



CORRELACIÓN ENTRE EL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO Y LA RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA EN CAMPO PARA EL SUELO DE SUB- RASANTE DE LA VIA PORTOVIEJO-MANTA

CORRELATION BETWEEN THE DYNAMIC CONE PENETROMETER AND THE CALIFORNIA SUPPORT RELATIONSHIP IN THE FIELD FOR THE SUB-RASANT FLOOR OF THE PORTOVIEJO-MANTA ROAD

Hugo Florencio Torres Merino¹; Joan Alberto Castillo Morejón²; Lenin Hernán Mena Garzón³; David Patricio Guerrero Cuasapaz⁴

Recibido 19/08/2019: Aprobado: 11/12/2019

DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.12491.54569>

RESUMEN

La vía Portoviejo–Manta es una arteria principal de comunicación terrestre de la provincia de Manabí en Ecuador, eje fundamental en el desarrollo económico, social y turístico del país. El gobierno autónomo descentralizado de la provincia de Manabí fundamentado en estudios propone una extensión de los cuatro carriles existentes a seis; para ello es importante un análisis integral que involucre un estudio de tráfico, geológico y geotécnico. Dado que esta provincia a niveles superficiales presenta una formación uniforme de arcillas, la presente investigación evalúa las condiciones del terreno de soporte de la vía, proponiendo dos métodos penetrómetro dinámico de cono y la relación de soporte de California, examinando a la vez si existe la correlación entre ellos. Se realizaron trabajos normalizados de campo y laboratorio en una longitud de 35 kilómetros con ensayos a la par cada 500,00 m. Los datos obtenidos de campo y laboratorio fueron procesados y analizados mediante métodos estadísticos de regresión lineal, validada a través de prueba de hipótesis y significancia del p-valor. En primera instancia se obtuvo una correlación directa entre ambos métodos y una ecuación con valor de correlación de 0,80, con una significatividad de $7,246 \times 10^{-5}$. Se efectuó una segunda ecuación de regresión múltiple en la cual se obtuvo valores de correlación entre los métodos, más los parámetros físicos del suelo de 0,82 y su correspondiente p-valor de 0,0091 validando así la fiabilidad de los resultados.

Palabras clave: *penetrómetro dinámico de cono; DCP; relación de soporte de California; CBR*

¹Hugo Florencio Torres Merino. Ingeniero Civil. Magister en ingeniería vial. Universidad Politécnica Salesiana. Ecuador. Correo: htorres@ups.edu.ec. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9411-5500>

²Joan Alberto Castillo Morejón. Ingeniero Civil. Universidad Politécnica Salesiana. Ecuador. Correo: joanm1000@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3767-9662>

³Lenin Hernán Mena Garzón. Ingeniero Civil. Universidad Politécnica Salesiana. Ecuador. Correo: lenin321@hotmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9536-4242>

⁴David Patricio Guerrero Cuasapaz. Ingeniero Civil. Magister en estructuras. Docente investigador en la Universidad Politécnica Salesiana. Ecuador. Correo: dguerrero@ups.edu.ec. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8547-906X>

ABSTRACT

The Portoviejo – Manta road is a main land communication artery in the province of Manabí in Ecuador, a fundamental axis in the country's economic, social and tourism development. The decentralized autonomous government of the province of Manabí based on studies proposes an extension of the four existing lanes to six; for this, a comprehensive analysis involving a traffic, geological and geotechnical study is important. Given that this province at superficial levels presents a uniform clay formation, the present investigation evaluates the conditions of the track support terrain, proposing two dynamic cone penetrometer methods and the California support ratio, examining at the same time if the correlation between them exists. Standardized field and laboratory work was carried out over a length of 35 kilometers with paired tests every 500,00 m. The data obtained from the field and laboratory were processed and analyzed using statistical linear regression methods, validated through hypothesis testing and significance of the p-value. At first, a direct correlation was obtained between both methods and an equation with a correlation value of 0,80, with a significance of $7,246 \times 10^{-5}$. A second multiple regression equation was carried out in which correlation values were obtained between the methods, plus the physical parameters of the soil of 0,82 and its corresponding p-value of 0,0091, thus validating the reliability of the results.

Keywords: *dynamic cone penetrometer; DCP; California support relationship; CBR*

1. INTRODUCCIÓN

El Gobierno autónomo descentralizado de la Provincia de Manabí, entre sus actividades planificadas busca construir vías seguras, durables y al menor costo, de lo que se deriva inversión y presupuesto para estudios y diseño. Bajo esta premisa, a futuro se prevé evaluar el suelo de sub-rasante con el empleo de métodos confiables a través de correlaciones locales. En este caso, la presente investigación aprovecha las consultorías contratadas para la obtención de datos, y complementa los ensayos para contribuir a la meta propuesta por las autoridades gubernamentales.

La Relación de Soporte de California *CBR* en campo, es un ensayo que determina la capacidad de soporte del suelo in situ evaluando la calidad de la sub-rasante, sub-base y base de pavimentos, mediante la aplicación de una carga para alcanzar los esfuerzos requeridos, a penetraciones pequeñas de 0,1” y 0,2” [1]. Desde esta visión del proceso, emplear el *CBR* en campo conlleva a una logística extensa, altos costos y poca profundidad de inspección. Por otro lado, el ensayo Penetrómetro Dinámico de Cono *DCP* [2] realizado en campo con ayuda del dispositivo de cono de penetración, calcula la penetración dinámica por golpes en el suelo representando la resistencia de corte in situ de la sub-rasante hasta profundidades de 32”, los resultados son instantáneos y por tanto los costos menores.

2. DESARROLLO

En el campo de la ingeniería vial, los indicadores de resistencia al corte del suelo en condiciones dinámicas se ven representadas por el módulo resiliente, conceptualizado como la

relación que existen entre los esfuerzos desviadores y las deformaciones recuperables. En la escala de las guías AASHTO 2002 [3] y 2008 [4], el módulo resiliente determinado a través de un ensayo directo denominado triaxial dinámico representa la mayor fiabilidad, sin embargo, resulta muy costoso. En segundo nivel se encuentra la determinación del módulo resiliente a través de correlación con el ensayo CBR. Para finalizar en tercer nivel, la guía recomienda se obtenga a través de correlación entre ensayo DCP, después a CBR y con esto al módulo resiliente.

