7	81	A-1-a(0)	GW
65	CARRETERA MORROPÓN-CHALACO- PACAIPAMPA	68	24	8	19	16	3	2.22	4.9	79	A-1-a(0)	GW
66	CARRETERA MORROPÓN-CHALACO- PACAIPAMPA	66	25	9	18	15	3	2.23	5	77	A-1-a(0)	GW
67	CARRETERA MORROPÓN-CHALACO- PACAIPAMPA	61	29	10	18	14	4	2.22	4.9	79	A-1-a(0)	GW
68	CARRETERA MORROPÓN-CHALACO- PACAIPAMPA	63	27	10	17	15	2	2.22	4.6	81	A-1-a(0)	GW
69	CARRETERA MORROPÓN-CHALACO- PACAIPAMPA	62	29	9	19	15	4	2.22	4.6	81	A-1-a(0)	GW
70	ETANOL-PAITA PIURA	17	52	31	16	15	1	2.1	8.5	20	A-2-4(0)	SM
71	109 Km 50 - CHULUCANAS	55	34	11	27	13	14	2.13	6	31	A-2-6 (0)	SC
72	109 Km 50 - CHULUCANAS	50	34	16	24	20	4	2.08	9	34	A-1-b (0)	GM
73	PECHUQUIS-AYABACA	0	52	48	48	25	23	1.87	12	19	A-2-4(20)	SM
74	PECHUQUIS-AYABACA	0	63	37	38	35	3	1.62	12	17	A-2-4(0)	SM
75	HUACHARI-CHALACO	0	41	59	51	29	22	1.87	13.4	7	A-5(11)	MH

APÉNDICE B
ERROR MEDIDO DEL MODELO 1 DEL ARLS

MUESTRA	G(%)	CBR(%)	AASHTO	SUCS	CBR pred	Error medido
1	0	7	A-4 (4)	ML	11	0.57
2	0	22	A-4 (0)	ML	11	0.50
3	0	1	A-7-6 (16)	CH	11	10.00
4	0	27	A-4 (0)	ML	11	0.59
5	0	3	A-6 (7)	CL	11	2.67
6	0	14	A-4 (1)	ML	11	0.21
7	0	16	A-2-4 (0)	SM	11	0.31
8	0	8	A-2-4 (0)	SM	11	0.38
9	0	65	A-4 (0)	ML	11	0.83
10	0	6	A-6(7)	CL	11	0.83
11	0	11	A-6(3)	SC	11	0.00
12	0	10	A-6(3)	SC	11	0.10
13	0	24	A-6(3)	SC	11	0.54
14	0	6	A-4(0)	CL-ML	11	0.83
15	0	19	A-4(0)	SM	11	0.42
16	0	17	A-2-6(0)	SC	11	0.35
17	0	5	A-7-6(20)	CH	11	1.20
18	0	20	A-2-4(0)	SM	11	0.45
19	0	7	A-6(10)	CL	11	0.57
20	0	25	A-2-4(0)	SM	11	0.56
21	0	6	A-6(7)	CL	11	0.83
22	0	7	A-2-6(6)	SC	11	0.57
23	0	18	A-2-6(13)	SC	11	0.39
24	0	15	A-4(0)	ML	11	0.27
25	0	10	A-6(2)	CL-ML	11	0.10
26	0	2	A-6(16)	CL	11	4.50
27	0	17	A-2-4(0)	SM	11	0.35
28	0	19	A-2-5(0)	SC-SM	11	0.42
29	0	14	A-2-5(0)	SC-SM	11	0.21
30	0	6	A-6(7)	CL	11	0.83
31	0	2	A-6(16)	CL	11	4.50
32	0	12	A-6(9)	CL	11	0.08
33	0	8	A-6(4)	CL	11	0.38
34	0	19	A-2-4(20)	SM	11	0.42
35	0	17	A-2-4(0)	SM	11	0.35
36	0	7	A-5(11)	MH	11	0.57
37	1	2	A-6(21)	CL	12	5.00
38	2	13	A-4(0)	SM	13	0.00
39	2	13	A-2-5(0)	SC-SM	13	0.00
40	2	5	A-6(8)	CL	13	1.60
41	2	3	A-6(18)	CL	13	3.33
42	3	5	A-4(2)	CL-ML	14	1.80
43	3	4	A-6(18)	CL	14	2.50
44	5	3	A-6(15)	CL	16	4.33
45	8	2	A-6(16)	CL	18	8.00
46	10	5	A-4 (2)	ML	20	3.00
47	12	14	A-4 (0)	ML	21	0.50
48	15	65	A-4 (1)	ML	24	0.63
49	17	20	A-2-4(0)	SM	26	0.30
50	27	13	A-6(0)	CL	34	1.62
51	46	22	A-6(1)	CL	50	1.27
52	48	63	A-1-b(0)	GM	51	0.19
53	50	63	A-1-b(0)	GM	53	0.16
54	50	34	A-1-b (0)	GM	53	0.56
55	55	64	A-1-a(0)	GW	57	0.11
56	55	31	A-2-6 (0)	GC	57	0.84
57	56	63	A-1-a (0)	GW	58	0.08
58	56	59	A-1-b(0)	GM	58	0.02
59	57	54	A-1-a(0)	GW	59	0.09
60	57	59	A-1-b(0)	GM	59	0.00
61	58	79	A-1-a(0)	GW	60	0.24
62	58	78	A-1-a(0)	GW	60	0.23
63	60	47	A-2-6(0)	GC	62	0.32
64	60	20	A-2-6(0)	GC	62	2.10
65	60	59	A-1-b(0)	GM	62	0.05
66	61	79	A-1-a(0)	GW	62	0.22
67	62	81	A-1-a(0)	GW	63	0.22
68	62	81	A-1-a(0)	GW	63	0.22
69	63	32	A-1-a (0)	GW	64	1.00
70	63	79	A-1-a(0)	GW	64	0.19
71	63	78	A-1-a(0)	GW	64	0.18
72	63	81	A-1-a(0)	GW	64	0.21
73	66	46	A-2-6(0)	GC	67	0.46
74	66	77	A-1-a(0)	GW	67	0.13
75	68	79	A-1-a(0)	GW	68	0.14

