

Estudio del fenómeno del crushing en el ensayo de compactación de un proctor normal aplicado al terreno ubicado al NW del Centro Comercial Guatapurí en Valledupar (Cesar)

Study of the crushing phenomenon in the compact test of a normal proctor applied to the land located at the N-W of the Guatapurí Mall in Valledupar (Cesar)

Ronal Enrique Molina Cabarcas¹, Elías Ernesto Rojas Martínez², Sergio Andrés Trujillo Trespalcios³, Dino Carmelo Manco Jaraba⁴

1. Ingeniero geólogo, Fundación Universitaria del Área Andina, Semillero de Investigación Geológico Minero, Valledupar. Colombia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2027-1620>.

2. Geólogo, Esp. Minería a Cielo Abierto, Fundación Universitaria del Área Andina, Grupo de Investigación en Ingeniería Geológica, Valledupar. Colombia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0402-1565>.

3. Ingeniero geólogo, Fundación Universitaria del Área Andina, Semillero de Investigación Geológico Minero, Valledupar. Colombia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3760-6850>.

4. M. Sc. Gestión Ambiental y Energética en las Organizaciones, Dirección de Investigación Universidad de La Guajira, Riohacha. Colombia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8506-094X>.

Email: dinomancojaraba@gmail.com

Cite this article as: R. E. Molina Cabarcas, E. E. Rojas Martínez, S. A. Trujillo Trespalcios, D. C. Manco Jaraba "Estudio del fenómeno del crushing en el ensayo de compactación de un proctor normal aplicado al terreno ubicado al NW del Centro Comercial Guatapurí en Valledupar (Cesar)", *Prospectiva*, Vol 17, N° 2, 60-65, 2019.

Recibido: 07/12/2018 / Aceptado: 20/06/2019

<http://dx.doi.org/10.15665/rp.v17i2.1911>

RESUMEN

En la ejecución de obras civiles, es necesario realizar procesos de compactación del terreno para aumentar su resistencia a grandes presiones y disminuir así su capacidad de deformación donde se pueda generar el fenómeno del crushing, muy común en obras civiles, pero a su vez poco evaluado; el crushing, ocurre cuando las partículas del suelo se agrietan o se disgregan al soportar altas presiones. Se plantea estudiar el fenómeno del crushing en el terreno ubicado al NW del Centro Comercial Guatapurí en Valledupar (Cesar), con base a muestreos tomados a profundidades mayores a un metro, en cantidades aproximadas a 30 kg de suelos, empleándose el método C establecido por la norma I.N.V.E-141-07. Resultando un aumento significativo en la densidad máxima del suelo de 2,23 lb/ft² y una disminución en la humedad óptima del 0,2 %, concluyendo que los suelos tienden a mostrar diferencia en las resistencias finales significativas. Es de esperar que la energía aplicada en la particulación seca, se gaste en gran parte al romper la estructura inicial de suelo, disgregándolos, sin lograr acomodamiento, por lo que al aplicar mayor humedad se logra distribuciones más uniformes de agua en los grumos.

Palabra claves: Compactación; Crushing; Deformación; Obras civiles; Terreno.

ABSTRACT

In the execution of civil works, it is necessary to carry out compaction processes of the land to increase its resistance to high pressures and thus diminish its deformation capacity where the crushing phenomenon can be generated, very common in civil works but at the same time poorly evaluated; Crushing occurs when soil particles crack or disintegrate when bearing high pressures. It is proposed to study the phenomenon of crushing in the land located NW of the Commercial Center Guatapurí in Valledupar (Cesar), based on samples taken at depths greater than one meter, in approximate quantities to 30 kg of soil, using method C established by the standard INVE-141-07. Resulting in a significant increase in maximum soil density of 2.23 lb / ft² and a decrease in optimum humidity of 0.2%, concluding that soils tend to show difference in significant final resistances. It is expected that the energy applied in the dry particulate will be spent to a large extent by breaking the initial structure of the soil, disintegrating them, without achieving accommodation, so that by applying greater humidity, more uniform water distributions are obtained in the lumps.

Key Words: Civil work; Crushing; Compaction; Deformation; Land.

1. INTRODUCCIÓN

El suelo es una acumulación de sedimentos no consolidados de partículas sólidas, derivados de erosión de las rocas, detritos y materia orgánica como resultado de la acumulación de restos de seres vivos productos de descomposición por acción de microbiana; transportados por agentes erosivos [1].

En la realización de obras civiles se deben implementar procesos de compactación del terreno para aumentar su resistencia a grandes presiones y disminuir su capacidad de deformación, [2] en donde se puede generar el fenómeno del crushing muy común en obras civiles, pero poco evaluado ya sea por falta de conocimientos, por evadir parámetros de normatividad o sencillamente por circunstancias normales durante el progreso de la obra. El crushing ocurre cuando el suelo se agrieta o se disgrega al soportar altas presiones generando variaciones en su densidad y porcentaje de humedad. Así mismo, es importante destacar que el fenómeno de crushing no es detectable a simple vista, siendo necesario la realización de ensayos tipo proctor, con el objeto de determinar claramente los riesgos estructurales que pueden incurrir, por un mal procedimiento de compactación del terreno.