El número CBR de campo, se obtiene de la relación de la carga unitaria (lbs/pulg²) necesaria para lograr una profundidad de 0,1 y 0,2” de penetración del pistón de 19,4 cm² de área dentro de la muestra in situ en condiciones de humedad y densidad natural [5]. De acuerdo a la Norma ASTM D 6951 [6] “este método de ensayo trata sobre la medición de la razón de penetración del Penetrómetro Dinámico de Cono con el mazo de 8 kg (DCP 8kg) a través de suelos inalterados y/o compactados. La razón de penetración puede relacionarse con la capacidad de soporte in situ, tal y como se estima con el ensayo de CBR in situ (Razón de Soporte de California)”.

3. METODOLOGÍA

3.1. Método

La investigación experimental de campo y laboratorio se llevó a cabo en la vía Portoviejo-Manta ubicada en la provincia de Manabí donde se efectuaron 56 sondeos superficiales, procediendo a extraer dichas muestras realizando los ensayos antes mencionados mediante el sistema de coordenadas UTM WGS-84, dichas muestras fueron georreferenciadas, como lo indicado en la Figura 1 y la Tabla 1.

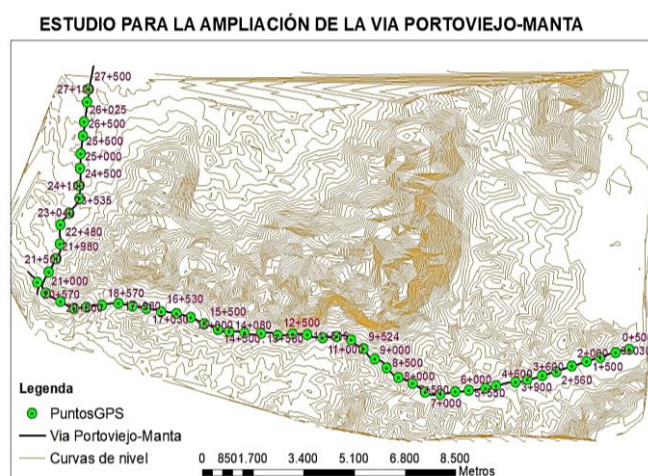


Figura 1. Ubicación de muestras vía Portoviejo – Manta. Fuente: los autores

Tabla 1. Combinación de cargas

UTM WGS 84					
Calicata	ESTE	SUR	Calicata	ESTE	SUR
C-1	557804,9344	9881846,544	C-29	544862,1052	9882500,435
C-2	558279,1426	9881943,469	C-30	544470,9273	9882559,478
C-3	557304,3493	9881697,461	C-31	543559,2105	9882936,423
C-4	556836,7032	9881579,632	C-32	544010,0049	9882733,195
C-5	556346,3570	9881439,577	C-33	543084,8178	9883050,376
C-6	555823,2947	9881260,619	C-34	542565,5828	9883124,509
C-7	555353,8674	9881124,562	C-35	542072,8289	9883210,343
C-8	554861,9709	9881016,528	C-36	541609,8933	9883305,147
C-9	554460,8679	9880940,412	C-37	541148,958	9883380,011
C-10	553807,8655	9880810,572	C-38	540584,7583	9883314,167
C-11	553445,1474	9880730,448	C-39	540074,854	9883255,014
C-12	552895,6305	9880683,181	C-40	539648,8415	9883218,300
C-13	552432,7842	9880630,672	C-41	539200,6061	9883432,817
C-14	551929,8813	9880553,862	C-42	538431,654	9884024,186
C-15	551427,8900	9880614,600	C-43	538703,7547	9883686,501
C-16	551003,7033	9880904,042	C-44	538797,8421	9884351,366
C-17	550530,4343	9881083,156	C-45	539056,5644	9884763,391
C-18	550133,1709	9881370,294	C-46	539172,2133	9885220,795
C-19	549730,5653	9881649,439	C-47	539197,6459	9885810,527
C-20	549349,9933	9881962,217	C-48	539500,5339	9886175,096
C-21	548940,4888	9882243,617	C-49	539841,0389	9886634,884
C-22	548474,8826	9882337,361	C-50	539832,1817	9887024,800
C-23	547983,7809	9882308,779	C-51	539842,4769	9887558,097
C-24	547479,1225	9882398,967	C-52	539877,5757	9888027,967
C-25	546976,6801	9882422,271	C-53	539992,838	9889008,676
C-26	546477,9024	9882392,771	C-54	539951,9572	9888569,004
C-27	545375,0042	9882471,242	C-55	540081,3584	9889631,903
C-28	545925,619	9882434,306	C-56	540153,9441	9890032,849

Por la naturaleza de la investigación se realizó los sondeos superficiales (calicatas), mostrados en la Figura 2, distribuidas de manera sistemática tanto del lado izquierdo como el lado derecho de la vía, dando como resultado total 56 calicatas en 28 kilómetros de vía.

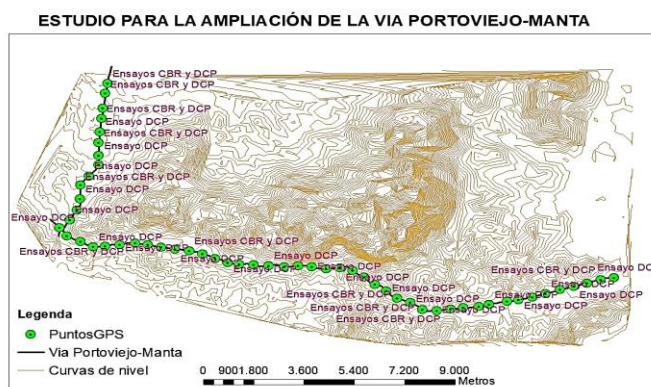


Figura 2. Ubicación de ensayos vía Portoviejo – Manta. Fuente: los autores



Las muestras de suelo fueron recolectadas a diferentes profundidades la primera, con una excavación de 0,70 m aproximadamente, realizando consecutivamente una segunda toma a 0,80 m de la extracción de la primera, para una obtención total de muestra de 1,50 m. Las mismas se almacenaron y transportaron adecuadamente.