APÉNDICE C
ERROR MEDIDO DEL MODELO 2 DEL ARLS

MUESTRA	S(%)	CBR(%)	AASHTO	SUCS	CBR pred	Error medido
1	2	2	A-6(16)	CL	36	17.00
2	5	5	A-7-6(20)	CH	36	6.20
3	11	2	A-6(21)	CL	34	16.00
4	11	12	A-6(9)	CL	34	1.83
5	14	22	A-6(1)	CL	34	0.55
6	15	6	A-6(7)	CL	34	4.67
7	16	2	A-6(16)	CL	33	15.50
8	17	3	A-6(18)	CL	33	10.00
9	18	4	A-6(18)	CL	33	7.25
10	20	1	A-7-6 (16)	CH	33	32.00
11	20	3	A-6(15)	CL	33	10.00
12	23	46	A-2-6(0)	GC	32	0.30
13	23	2	A-6(16)	CL	32	15.00
14	24	59	A-1-b(0)	GM	32	0.46
15	24	79	A-1-a(0)	GW	32	0.59
16	25	47	A-2-6(0)	GC	32	0.32
17	25	20	A-2-6(0)	GC	32	0.60
18	25	77	A-1-a(0)	GW	32	0.58
19	27	81	A-1-a(0)	GW	31	0.62
20	28	5	A-4(2)	CL-ML	31	5.20
21	28	79	A-1-a(0)	GW	31	0.61
22	28	78	A-1-a(0)	GW	31	0.60
23	28	81	A-1-a(0)	GW	31	0.62
24	29	59	A-1-b(0)	GM	31	0.47
25	29	79	A-1-a(0)	GW	31	0.61
26	29	81	A-1-a(0)	GW	31	0.62
27	30	32	A-1-a (0)	GW	31	0.03
28	30	63	A-1-a (0)	GW	31	0.51
29	30	10	A-6(2)	CL-ML	31	2.10
30	31	7	A-4 (4)	ML	30	3.29
31	31	78	A-1-a(0)	GW	30	0.62
32	32	59	A-1-b(0)	GM	30	0.49
33	32	5	A-6(8)	CL	30	5.00
34	32	79	A-1-a(0)	GW	30	0.62
35	33	6	A-6(7)	CL	30	4.00
36	33	8	A-6(4)	CL	30	2.75
37	34	54	A-1-a(0)	GW	30	0.44
38	34	64	A-1-a(0)	GW	30	0.53
39	34	31	A-2-6 (0)	GC	30	0.03
40	34	34	A-1-b (0)	GM	30	0.12
41	35	63	A-1-b(0)	GM	30	0.52
42	36	5	A-4 (2)	ML	29	4.80
43	36	63	A-1-b(0)	GM	29	0.54
44	37	3	A-6 (7)	CL	29	8.67
45	39	17	A-2-6(0)	SC	29	0.71
46	40	65	A-4 (1)	ML	29	0.55
47	40	6	A-4(0)	CL-ML	29	3.83
48	41	7	A-5(11)	MH	28	3.00
49	43	7	A-6(10)	CL	28	3.00
50	46	14	A-4 (0)	ML	27	0.93
51	46	11	A-6(3)	SC	27	1.45
52	46	10	A-6(3)	SC	27	1.70
53	46	24	A-6(3)	SC	27	0.13
54	47	6	A-6(7)	CL	27	3.50
55	49	15	A-4(0)	ML	27	0.80
56	49	13	A-2-5(0)	SC-SM	27	1.08
57	52	13	A-6(0)	CL	26	1.00
58	52	20	A-2-4(0)	SM	26	0.30
59	52	19	A-2-4(20)	SM	26	0.37
60	55	7	A-2-6(6)	SC	26	2.71
61	56	13	A-4(0)	SM	25	0.92
62	57	19	A-4(0)	SM	25	0.32
63	58	14	A-4 (1)	ML	25	0.79
64	58	18	A-2-6(13)	SC	25	0.39
65	60	27	A-4 (0)	ML	25	0.07
66	63	17	A-2-4(0)	SM	24	0.41
67	64	22	A-4 (0)	ML	24	0.09
68	64	65	A-4 (0)	ML	24	0.63
69	64	17	A-2-4(0)	SM	24	0.41
70	70	14	A-2-5(0)	SC-SM	22	0.57
71	72	20	A-2-4(0)	SM	22	0.10
72	73	25	A-2-4(0)	SM	22	0.12
73	77	8	A-2-4 (0)	SM	21	1.63
74	80	16	A-2-4 (0)	SM	20	0.25
75	83	19	A-2-5(0)	SC-SM	20	0.05

APÉNDICE D
ERROR MEDIDO DEL MODELO 3 DEL ARLS

MUESTRA	F(%)	CBR(%)	AASHTO	SUCS	CBR pred	Error medido
1	7	32	A-1-a (0)	GW	35	0.09
2	8	78	A-1-a(0)	GW	-1	1.01
3	8	79	A-1-a(0)	GW	-2	1.03
4	9	54	A-1-a(0)	GW	18	0.67
5	9	79	A-1-a(0)	GW	-2	1.03
6	9	77	A-1-a(0)	GW	0	1.00
7	9	81	A-1-a(0)	GW	-3	1.04
8	10	79	A-1-a(0)	GW	-2	1.03
9	10	81	A-1-a(0)	GW	-3	1.04
10	10	79	A-1-a(0)	GW	-2	1.03
11	10	81	A-1-a(0)	GW	-3	1.04
12	11	46	A-2-6(0)	GC	24	0.48
13	11	59	A-1-b(0)	GM	14	0.76
14	11	64	A-1-a(0)	GW	10	0.84
15	11	78	A-1-a(0)	GW	-1	1.01
16	11	31	A-2-6 (0)	GC	36	0.16
17	14	63	A-1-a (0)	GW	11	0.83
18	15	47	A-2-6(0)	GC	23	0.51
19	15	20	A-2-6(0)	GC	44	1.20
20	15	63	A-1-b(0)	GM	11	0.83
21	15	59	A-1-b(0)	GM	14	0.76
22	16	63	A-1-b(0)	GM	11	0.83
23	16	59	A-1-b(0)	GM	14	0.76
24	16	34	A-1-b (0)	GM	33	0.03
25	17	17	A-2-6(0)	SC	47	1.76
26	17	19	A-2-5(0)	SC-SM	45	1.37
27	20	16	A-2-4 (0)	SM	48	2.00
28	21	13	A-6(0)	CL	50	2.85
29	23	8	A-2-4 (0)	SM	54	5.75
30	27	25	A-2-4(0)	SM	41	0.64
31	28	20	A-2-4(0)	SM	44	1.20
32	30	14	A-2-5(0)	SC-SM	49	2.50
33	31	20	A-2-4(0)	SM	44	1.20
34	36	22	A-4 (0)	ML	43	0.95
35	36	65	A-4 (0)	ML	9	0.86
36	36	17	A-2-4(0)	SM	47	1.76
37	37	17	A-2-4(0)	SM	47	1.76
38	40	27	A-4 (0)	ML	39	0.44
39	40	22	A-6(1)	CL	43	0.95
40	42	14	A-4 (1)	ML	49	2.50
41	42	14	A-4 (0)	ML	49	2.50
42	42	13	A-4(0)	SM	50	2.85
43	42	18	A-2-6(13)	SC	46	1.56
44	43	19	A-4(0)	SM	45	1.37
45	45	65	A-4 (1)	ML	9	0.86
46	45	7	A-2-6(6)	SC	55	6.86
47	48	19	A-2-4(20)	SM	45	1.37
48	49	11	A-6(3)	SC	52	3.73
49	49	10	A-6(3)	SC	52	4.20
50	49	24	A-6(3)	SC	41	0.71
51	49	13	A-2-5(0)	SC-SM	50	2.85
52	51	15	A-4(0)	ML	48	2.20
53	53	6	A-6(7)	CL	55	8.17
54	54	5	A-4 (2)	ML	56	10.20
55	57	7	A-6(10)	CL	55	6.86
56	59	7	A-5(11)	MH	55	6.86
57	60	6	A-4(0)	CL-ML	55	8.17
58	63	3	A-6 (7)	CL	58	18.33
59	66	5	A-6(8)	CL	56	10.20
60	67	6	A-6(7)	CL	55	8.17
61	67	8	A-6(4)	CL	54	5.75
62	69	7	A-4 (4)	ML	55	6.86
63	69	5	A-4(2)	CL-ML	56	10.20
64	70	10	A-6(2)	CL-ML	52	4.20
65	75	3	A-6(15)	CL	58	18.33
66	76	2	A-6(16)	CL	59	28.50
67	77	2	A-6(16)	CL	59	28.50
68	79	4	A-6(18)	CL	57	13.25
69	80	1	A-7-6 (16)	CH	59	58.00
70	81	3	A-6(18)	CL	58	18.33
71	85	6	A-6(7)	CL	55	8.17
72	88	2	A-6(21)	CL	59	28.50
73	89	12	A-6(9)	CL	51	3.25
74	95	5	A-7-6(20)	CH	56	10.20
75	98	2	A-6(16)	CL	59	28.50

APÉNDICE E
ERROR MEDIDO DEL MODELO 4 DEL ARLS

MUESTRA	LL(%)	CBR(%)	AASHTO	SUCS	CBR pred	Error medido
1	15	16	A-2-4 (0)	SM	50	2.13
2	16	54	A-1-a(0)	GW	48	0.11
3	16	20	A-2-4(0)	SM	48	1.40
4	17	81	A-1-a(0)	GW	47	0.42
5	18	79	A-1-a(0)	GW	45	0.43
6	18	78	A-1-a(0)	GW	45	0.42
7	18	77	A-1-a(0)	GW	45	0.42
8	18	79	A-1-a(0)	GW	45	0.43
9	19	8	A-2-4 (0)	SM	44	4.50
10	19	64	A-1-a(0)	GW	44	0.31
11	19	79	A-1-a(0)	GW	44	0.44
12	19	78	A-1-a(0)	GW	44	0.44
13	19	81	A-1-a(0)	GW	44	0.46
14	19	79	A-1-a(0)	GW	44	0.44
15	19	81	A-1-a(0)	GW	44	0.46
16	20	19	A-4(0)	SM	42	1.21
17	20	19	A-2-5(0)	SC-SM	42	1.21
18	21	27	A-4 (0)	ML	40	0.48
19	21	63	A-1-a (0)	GW	40	0.37
20	21	14	A-2-5(0)	SC-SM	40	1.86
21	21	63	A-1-b(0)	GM	40	0.37
22	21	63	A-1-b(0)	GM	40	0.37
23	22	22	A-4 (0)	ML	39	0.77
24	22	65	A-4 (0)	ML	39	0.40
25	22	59	A-1-b(0)	GM	39	0.34
26	22	15	A-4(0)	ML	39	1.60
27	22	59	A-1-b(0)	GM	39	0.34
28	23	17	A-2-4(0)	SM	37	1.18
29	23	59	A-1-b(0)	GM	37	0.37
30	24	32	A-1-a (0)	GW	36	0.13
31	24	14	A-4 (1)	ML	36	1.57
32	24	13	A-4(0)	SM	36	1.77
33	24	47	A-2-6(0)	GC	36	0.23
34	24	13	A-2-5(0)	SC-SM	36	1.77
35	24	34	A-1-b (0)	GM	36	0.06
36	26	7	A-4 (4)	ML	32	3.57
37	26	46	A-2-6(0)	GC	32	0.30
38	26	5	A-4(2)	CL-ML	32	5.40
39	27	22	A-6(1)	CL	31	0.41
40	27	20	A-2-4(0)	SM	31	0.55
41	27	31	A-2-6 (0)	GC	31	0.00
42	28	6	A-4(0)	CL-ML	29	3.83
43	28	25	A-2-4(0)	SM	29	0.16
44	28	7	A-2-6(6)	SC	29	3.14
45	28	10	A-6(2)	CL-ML	29	1.90
46	29	6	A-6(7)	CL	28	3.67
47	30	5	A-4 (2)	ML	26	4.20
48	30	14	A-4 (0)	ML	26	0.86
49	30	8	A-6(4)	CL	26	2.25
50	31	3	A-6 (7)	CL	25	7.33
51	31	65	A-4 (1)	ML	25	0.62
52	31	13	A-6(0)	CL	25	0.92
53	31	18	A-2-6(13)	SC	25	0.39
54	32	5	A-6(8)	CL	23	3.60
55	32	12	A-6(9)	CL	23	0.92
56	33	6	A-6(7)	CL	21	2.50
57	33	20	A-2-6(0)	GC	21	0.05
58	34	17	A-2-6(0)	SC	20	0.18
59	35	6	A-6(7)	CL	18	2.00
60	36	11	A-6(3)	SC	17	0.55
61	36	10	A-6(3)	SC	17	0.70
62	36	24	A-6(3)	SC	17	0.29
63	37	2	A-6(16)	CL	15	6.50
64	38	17	A-2-4(0)	SM	13	0.24
65	39	7	A-6(10)	CL	12	0.71
66	39	2	A-6(16)	CL	12	5.00
67	41	3	A-6(15)	CL	9	2.00
68	42	1	A-7-6 (16)	CH	7	6.00
69	43	4	A-6(18)	CL	5	0.25
70	43	3	A-6(18)	CL	5	0.67
71	43	2	A-6(16)	CL	5	1.50
72	44	2	A-6(21)	CL	4	1.00
73	48	19	A-2-4(20)	SM	-2	1.11
74	51	7	A-5(11)	MH	-7	2.00
75	75	5	A-7-6(20)	CH	-45	10.00