3.2. Ensayos de Campo

Para establecer las correlaciones se procedió a la realización del ensayo denominado penetrómetro dinámico de cono *DCP* cada 500 metros aproximadamente para obtener el número de golpes por penetración por milímetro, adicional a esto se realizó el ensayo de soporte de california *CBR* en campo cada 1000 metros aproximadamente. De forma paralela a los ensayos se procedió con la extracción de muestras las cuales se obtuvieron de manera sistemática tanto al lado izquierdo como al lado derecho de la longitud total de la vía.

En el caso de la determinación de la densidad del suelo que conforma la subrasante y el porcentaje de humedad, se empleó el densímetro nuclear, equipo electrónico de medición capaz de determinar rápidamente y con precisión el porcentaje de humedad y la densidad de suelos o agregados y asfalto, directamente en el sitio, sin tener que recurrir al laboratorio, lo que conllevaría a mayor tiempo de espera, que en la mayoría de los casos no se cuenta, por la celeridad de las obras [1], de acuerdo la normativa ASTM D 2922 [7]. Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Datos de las propiedades físicas del suelo de la sub-rasante de la vía Portoviejo-Manta

Abscisa	Calicata	Densidad Húmeda Natural de la Subrasante (kg/m ³)	Densidad Seca Natural de la Subrasante (kg/m ³)	Contenido de Agua Natural
0+030	C-1	1704	1316	29,5
1+000	C-3	1933	1613	19,8
2+010	C-5	1716	1215	41,2
,02+990	C-7	1911	1593	20,0
3+900	C-9	1637	1145	43,0
5+000	C-11	1988	1684	18,0
6+000	C-13	1780	1306	36,4
7+000	C-15	1652	1351	22,3
8+000	C-17	2068	1781	16,1
9+000	C-19	1814	1537	18,0
10+000	C-21	1807	1489	21,3
11+000	C-23	1849	1505	22,9
12+020	C-25	1532	1192	28,5
13+020	C-27	1718	1342	28,1
14+080	C-29	1510	1609	41,2
15+000	C-31	1222	929	31,6
16+000	C-33	1910	1818	47,3
17+030	C-35	1451	970	49,5
17+980	C-37	1653	1179	40,3
19+090	C-39	1629	1162	40,2
20+000	C-41	1459	1043	39,9



21+000	C-43	1841	1441	27,8
21+980	C-45	1869	1609	16,2
23+040	C-47	1857	1496	24,1
24+100	C-49	1519	1257	20,9
25+000	C-51	1635	1276	28,1
26+025	C-53	1838	1499	22,7
26+500	C-54	1750	1400	25,0
27+100	C-55	1659	1517	9,30
27+500	C-56	1584	1157	36,9

Luego de haber obtenidos los datos antes expuestos se ejecutó el ensayo *CBR* en campo, este se realiza para evaluar la calidad de respuesta del suelo de la sub-rasante, también es aplicable para sub-base, probado en el lugar por la carga de penetración del suelo, dicho ensayo se adapta a los procedimientos viables y sus condiciones en campo. Este ensayo consiste en la aplicación de carga para obtener los esfuerzos requeridos provocando la penetración en el suelo, los procedimientos a seguir deben ser los Normados en la ASTM D 4429 [5]. A continuación, se presenta los valores obtenidos mediante el ensayo *CBR* en la Tabla 3.

Tabla 3. *Valores de CBR 0,1" y CBR 0,2"*

Abscisa	CBR 0,1	CBR 0,2
0+030	4,10	4,60
1+000	10,8	11,0
2+010	3,20	3,20
2+990	5,70	5,10
3+900	0,30	0,20
5+000	6,70	6,50
6+000	1,60	1,30
7+000	7,00	6,30
8+000	11,4	11,6
9+000	2,90	2,50
10+000	7,00	9,50
11+000	0,00	0,00
12+020	13,60	16,50
13+020	3,20	3,20
14+080	3,20	3,00
15+000	2,90	2,50
16+000	2,20	2,10
17+030	2,50	2,50
17+980	5,10	4,60
19+090	10,8	11,4
20+000	3,80	4,00
21+000	3,50	4,00
21+980	8,90	10,80
23+040	0,00	0,00
24+100	14,30	7,20
25+000	13,90	12,70
26+025	2,90	3,80
26+500	17,40	14,10
27+100	23,80	22,60
27+500	1,60	1,30

El ensayo con *DCP* se realiza in situ con la ayuda del dispositivo de cono de penetración, se utiliza por la facilidad y practicidad con respecto a los ensayos convencionales en campo, es



una herramienta útil y confiable siempre que se realice un adecuado uso e interpretación. En este sentido se comprende que el ensayo *DCP* consiste en medir la penetración dinámica provocada por golpe, representando la resistencia al corte in situ de los materiales, por lo tanto, es indicado para evaluar la resistencia del material bajo las condiciones existentes, se rige bajo la normativa ASTM D 6951 [6]. A continuación, se presentan los valores en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores de *CBR 0,1"* y *CBR 0,2"*

Abscisa	Calicata	DCP
0+030	C-1	9,38
1+000	C-3	12,00
2+010	C-5	22,22
2+990	C-7	12,50
3+900	C-9	25,00
5+000	C-11	15,00
6+000	C-13	87,50
7+000	C-15	8,89
8+000	C-17	11,54
9+000	C-19	125,00
10+000	C-21	17,86
11+000	C-23	5,17
12+020	C-25	8,33
13+020	C-27	23,33
14+080	C-29	37,50
15+000	C-31	37,50
16+000	C-33	42,86
17+030	C-35	31,82
17+980	C-37	25,00
19+090	C-39	14,86
20+000	C-41	50,00
21+000	C-43	17,24
21+980	C-45	15,71
23+040	C-47	2,86
24+100	C-49	18,42
25+000	C-51	20,27
26+025	C-53	7,58
26+500	C-54	27,78
27+100	C-55	6,41
27+500	C-56	33,33

3.3. Ensayos de Laboratorio

Se realizaron ensayos físicos que tienen como objetivo caracterizar el material, definiendo propiedades que son particulares de cada suelo. En la Tabla 5 se puede apreciar los diferentes ensayos a realizados con su respectiva normativa.