APÉNDICE F
ERROR MEDIDO DEL MODELO 5 DEL ARLS

MUESTRA	LP(%)	CBR(%)	AASHTO	SUCS	CBR pred	Error medido
1	13	47	A-2-6(0)	GC	44	0.06
2	13	31	A-2-6 (0)	GC	44	0.42
3	14	14	A-4 (1)	ML	41	1.93
4	14	16	A-2-4 (0)	SM	41	1.56
5	14	8	A-2-4 (0)	SM	41	4.13
6	14	64	A-1-a(0)	GW	41	0.36
7	14	79	A-1-a(0)	GW	41	0.48
8	15	22	A-4 (0)	ML	38	0.73
9	15	65	A-4 (0)	ML	38	0.42
10	15	54	A-1-a(0)	GW	38	0.30
11	15	22	A-6(1)	CL	38	0.73
12	15	46	A-2-6(0)	GC	38	0.17
13	15	7	A-6(10)	CL	38	4.43
14	15	19	A-2-5(0)	SC-SM	38	1.00
15	15	14	A-2-5(0)	SC-SM	38	1.71
16	15	63	A-1-b(0)	GM	38	0.40
17	15	63	A-1-b(0)	GM	38	0.40
18	15	59	A-1-b(0)	GM	38	0.36
19	15	79	A-1-a(0)	GW	38	0.52
20	15	77	A-1-a(0)	GW	38	0.51
21	15	81	A-1-a(0)	GW	38	0.53
22	15	81	A-1-a(0)	GW	38	0.53
23	15	20	A-2-4(0)	SM	38	0.90
24	16	27	A-4 (0)	ML	35	0.30
25	16	3	A-6 (7)	CL	35	10.67
26	16	17	A-2-6(0)	SC	35	1.06
27	16	6	A-6(7)	CL	35	4.83
28	16	59	A-1-b(0)	GM	35	0.41
29	16	78	A-1-a(0)	GW	35	0.55
30	16	79	A-1-a(0)	GW	35	0.56
31	16	78	A-1-a(0)	GW	35	0.55
32	16	81	A-1-a(0)	GW	35	0.57
33	16	79	A-1-a(0)	GW	35	0.56
34	17	7	A-4 (4)	ML	33	3.71
35	17	63	A-1-a (0)	GW	33	0.48
36	17	19	A-4(0)	SM	33	0.74
37	17	20	A-2-4(0)	SM	33	0.65
38	17	7	A-2-6(6)	SC	33	3.71
39	17	18	A-2-6(13)	SC	33	0.83
40	17	13	A-2-5(0)	SC-SM	33	1.54
41	17	2	A-6(16)	CL	33	15.50
42	17	17	A-2-4(0)	SM	33	0.94
43	17	5	A-6(8)	CL	33	5.60
44	17	20	A-2-6(0)	GC	33	0.65
45	18	13	A-6(0)	CL	30	1.31
46	18	59	A-1-b(0)	GM	30	0.49
47	19	6	A-6(7)	CL	27	3.50
48	19	25	A-2-4(0)	SM	27	0.08
49	20	15	A-4(0)	ML	24	0.60
50	20	5	A-4(2)	CL-ML	24	3.80
51	20	6	A-6(7)	CL	24	3.00
52	20	3	A-6(15)	CL	24	7.00
53	20	4	A-6(18)	CL	24	5.00
54	20	34	A-1-b (0)	GM	24	0.29
55	21	13	A-4(0)	SM	21	0.62
56	21	6	A-4(0)	CL-ML	21	2.50
57	21	2	A-6(21)	CL	21	9.50
58	21	3	A-6(18)	CL	21	6.00
59	21	2	A-6(16)	CL	21	9.50
60	22	32	A-1-a (0)	GW	19	0.41
61	22	1	A-7-6 (16)	CH	19	18.00
62	22	5	A-4 (2)	ML	19	2.80
63	22	2	A-6(16)	CL	19	8.50
64	22	12	A-6(9)	CL	19	0.58
65	22	8	A-6(4)	CL	19	1.38
66	23	10	A-6(2)	CL-ML	16	0.60
67	24	14	A-4 (0)	ML	13	0.07
68	24	65	A-4 (1)	ML	13	0.80
69	25	11	A-6(3)	SC	10	0.09
70	25	10	A-6(3)	SC	10	0.00
71	25	24	A-6(3)	SC	10	0.58
72	25	19	A-2-4(20)	SM	10	0.47
73	26	5	A-7-6(20)	CH	7	0.40
74	29	7	A-5(11)	MH	-1	1.14
75	35	17	A-2-4(0)	SM	-18	2.06