Tabla 5. Normas ASTM para la ejecución de ensayos. Fuente: [11]

Ensayo (Propiedad a determinar)	Normativa
Granulometría por tamizado	ASTM-442
Clasificación AASHTO	ASTM-3282
Clasificación SUCS	ASTM-2487
Limite Líquido	ASTM-4318
Limite Plástico	ASTM-4318

Dado que el objeto de estudio es evaluar las características del suelo de sub-rasante de la vía Portoviejo-Manta, se procedió a ensayar las muestras de suelo recolectadas a diferentes profundidades en el laboratorio para determinar: contenido de humedad, límite líquido, límite plástico, y granulometría. Con los datos obtenidos se realizó la clasificación AASHTO y SUCS [8]. Una vez superada la etapa de ensayos se procedió al análisis estadístico de datos, donde se aplicó la teoría de ajuste mediante regresión lineal. Así mismo, para validar el tamaño de la muestra y los resultados en las ecuaciones obtenidas, se aplicó pruebas de significación y contraste de hipótesis [9] mediante el software RStudio [10], considerando como condición de validación el p-valor menor a 0,05.

A partir de este análisis se obtuvo dos ecuaciones de correlación exponencial entre el penetrómetro dinámico de cono *DCP* y el ensayo de relación de soporte de California *CBR* al 0,1” y 0,2” en campo respectivamente. Adicional a la correlación antes mencionada se llevó a cabo la correlación múltiple lineal entre el ensayo *CBR* al 0,1” y 0,2” en campo y el *DCP*, además de los parámetros físicos del suelo de sub-rasante como contenido de agua, densidad natural, y granulometría). Mediante un análisis ANOVA se determinó que los parámetros físicos influyen de manera considerable en la obtención del *CBR* in situ. Posterior a lo antes planteado, se llevó a cabo un análisis estadístico mediante el método de diferencia de medias el cual corroborará si la correlación es aplicable en otras zonas. Estas correlaciones se establecieron mediante un análisis estadístico, tanto de regresión lineal simple, como de regresión lineal múltiple tomando en cuenta el coeficiente de correlación *R*, el cual determina si la correlación puede ser empleada o no para el caso de estudio.

4. RESULTADOS

Sobre la validez de los resultados obtenidos en campo, a través de los ensayos de *DCP*, *CBR*, densidad y contenido de agua por método nuclear, el valor de *CBR* in situ se obtuvo con la fórmula proporcionada por la norma ASTM D 6951 [6], a partir de los datos generados por el ensayo *DCP*. Para tal efecto, se presenta la Tabla 6 la cual indica el número de sondeos superficiales, el porcentaje de grava, el porcentaje de arena, porcentaje de finos, así como el valor que se obtuvo del *DCP* y los valores de *CBR* 0.1 y *CBR* 0.2.

Tabla 6. Valores de % Grava, % Arena, % Finos y CBR 0.1", 0.2"

Calicata	%Grava	%Arena	%Finos	DCP	CBR 0,1	CBR 0,2
C-1	41,6	23,6	34,8	9,38	4,1	4,6
C-3	54,6	22,0	23,4	12,00	10,8	11,0
C-5	16,7	11,2	72,1	22,22	3,2	3,2
C-7	NP	NP	NP	12,50	5,7	5,1
C-9	5,0	9,6	85,4	25,00	0,3	0,2
C-11	16,9	16,6	66,5	15,00	6,7	6,5
C-13	6,9	26,9	66,3	87,50	1,6	1,3
C-15	0,3	10,5	89,3	8,89	7,0	6,3
C-17	NP	NP	NP	11,54	11,4	11,6
C-19	NP	NP	NP	125,00	2,9	2,5
C-21	12,0	31,7	56,2	17,86	7,0	9,5
C-23	NP	NP	NP	5,17	0,0	0,0
C-25	15,5	37,5	47,1	8,33	13,6	16,5
C-27	15,2	33,0	51,8	23,33	3,2	3,2
C-29	NP	NP	NP	37,50	3,2	3,0
C-31	0,0	15,7	84,3	37,50	2,9	2,5
C-33	0,0	17,3	60,4	42,86	2,2	2,1
C-35	3,0	45,2	51,8	31,82	2,5	2,5
C-37	0,2	11,8	88,0	25,00	5,1	4,6
C-39	21,1	32,2	46,8	14,86	10,8	11,4
C-41	0,0	23,2	76,8	50,00	3,8	4,0
C-43	NP	NP	NP	17,24	3,5	4,0
C-45	NP	NP	NP	15,71	8,9	10,8
C-47	0,0	21,5	78,5	2,86	0,0	0,0
C-49	1,7	27,6	70,7	18,42	14,3	7,2
C-51	NP	NP	NP	20,27	13,9	12,7
C-53	NP	NP	NP	7,58	2,9	3,8
C-54	0,7	25,8	73,5	27,78	17,4	14,1
C-55	NP	NP	NP	6,41	23,8	22,6
C-56	0,0	6,7	93,3	33,33	1,6	1,3

En base a los datos de granulometría obtenidos en laboratorio se procedió a clasificar el suelo por el método SUCS [8] y AASHTO [12], se presenta en la Tabla 7 con los resultados obtenidos:

Tabla 7. Clasificación SUCS y AASHTO del suelo que constituye la sub-rasante de la vía Portoviejo-Manta

Abscisa	Calicata	Clasificación SUCS	Clasificación AASHTO
0+030	C-1	CH	A-2-7
0+500	C-2	CL	A-6
1+000	C-3	CH	A-2-7
1+500	C-4	CH	A-7-5
2+000	C-5	CH	A-7-5
2+560	C-6	CH	A-2-6
3+600	C-8	CH	A-7-5
3+900	C-9	CH	A-7-5
4+600	C-10	CH	A-7-5
5+000	C-11	CH	A-7-5
5+550	C-12	NP	NP
6+000	C-13	CH	A-7-6
6+500	C-14	CH	A-7-5
7+000	C-15	CH	A-7-5
7+500	C-16	NP	NP