APÉNDICE G
ERROR MEDIDO MODELO 6 DEL ARLS

MUESTRA	IP(%)	CBR(%)	AASHTO	SUCS	CBR pred	Error medido
1	2	32	A-1-a(0)	GW	43	0.34
2	9	7	A-4(4)	ML	31	3.43
3	7	22	A-4(0)	ML	34	0.55
4	20	1	A-7-6(16)	CH	11	10.00
5	5	27	A-4(0)	ML	38	0.41
6	8	5	A-4(2)	ML	32	5.40
7	15	3	A-6(7)	CL	20	5.67
8	10	14	A-4(1)	ML	29	1.07
9	1	16	A-2-4(0)	SM	45	1.81
10	6	14	A-4(0)	ML	36	1.57
11	5	8	A-2-4(0)	SM	38	3.75
12	4	63	A-1-a(0)	GW	39	0.38
13	7	65	A-4(0)	ML	34	0.48
14	7	65	A-4(1)	ML	34	0.48
15	1	54	A-1-a(0)	GW	45	0.17
16	12	22	A-6(1)	CL	25	0.14
17	10	6	A-6(7)	CL	29	3.83
18	11	11	A-6(3)	SC	27	1.45
19	3	13	A-4(0)	SM	41	2.15
20	11	10	A-6(3)	SC	27	1.70
21	11	24	A-6(3)	SC	27	0.13
22	11	47	A-2-6(0)	GC	27	0.43
23	11	46	A-2-6(0)	GC	27	0.41
24	13	13	A-6(0)	CL	23	0.77
25	4	59	A-1-b(0)	GM	39	0.34
26	7	6	A-4(0)	CL-ML	34	4.67
27	3	19	A-4(0)	SM	41	1.16
28	18	17	A-2-6(0)	SC	15	0.12
29	49	5	A-7-6(20)	CH	-41	9.20
30	10	20	A-2-4(0)	SM	29	0.45
31	24	7	A-6(10)	CL	4	0.43
32	9	25	A-2-4(0)	SM	31	0.24
33	19	6	A-6(7)	CL	13	1.17
34	11	7	A-2-6(6)	SC	27	2.86
35	14	18	A-2-6(13)	SC	22	0.22
36	2	15	A-4(0)	ML	43	1.87
37	7	13	A-2-5(0)	SC-SM	34	1.62
38	5	10	A-6(2)	CL-ML	38	2.80
39	22	2	A-6(16)	CL	7	2.50
40	6	17	A-2-4(0)	SM	36	1.12
41	5	19	A-2-5(0)	SC-SM	38	1.00
42	6	14	A-2-5(0)	SC-SM	36	1.57
43	15	5	A-6(8)	CL	20	3.00
44	6	5	A-4(2)	CL-ML	36	6.20
45	13	6	A-6(7)	CL	23	2.83
46	21	3	A-6(15)	CL	9	2.00
47	23	2	A-6(21)	CL	6	2.00
48	23	4	A-6(18)	CL	6	0.50
49	22	3	A-6(18)	CL	7	1.33
50	22	2	A-6(16)	CL	7	2.50
51	15	2	A-6(16)	CL	20	9.00
52	10	12	A-6(9)	CL	29	1.42
53	8	8	A-6(4)	CL	32	3.00
54	16	20	A-2-6(0)	GC	18	0.10
55	6	63	A-1-b(0)	GM	36	0.43
56	6	63	A-1-b(0)	GM	36	0.43
57	5	64	A-1-a(0)	GW	38	0.41
58	7	59	A-1-b(0)	GM	34	0.42
59	7	59	A-1-b(0)	GM	34	0.42
60	3	79	A-1-a(0)	GW	41	0.48
61	2	78	A-1-a(0)	GW	43	0.45
62	3	79	A-1-a(0)	GW	41	0.48
63	3	78	A-1-a(0)	GW	41	0.47
64	3	81	A-1-a(0)	GW	41	0.49
65	3	79	A-1-a(0)	GW	41	0.48
66	3	77	A-1-a(0)	GW	41	0.47
67	4	79	A-1-a(0)	GW	39	0.51
68	2	81	A-1-a(0)	GW	43	0.47
69	4	81	A-1-a(0)	GW	39	0.52
70	1	20	A-2-4(0)	SM	45	1.25
71	14	31	A-2-6(0)	GC	22	0.29
72	4	34	A-1-b(0)	GM	39	0.15
73	23	19	A-2-4(20)	SM	6	0.68
74	3	17	A-2-4(0)	SM	41	1.41
75	22	7	A-5(11)	MH	7	0.00