8+000	C-17	NP	NP
8+500	C-18	CH	A-7-5
9+000	C-19	NP	NP
9+524	C-20	CL	A6
10+000	C-21	MH	A-7-5
10+500	C-22	CH	A-7-5
11+000	C-23	NP	NP
11+510	C-24	MH	A-7-5
12+020	C-25	CL	A-7-6
12+500	C-26	CL	A-7-6
13+020	C-27	CL	A-7-5
14+500	C-30	CL	A-7-6
15+000	C-31	CL	A-7-6
15+500	C-32	CL	A-7-6
16+000	C-33	CH	A-7-6
16+530	C-34	MH	A-7-6
17+030	C-35	CL	A-7-6
17+500	C-36	CH	A-7-6
17+980	C-37	CH	A-7-6
18+570	C-38	CH	A-7-6
19+090	C-39	CL	A-7-6
19+500	C-40	CL	A-7-6
20+000	C-41	ML	A-7-6
20+570	C-42	CH	A-7-6
21+000	C-43	NP	NP
21+500	C-44	CL	A-7-6
21+980	C-45	NP	NP
22+480	C-46	NP	NP
23+040	C-47	CH	A-7-6
23+535	C-48	NP	NP
24+100	C-49	CL	A-7-6
24+500	C-50	NP	NP
25+000	C-51	NP	NP
25+500	C-52	NP	NP
26+025	C-53	NP	NP
26+500	C-54	CL	A-7-6
27+100	C-55	NP	NP
27+500	C-56	CH	A-7-6

Como resultado de la Clasificación SUCS se puede apreciar un mayor porcentaje de arcilla de alta y baja plasticidad, como se muestra en la Figura 3.

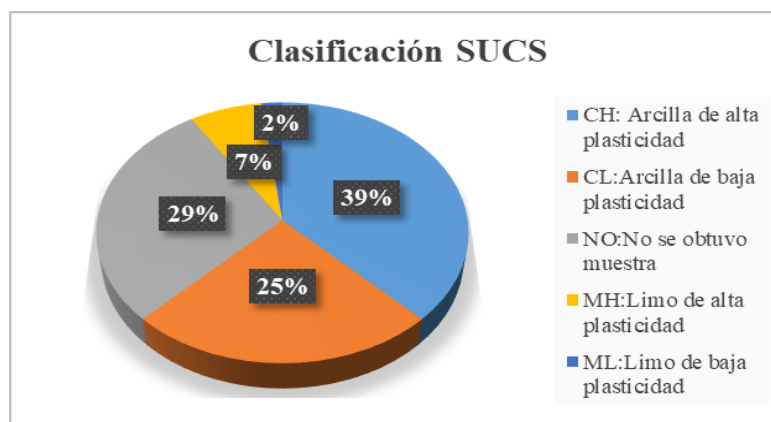


Figura 3. Clasificación SUCS del suelo de la sub-rasante de la vía Portoviejo–Manta. Fuente: los autores

Mientras que, por la clasificación AASHTO se obtuvo en mayor porcentaje de arcillas con

calificación de regular a malo, como se muestra en Figura 4.

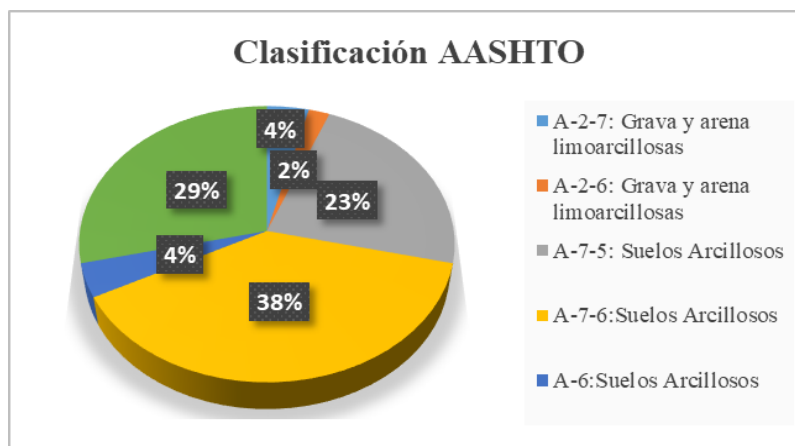


Figura 4. Clasificación AASHTO del suelo de la sub-rasante de la vía Portoviejo – Manta. Fuente: los autores
 Previo a la obtención de las correlaciones se procede a realizar un análisis ANOVA con el fin de determinar que parámetros intervienen directamente en el cálculo del *CBR*, teniendo como resultado que la variable física densidad no es influyente en la deducción del mismo, además se procedió a eliminar varios datos atípicos, al no presentar una distribución normal ya que afectaría el propósito de la investigación. A continuación, se presenta la Tabla 8.

Tabla 8. Valores empleados para encontrar la correlación

CBR 0,1"	CBR 0,2"	DCP	Contenido Humedad	Finos	Grava
10,8	10,9	12,0	19,8	23,4	54,64
3,1	3,2	22,2	41,2	72,1	16,67
6,7	6,5	15,0	18,0	66,5	16,92
6,9	9,5	17,8	21,3	56,2	12,0
13,6	16,5	8,3	28,5	47,1	15,5
3,1	3,2	23,3	28,1	51,8	15,2
2,9	2,5	37,5	31,6	84,3	0,0
2,2	2,1	42,8	47,3	60,4	0,0
2,5	2,5	31,8	49,5	51,8	2,9
5,1	4,6	25,0	40,3	87,9	0,2
10,8	11,4	14,8	40,2	46,8	21,1
2,0	2,0	33,3	36,9	93,3	0,0

Para demostrar la correlación simple existente entre el ensayo *CBR* versus *DCP*, además de la correlación múltiple entre los mismos, se sumó los parámetros físicos del suelo: contenido de humedad, % de grava, % de arena, % de finos. Además, para un suelo de sub-rasante, es necesario tener en cuenta los siguientes parámetros estadísticos como son: coeficiente de correlación *R2* en conjunto con el p-valor, los dos parámetros antes mencionados determinan el grado de correlación entre las variables y su fiabilidad. Las correlaciones fueron realizadas por el método de mínimos cuadrados, se comparó las tendencias lineal, exponencial,

logarítmica y polinómica, dando como resultado una tendencia exponencial como el mejor ajuste para la correlación simple, mientras que para la correlación múltiple se asume un mejor ajuste con una exponencial. Las ecuaciones encontradas con los datos que se muestra en la Tabla 7 corresponden a:

1. Función exponencial (1), en la que la variable independiente es el *DCP* y la variable dependiente es *CBR-0.1*". Se tiene $CBR=17,884*exp-0,028DCP$. Coeficiente de correlación: $R^2=0,80$; p -valor: $7,246x10^{-5}$. A continuación se presenta la Figura 5:

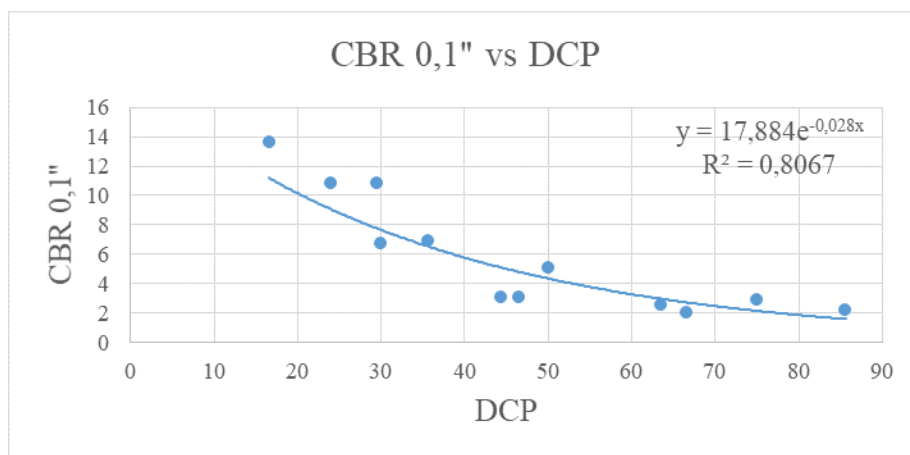


Figura 5. Función Exponencial (1). Fuente: los autores

2. Función polinómica (1), en el que la variable independiente es el *DCP* y la variable dependiente es el *CBR-0.2*". Donde $CBR=21,395*exp-0,032DCP$. Coeficiente de correlación: $R^2=0,82$; p -valor: $3,821x10^{-5}$. A continuación, se presenta la Figura 6:

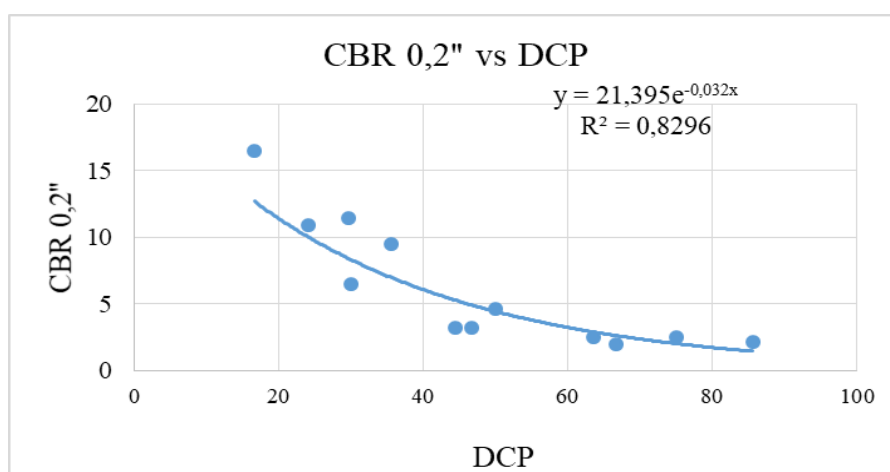


Figura 6. Función Polinómica (1). Fuente: los autores

3. Función múltiple lineal (1), en el que las variables independientes son el *DCP*, contenido de humedad, % grava, % de finos y la variable dependiente es el *CBR-0.1*". Se tiene $CBR= 28,97173*exp (-(-0,026553*DCP) -(0,00251*contenido de humedad) -$

$(0,006708*Finos) - (0,005040*Grava))$ Coeficiente de correlación: $R^2=0,82$; p -valor: $0,0091$. A continuación, se presenta la Figura 7.

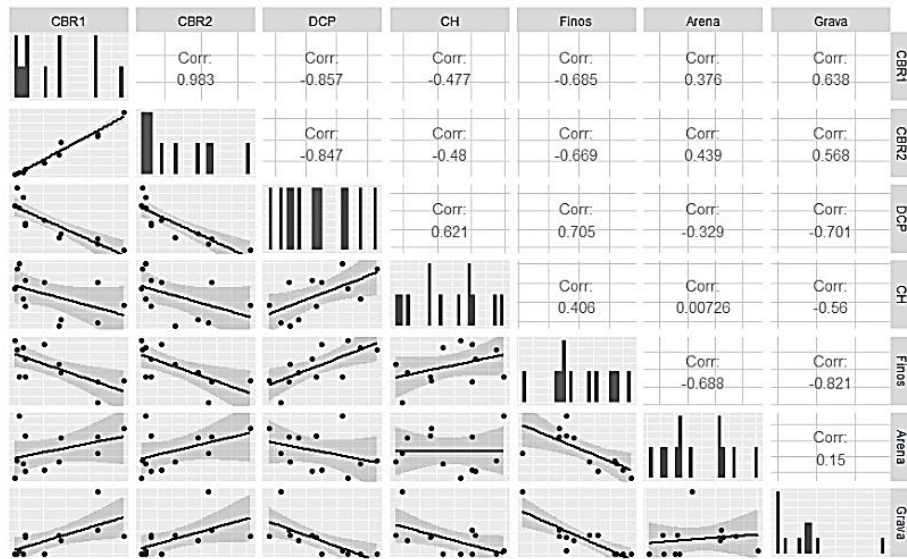


Figura 7. Función Múltiple Lineal (1). Fuente: los autores

4. Función múltiple lineal (2), el cual las variables independientes son el DCP, contenido de humedad, % grava, % de finos y la variable dependiente es el CBR-0.2". Se tiene: $CBR = 55,77653 * \exp(-0,030318 * DCP) - (0,005405 * \text{contenido de humedad}) - (0,01093 * Finos) - (0,012225 * Grava)$. Coeficiente de correlación: $R^2=0,86$; p -valor: $0,0039$. A continuación, se presenta la Figura 8.