APÉNDICE H
ERROR MEDIDO DEL MODELO 7 DEL ARLS

MUESTRA	MDD(g/cm ³)	CBR(%)	AASHTO	SUCS	CBR pred	Error medido
1	1.62	5	A-7-6(20)	CH	-6	2.20
2	1.62	17	A-2-4(0)	SM	-6	1.35
3	1.62	17	A-2-4(0)	SM	-6	1.35
4	1.66	15	A-4(0)	ML	-2	1.13
5	1.67	8	A-2-4 (0)	SM	-1	1.13
6	1.7	16	A-2-4 (0)	SM	2	0.88
7	1.7	14	A-4 (0)	ML	2	0.86
8	1.71	5	A-4 (2)	ML	3	0.40
9	1.71	14	A-4 (1)	ML	3	0.79
10	1.71	65	A-4 (1)	ML	3	0.95
11	1.73	13	A-4(0)	SM	5	0.62
12	1.74	10	A-6(3)	SC	6	0.40
13	1.75	24	A-6(3)	SC	7	0.71
14	1.76	12	A-6(9)	CL	8	0.33
15	1.76	8	A-6(4)	CL	8	0.00
16	1.78	2	A-6(16)	CL	10	4.00
17	1.8	19	A-2-5(0)	SC-SM	12	0.37
18	1.82	3	A-6 (7)	CL	14	3.67
19	1.85	6	A-6(7)	CL	17	1.83
20	1.86	7	A-4 (4)	ML	18	1.57
21	1.87	19	A-4(0)	SM	19	0.00
22	1.87	20	A-2-4(0)	SM	19	0.05
23	1.87	7	A-6(10)	CL	19	1.71
24	1.87	10	A-6(2)	CL-ML	19	0.90
25	1.87	19	A-2-4(20)	SM	19	0.00
26	1.87	7	A-5(11)	MH	19	1.71
27	1.88	25	A-2-4(0)	SM	20	0.20
28	1.88	2	A-6(21)	CL	20	9.00
29	1.88	3	A-6(18)	CL	20	5.67
30	1.89	1	A-7-6 (16)	CH	21	20.00
31	1.9	6	A-6(7)	CL	22	2.67
32	1.91	6	A-6(7)	CL	23	2.83
33	1.92	27	A-4 (0)	ML	24	0.11
34	1.92	5	A-4(2)	CL-ML	24	3.80
35	1.92	4	A-6(18)	CL	24	5.00
36	1.93	13	A-6(0)	CL	25	0.92
37	1.93	6	A-4(0)	CL-ML	25	3.17
38	1.93	18	A-2-6(13)	SC	25	0.39
39	1.93	5	A-6(8)	CL	25	4.00
40	1.94	2	A-6(16)	CL	26	12.00
41	1.95	22	A-4 (0)	ML	27	0.23
42	1.95	65	A-4 (0)	ML	27	0.58
43	1.95	2	A-6(16)	CL	27	12.50
44	1.95	3	A-6(15)	CL	27	8.00
45	1.96	14	A-2-5(0)	SC-SM	28	1.00
46	1.98	11	A-6(3)	SC	30	1.73
47	2	7	A-2-6(6)	SC	32	3.57
48	2	13	A-2-5(0)	SC-SM	32	1.46
49	2.08	34	A-1-b (0)	GM	40	0.18
50	2.1	17	A-2-6(0)	SC	42	1.47
51	2.1	20	A-2-4(0)	SM	42	1.10
52	2.12	54	A-1-a(0)	GW	44	0.19
53	2.13	32	A-1-a (0)	GW	45	0.41
54	2.13	31	A-2-6 (0)	GC	45	0.45
55	2.15	59	A-1-b(0)	GM	47	0.20
56	2.17	59	A-1-b(0)	GM	49	0.17
57	2.18	20	A-2-6(0)	GC	50	1.50
58	2.21	22	A-6(1)	CL	53	1.41
59	2.21	64	A-1-a(0)	GW	53	0.17
60	2.21	59	A-1-b(0)	GM	53	0.10
61	2.22	46	A-2-6(0)	GC	54	0.17
62	2.22	81	A-1-a(0)	GW	54	0.33
63	2.22	79	A-1-a(0)	GW	54	0.32
64	2.22	79	A-1-a(0)	GW	54	0.32
65	2.22	81	A-1-a(0)	GW	54	0.33
66	2.22	81	A-1-a(0)	GW	54	0.33
67	2.23	78	A-1-a(0)	GW	55	0.29
68	2.23	79	A-1-a(0)	GW	55	0.30
69	2.23	77	A-1-a(0)	GW	55	0.29
70	2.24	63	A-1-a (0)	GW	56	0.11
71	2.24	79	A-1-a(0)	GW	56	0.29
72	2.24	78	A-1-a(0)	GW	56	0.28
73	2.25	47	A-2-6(0)	GC	57	0.21
74	2.29	63	A-1-b(0)	GM	61	0.03
75	2.29	63	A-1-b(0)	GM	61	0.03