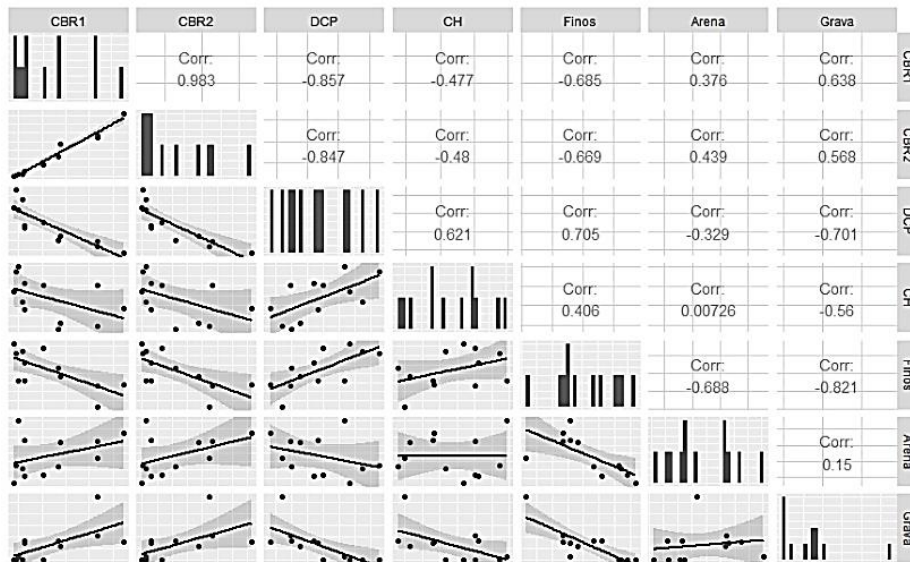


Figura 8. Función Múltiple Lineal (2). Fuente: los autores

Ecuaciones propuestas por la norma ASTM D 6951 [6]:

La ecuación (1) es válida para todo tipo de suelos, excepto aquellos clasificados como arcillas

de baja compresibilidad *CL* con *CBR* menor a 10 y suelos clasificados como arcilla de alta compresibilidad *CH*.

$$CBR = \frac{292}{DCP^{1.12}} \quad (1)$$

Para los suelos tipo Arcilla de baja compresibilidad *CL*. Con $CBR < 10\%$, se debe utilizar la ecuación (2).

$$CBR = \frac{1}{(0.017019 * DCP)^2} \quad (2)$$

En el caso de suelos tipo arcillas de alta compresibilidad *CH* se utiliza la ecuación (3).

$$CBR = \frac{1}{0.002871 * DCP} \quad (3)$$

A continuación, se muestra el cálculo del *CBR* aplicando la ecuación (3) de la ASTM D 6951 [6] y la comparación con las ecuaciones obtenidas en la presente investigación, representadas en la función exponencial (1) y la función múltiple lineal (1), tal como se indica en la Tabla 9.

Tabla 9. Valores empleados para encontrar la correlación

DCP	Ec. Norma ASTM D-6951 (CBR)	Función Exponencial 1 (CBR)	Función Múltiple 1 (CBR)
24,0	14,5	9,07	9,46
44,4	7,8	5,10	4,56
30,0	11,6	7,66	7,34
35,6	5,3	6,54	6,89
16,6	12,6	11,19	11,70
46,6	1,6	4,79	5,13
75,0	0,6	2,15	2,08
85,6	4,1	1,59	1,77
63,6	0,9	2,96	3,29
50,0	7,0	4,35	3,85
29,6	3,9	7,75	7,84
66,6	5,2	2,72	2,41

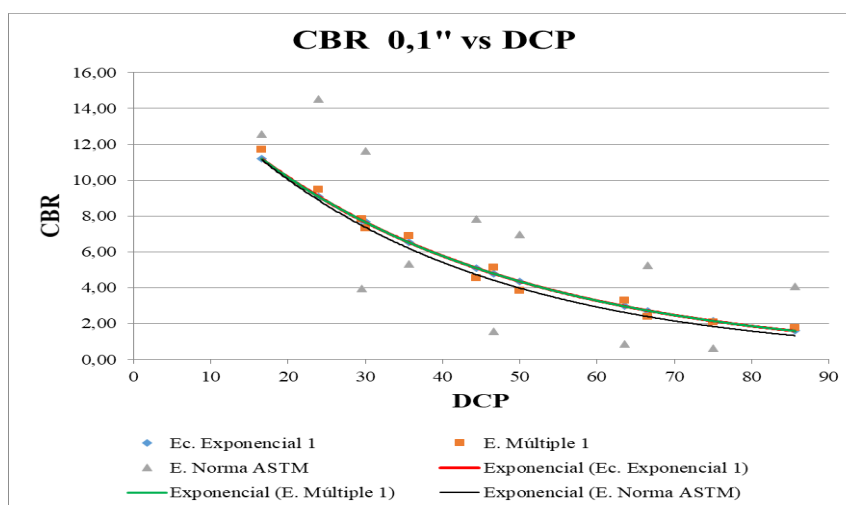


Figura 9. Análisis comparativo (1) *CBR* vs *DCP*. Fuente: los autores

Análisis comparativo entre la función exponencial 1, función múltiple 1, y ecuación propuesta por la norma ASTM D 6951 [6] representada mediante una nube de puntos para el análisis de dispersión indicado en Figura 9, manteniendo constantes las pendientes DCP. De lo cual se destaca que los resultados de las ecuaciones locales presentan tendencias y comportamiento similar, como se indica en la Tabla 10.