APÉNDICE I
ERROR MEDIDO DEL MODELO 8 DEL ARLS

MUESTRA	OMC(%)	CBR(%)	AASHTO	SUCS	CBR pred	Error medido
1	4.5	79	A-1-a(0)	GW	64	0.19
2	4.5	78	A-1-a(0)	GW	64	0.18
3	4.6	78	A-1-a(0)	GW	64	0.18
4	4.6	81	A-1-a(0)	GW	64	0.21
5	4.6	81	A-1-a(0)	GW	64	0.21
6	4.7	81	A-1-a(0)	GW	63	0.22
7	4.9	79	A-1-a(0)	GW	62	0.22
8	4.9	79	A-1-a(0)	GW	62	0.22
9	4.9	79	A-1-a(0)	GW	62	0.22
10	5	59	A-1-b(0)	GM	61	0.03
11	5	77	A-1-a(0)	GW	61	0.21
12	5.5	54	A-1-a(0)	GW	58	0.07
13	5.5	63	A-1-b(0)	GM	58	0.08
14	5.5	63	A-1-b(0)	GM	58	0.08
15	5.5	64	A-1-a(0)	GW	58	0.09
16	5.5	59	A-1-b(0)	GM	58	0.02
17	5.8	63	A-1-a (0)	GW	56	0.11
18	6	31	A-2-6 (0)	GC	55	0.77
19	6.3	22	A-6(1)	CL	53	1.41
20	7	46	A-2-6(0)	GC	49	0.07
21	7	59	A-1-b(0)	GM	49	0.17
22	7.3	17	A-2-6(0)	SC	47	1.76
23	8	47	A-2-6(0)	GC	43	0.09
24	8	6	A-4(0)	CL-ML	43	6.17
25	8.5	20	A-2-4(0)	SM	40	1.00
26	9	32	A-1-a (0)	GW	37	0.16
27	9	34	A-1-b (0)	GM	37	0.09
28	9.2	20	A-2-6(0)	GC	36	0.80
29	10	19	A-2-5(0)	SC-SM	31	0.63
30	10.2	22	A-4 (0)	ML	30	0.36
31	10.2	65	A-4 (0)	ML	30	0.54
32	10.5	27	A-4 (0)	ML	28	0.04
33	11	13	A-2-5(0)	SC-SM	25	0.92
34	11.5	11	A-6(3)	SC	22	1.00
35	11.5	14	A-2-5(0)	SC-SM	22	0.57
36	12	16	A-2-4 (0)	SM	19	0.19
37	12	8	A-2-4 (0)	SM	19	1.38
38	12	13	A-6(0)	CL	19	0.46
39	12	19	A-4(0)	SM	19	0.00
40	12	7	A-2-6(6)	SC	19	1.71
41	12	18	A-2-6(13)	SC	19	0.06
42	12	17	A-2-4(0)	SM	19	0.12
43	12	6	A-6(7)	CL	19	2.17
44	12	19	A-2-4(20)	SM	19	0.00
45	12	17	A-2-4(0)	SM	19	0.12
46	12.2	7	A-4 (4)	ML	17	1.43
47	12.3	15	A-4(0)	ML	17	0.13
48	12.3	5	A-6(8)	CL	17	2.40
49	12.3	2	A-6(16)	CL	17	7.50
50	12.5	1	A-7-6 (16)	CH	16	15.00
51	12.5	10	A-6(2)	CL-ML	16	0.60
52	12.5	5	A-4(2)	CL-ML	16	2.20
53	12.5	3	A-6(15)	CL	16	4.33
54	12.5	4	A-6(18)	CL	16	3.00
55	12.6	25	A-2-4(0)	SM	15	0.40
56	13	3	A-6 (7)	CL	13	3.33
57	13	6	A-6(7)	CL	13	1.17
58	13	10	A-6(3)	SC	13	0.30
59	13	24	A-6(3)	SC	13	0.46
60	13	6	A-6(7)	CL	13	1.17
61	13	2	A-6(16)	CL	13	5.50
62	13	2	A-6(21)	CL	13	5.50
63	13	12	A-6(9)	CL	13	0.08
64	13.2	20	A-2-4(0)	SM	11	0.45
65	13.2	3	A-6(18)	CL	11	2.67
66	13.4	7	A-6(10)	CL	10	0.43
67	13.4	7	A-5(11)	MH	10	0.43
68	14	8	A-6(4)	CL	7	0.13
69	15	5	A-4 (2)	ML	1	0.80
70	15	13	A-4(0)	SM	1	0.92
71	15.5	14	A-4 (1)	ML	-2	1.14
72	15.5	65	A-4 (1)	ML	-2	1.03
73	16	14	A-4 (0)	ML	-6	1.43
74	16.5	2	A-6(16)	CL	-9	5.50
75	19.2	5	A-7-6(20)	CH	-25	6.00

APÉNDICE J
ERROR MEDIDO DEL CBR DE LABORATORIO Y CBR PREDICHO DE LAS ECUACIONES DE OTROS AUTORES Y EL MODELO PROPUESTO

AASHTO	PATEL	SAKLECHA	YILDIRIM	RAMASUBBARAO	KUMAR	MODELO 7
Error1	Error2	Error3	Error4	Error5	Error6	Error7
ERROR						
1.00	2.00	8.00	10.00	2.00	5.00	5.00
1.00	0.50	4.00	5.00	0.00	1.50	0.50
1.00	0.00	3.50	4.50	0.50	2.00	0.00
1.00	0.00	5.00	5.50	0.50	2.00	3.50
1.00	1.00	1.50	4.50	0.50	1.50	3.50
1.00	0.33	0.67	3.00	0.00	0.67	1.33
1.00	0.67	3.00	3.33	0.00	1.00	1.33
1.00	0.33	2.00	3.00	0.00	1.00	0.33
1.00	0.50	1.50	2.00	0.25	0.50	0.25
1.00	0.20	1.20	1.80	0.20	0.20	2.00
1.00	0.40	0.40	1.00	0.80	0.20	4.60
1.00	0.60	0.60	1.60	0.40	0.20	0.60
1.00	0.40	0.60	1.60	0.20	0.20	1.40
1.00	0.33	0.33	0.83	0.33	0.00	0.00
1.00	0.17	0.17	1.00	0.17	0.33	3.17
1.00	0.67	0.17	1.17	0.50	0.17	0.00
1.00	0.50	0.17	1.00	0.33	0.00	0.83
1.00	0.43	0.57	0.71	0.43	0.14	0.43
1.00	0.71	0.29	0.71	0.57	0.29	0.57
1.00	0.71	0.57	0.86	0.43	0.14	0.71
1.00	0.57	0.86	0.71	0.43	0.00	0.43
0.00	0.00	2.38	0.63	0.38	0.38	1.75
1.00	0.25	0.88	0.50	0.50	0.25	0.25
1.00	0.40	0.80	0.20	0.60	0.30	0.60
1.00	0.60	0.30	0.20	0.60	0.30	0.30
1.00	0.82	0.36	0.18	0.64	0.36	0.45
1.00	0.50	0.92	0.17	0.67	0.50	0.25
0.00	0.46	1.08	0.00	0.62	0.54	0.08
1.00	0.77	0.38	0.46	0.77	0.54	1.31
1.00	0.85	0.23	0.00	0.69	0.46	0.23
1.00	0.57	1.43	0.07	0.71	0.71	0.57
1.00	0.57	1.00	0.07	0.64	0.57	0.21
0.00	0.79	0.50	0.00	0.71	0.57	0.21
0.00	0.40	1.53	0.20	0.67	0.60	0.33
4.00	0.50	1.63	0.19	0.69	0.63	0.44
1.00	0.94	0.18	0.24	1.00	0.59	0.00
1.00	0.47	1.71	0.29	0.71	0.65	0.29
0.00	0.41	1.06	0.29	0.59	0.53	0.88
1.00	0.83	0.61	0.28	0.78	0.67	0.28
0.00	0.74	0.84	0.32	0.74	0.68	0.11
0.00	0.63	1.21	0.32	0.74	0.68	0.42
1.00	0.84	0.47	0.32	0.79	0.63	0.26
1.00	0.80	0.80	0.30	0.80	0.70	0.30
1.00	1.05	0.05	0.30	0.95	0.65	1.45
2.00	0.90	0.40	0.15	0.80	0.65	0.65
1.00	0.86	0.77	0.41	0.82	0.73	0.09
1.00	1.05	0.14	0.00	0.95	0.64	1.09
1.00	0.75	0.92	0.50	0.83	0.71	0.33
1.00	0.84	0.76	0.44	0.80	0.76	0.32
0.00	0.85	0.85	0.52	0.85	0.78	0.26
0.00	0.97	0.58	0.23	0.97	0.77	0.81
6.00	0.97	0.41	0.19	0.94	0.75	0.88
1.00	0.94	0.56	0.32	0.91	0.76	0.53
0.00	1.02	0.57	0.41	0.98	0.85	0.28
0.00	1.04	0.55	0.45	0.98	0.85	0.09
9.00	0.96	0.78	0.54	0.96	0.85	0.19
1.00	0.98	0.69	0.58	0.97	0.86	0.00
0.00	1.00	0.69	0.58	0.97	0.86	0.00
0.00	0.98	0.75	0.58	0.97	0.86	0.08
1.00	1.00	0.67	0.60	0.97	0.87	0.05
0.00	1.02	0.65	0.62	0.97	0.87	0.13
0.00	1.02	0.65	0.62	0.97	0.87	0.14
1.00	1.00	0.73	0.61	0.97	0.88	0.08
1.00	0.95	0.92	0.80	0.94	0.91	0.69
1.00	0.91	1.00	0.77	0.94	0.91	0.71
3.00	1.00	0.77	0.65	0.97	0.90	0.13
3.00	1.00	0.77	0.68	0.97	0.88	0.17
3.00	1.00	0.76	0.67	0.97	0.88	0.14
2.00	1.00	0.77	0.68	0.97	0.90	0.18
3.00	1.00	0.76	0.67	0.97	0.90	0.15
3.00	1.00	0.77	0.66	0.97	0.90	0.13
1.00	1.00	0.78	0.67	0.97	0.90	0.19
2.00	1.00	0.78	0.68	0.98	0.90	0.17
4.00	0.99	0.79	0.68	0.98	0.90	0.17
2.00	1.00	0.79	0.68	0.98	0.90	0.19

APÉNDICE K
CBR PREDICHO DEL ARLM

Modelo1 (R²=0.7375)	Modelo 2 (R²=0.3385)	Modelo 3 (R²=0.7657)	Modelo 4 (R²=0.7740)	Modelo 5 (R²=0.7802)	Modelo 6 (R²=0.7802)	Modelo 7 (R²=0.7835)	Modelo 8 (R²=0.7420)
55	58	56	57	60	60	60	55
13	9	10	12	11	11	10	13
18	20	19	20	19	19	20	18
12	6	6	5	6	6	6	12
17	19	19	20	19	19	20	17
10	12	14	15	16	16	15	10
10	9	10	10	8	8	7	10
4	9	9	11	7	7	6	3
13	20	24	25	23	23	23	13
8	13	14	15	17	17	17	9
13	20	25	25	22	22	22	13
60	59	58	58	60	60	60	60
18	20	19	20	19	19	20	18
11	15	16	17	19	19	19	12
61	62	64	65	64	64	64	61
53	48	48	48	46	46	46	53
10	4	5	8	7	7	6	10
15	15	12	10	15	15	16	15
6	11	11	13	14	14	14	6
10	12	15	12	16	16	16	11
10	12	14	12	16	16	16	11
56	57	53	54	51	51	51	55
62	62	61	60	59	59	59	62
27	32	31	30	30	30	30	27
57	58	58	58	59	59	59	57
24	19	23	22	24	24	25	24
13	15	15	17	17	17	17	13
26	30	27	22	23	23	17	26
10	16	14	13	13	13	14	10
9	10	8	6	3	3	3	9
11	18	15	15	16	16	17	12
10	11	9	8	6	6	6	10
13	15	10	11	11	11	12	13
13	16	13	12	12	12	13	13
12	13	19	20	21	21	20	12
17	17	14	16	16	16	16	17
12	8	9	10	13	13	13	12
10	6	3	3	1	1	1	10

APÉNDICE K
CBR PREDICHO DEL ARLM (CONTINUACIÓN)

Modelo1 (R²=0.7375)	Modelo 2 (R²=0.3385)	Modelo 3 (R²=0.7657)	Modelo 4 (R²=0.7740)	Modelo 5 (R²=0.7802)	Modelo 6 (R²=0.7802)	Modelo 7 (R²=0.7835)	Modelo 8 (R²=0.7420)
13	17	24	23	22	22	22	13
19	25	28	27	26	26	27	19
15	19	16	17	17	17	17	14
13	11	9	10	8	8	8	13
13	10	9	12	13	13	12	13
13	10	10	10	10	10	11	13
14	10	8	7	7	7	7	14
11	4	4	3	2	2	2	11
13	8	7	5	5	5	5	13
11	5	5	4	4	4	4	11
17	11	10	9	9	9	9	17
1							
10	3	7	9	9	9	9	11
8	6	8	9	10	10	10	8
52	54	51	50	49	49	49	52
57	57	54	54	55	55	55	57
56	56	53	53	53	53	54	56
60	60	60	60	59	59	59	60
60	60	60	60	59	59	59	60
64	62	65	64	64	64	64	64
64	64	64	64	64	64	65	64
64	63	64	64	65	65	65	64
66	65	66	66	67	67	67	66
67	66	67	67	67	67	67	67
66	65	66	66	67	67	67	66
68	68	69	69	70	70	69	68
67	67	67	68	68	68	67	67
65	64	65	65	64	64	64	65
67	66	67	68	67	67	67	67
66	66	67	67	66	66	66	66
32	33	30	32	33	33	33	32
59	59	61	59	56	56	56	58
48	50	49	50	52	52	52	48