Tabla 10. Comparación de resultados (CBR-0.2") con la ecuación de la Norma ASTM D 6951

DCP	Ec. Norma ASTM D-6951-03 (CBR)	Función Exponencial 2 (CBR)	Función Múltiple 2 (CBR)
24,0	14,5	10,04	9,61
44,4	7,8	5,28	4,31
30,0	11,6	8,31	8,01
35,6	5,3	6,97	7,89
16,6	12,6	12,68	14,29
46,6	1,6	4,93	5,50
75,0	0,6	2,01	1,93
85,6	4,1	1,44	1,67
63,6	0,9	2,88	3,40
50,0	7,0	4,43	3,76
29,6	3,9	8,42	8,48
66,6	5,2	2,62	2,19

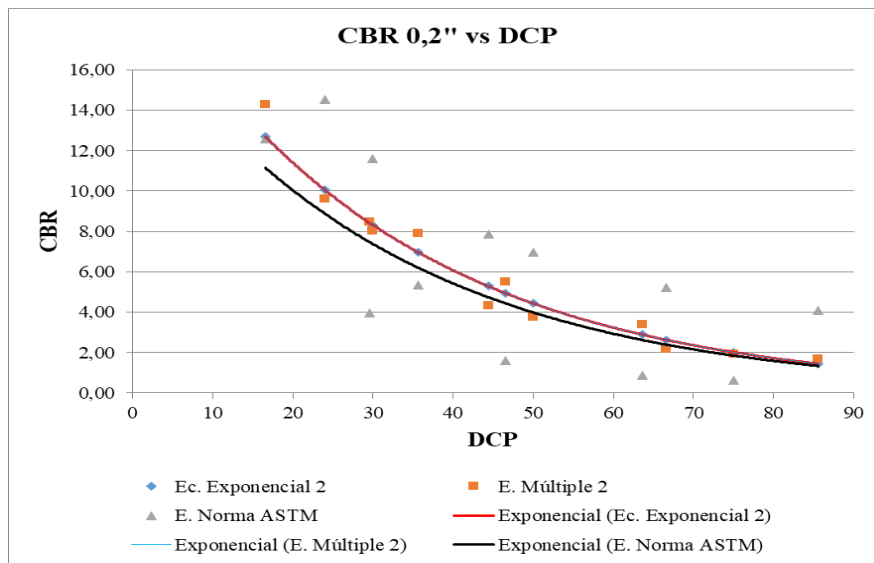


Figura 10. Análisis comparativo (2) CBR vs DCP. Fuente: los autores

En la Tabla 11 y Tabla 12, se muestran los resultados de las pruebas de hipótesis y análisis muestral mediante la prueba t, entre los resultados de las ecuaciones de la norma ASTM 6951 [6] y aquellos obtenidos por nuestras ecuaciones propuestas, con lo cual se demuestra la validez y la confiabilidad de las ecuaciones.

Tabla 11. Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales para la función múltiple (1)

	Ec. Norma	Fn. Múltiple 1 (CBR)
Media	6,26082608	5,525229152
Varianza	21,3085747	9,892104459
Observaciones	12,0000000	12,000000000



Varianza agrupada	15,6003396
Diferencia hipotética de las medias	0,0000000
Gados de libertad	22,0000000
Estadístico t	0,45619288
P(T<=t) una cola	0,32636141
Valor critico de t (una cola)	1,71714437
P(T<=t) dos colas	0,65272281
Valor critico de t (dos colas)	2,07387307

Tabla 12. Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales para la función múltiple (2)

	Ec. Norma	Fn. Múltiple 2 (CBR)
Media	6,260826079	5,919351661
Varianza	21,30857469	14,57169532
Observaciones	12,00000000	12,00000000
Varianza agrupada	17,94013500	
Diferencia hipotética de las medias	0,0000000	
Gados de libertad	22,0000000	
Estadístico t	0,197479011	
P(T<=t) una cola	0,422632951	
Valor critico de t (una cola)	1,717144374	
P(T<=t) dos colas	0,845265902	
Valor critico de t (dos colas)	2,073873068	

5. CONCLUSIONES

Luego del análisis y discusión de resultados se concluye:

Las correlaciones presentadas en esta investigación, permitirán emplear la utilización del ensayo de penetración dinámica de cono *DCP* para determinar el valor soporte del suelo *CBR* de campo de los suelos clasificados como arcillas de baja y alta compresibilidad, para la vía Manta - Portoviejo y de la provincia de Manabí.

Todas las correlaciones presentadas presentan valores aceptables, alta significancia y confiabilidad como se lo demuestra en el análisis maestral y el p-valor menor a 0,05. En relación a la significancia y relación entre variables ANOVA, se destacan las funciones exponenciales directas entre *DCP* y *CBR*, y con menor grado de significancia aquellas que relaciona al *CBR* con *DCP*, y las propiedades físicas: % de finos, % de grava y % contenido de humedad.

Los resultados que expresan tanto las ecuaciones ASTM, como las obtenidos en las ecuaciones locales para arcillas resultan similares y dentro de la misma nube de puntos, sin embargo, no presentan un patrón definido de proporcionalidad. Finalmente se recomienda el uso de las funciones directas y múltiples correspondientes a 0.2” de penetración ya que representan el mayor grado de significancia.

6. REFERENCIAS

- [1] S. Guerrón, «Comparación de resultados de densidad de campo por los métodos cono y arena, volumétrico y densímetro nuclear» Trabajo de grado, Universidad Central del
- Revista Gaceta Técnica. Artículo de Investigación. 21(1), 27-43, enero-junio, 2020*
 ISSN 1856-9560 (Impreso) ISSN: 2477-9539 (Internet) Depósito Legal pp 1999907LA22 ppi201602LA4730



Ecuador, Ecuador, 2013

- [2] J. Auqui y D. Ramírez, «Guía práctica para el diseño estructural de carreteras» Trabajo de Titulación, Universidad Politécnica Salesiana, 2019
- [3] AASHTO 2002, «Guide for Design of Pavement Structures» American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2002
- [4] AASHTO2008, «Mechanistic Empirical Pavement Design Guide» American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2008
- [5] ASTM D 4429, «Standard Test Methods for CBR (California Bearing Ratio) of Soils in place» American Society of Materials, West Conshohocken, PA, 2004
- [6] ASTM D 6951, «Standard Test Methods for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications» American Society of Materials, West Conshohocken, PA, 2003
- [7] ATSM D 2922, «Standard Test Methods for Density of Soil and soil-aggregate in place by nuclear methods. Shallow depth» American Society of Materials, West Conshohocken, PA, 2012
- [8] ASTM D 2487, «Standard Test Methods for Classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)» American Society of Materials, West Conshohocken, PA, 2017
- [9] E. Cobo, J. Cortés y J. González, «Prueba de significación y contraste de hipótesis» Departamento de Estadística e Investigación Operativa, Universidad Politécnica de Cataluña, 2014
- [10] RStudio, «Open source and enterprise-ready professional software for data science» 2016
- [11] American Society for Testing and Materials, ASTM, «Annual Book of ASTM Standards», Estados Unidos, Pensilvania, 2016
- [12] ASTM D 3282, «Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes» American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2015