Esta investigación tiene como objeto evaluar el fenómeno crushing en un terreno ubicado al NW de la ciudad de Valledupar a partir ensayos de compactación tipo proctor normal, consistente en compactar una porción determinada de suelo extraído, en un cilindro de volumen conocido, haciendo variar la humedad para así obtener una curva que relaciona la humedad óptima y la densidad seca máxima a determinada energía o golpes de compactación, posteriormente se varía la energía de compactación, con el fin de determinar las afectaciones y consecuencias del efecto crushing.

1.1 Bases Teóricas

El comportamiento de los suelos compactados depende de su densidad seca máxima y de su contenido de agua [3].

Valledupar se encuentra situado sobre un abanico aluvial el cual lleva su mismo nombre, con una extensión de unos 10 km, desde el ápice hasta su parte distal, originado por el Río Guatapurí; constituido por cantos y bloques angulares a subredondeados de hasta 3 m de diámetros, de composición en su mayoría por rocas ígneas plutónicas, volcánicas, volcansedimentarias y limolitas rojizas, embebidos en una matriz areno lodosa [4].

La resistencia mecánica del suelo es un indicador de compactación, para su medición se emplean penetrómetros y penetrógrafos que calcula la fuerza necesaria para hincar un cono estándar en el suelo. La resistencia a la penetración (RP), es una medida indirecta de la fuerza que requieren las raíces para intruir los poros o los canales existentes en el sus-

trato, deformando su estructura y avanzar en el medio poroso con el fin de brindar soporte y absorber nutrientes y agua [5].

1.2 Formación del Suelo

Las rocas dan un aporte masivo de minerales en la generación de suelos; los organismos también constituyen un factor importante; la formación de suelos se origina a partir de rocas en gran proporción y en menor proporción de restos vegetales y animales [6]. La influencia de las rocas en los componentes y propiedades de los suelos es muy marcada para los suelos jóvenes, pero esta relación se va volviendo cada vez menos evidente conforme va transcurriendo el tiempo, la cual está marcado por:

Composición mineralógica: Aquellas rocas que contengan abundantes minerales inestables evolucionarán fácil y rápidamente para formar suelos, mientras que otras, como las areniscas, que contienen minerales muy estables, como el cuarzo, apenas si llegan a edificarse, aunque estén expuestas durante largo tiempo a la meteorización [6].

Permeabilidad: Regula la penetración y circulación del aire y del agua, lo que va a condicionar de un modo decisivo la fragmentación, alteración y translocación de los materiales [7].

Granulometría: Es un parámetro de suma importancia, pues el tamaño de las partículas de los componentes de la roca es un parámetro que determina la edificación de estos materiales y su posterior comportamiento en conjunto. [8]

Clima: La acción del clima en la formación del suelo radica en que el clima regula el aporte de agua al suelo, así como su temperatura. [9]

Transporte: Por la acción de la gravedad, en el relieve se produce el transporte de todo tipo de materiales que se trasladan pendiente abajo. Dependiendo de su posición en el paisaje, el suelo se ve sometido a erosión o acumulación. [10]

Características hídricas: El relieve también influye en la cantidad de agua que accede y pasa a través del suelo [9].

Acciones de los organismos: Básicamente los organismos ejercen tres acciones fundamentales [10]:

- Constituyen la fuente de material original para la fracción orgánica del suelo. Restos vegetales y animales que al morir se incorporan al suelo y sufren transformaciones.
- Ejercen importantes acciones de alteración de los materiales edáficos, transformando los constituyentes del suelo al extraer los nutrientes imprescindibles para su ciclo vital.
- Producen una intensa mezcla de los materiales del suelo como resultado de su actividad biológica [10].

El tiempo como factor formador: El suelo, se origina por una serie de procesos y cada uno de ellos se desarrolla con diferente velocidad. Como consecuencia las propiedades del suelo, son resultado de la actuación de los procesos, que se manifiestan de modo desigual. [11]

1.3 Composición Mineralógica del Suelo

Se pueden identificar más de 400 mil diferentes minerales en la corteza terrestre. Existe una distinción entre los minerales que son constituyentes esenciales de las rocas dándole su nombre petrográfico y los que son accesorios que se encuentran en pequeñas cantidades, pero su presencia o ausencia no influye en el nombre de la roca. Las rocas también contienen minerales secundarios, que son aquellos que resultan de la descomposición de los minerales esenciales por acción del agua. Como resultado de la meteorización y proceso de sedimentación, estos minerales que poseen las rocas llegan a formar parte del suelo [12].

Los minerales más comunes que pueden encontrarse en el suelo son:

Feldespatos: Los feldespatos forman un grupo grande de minerales monoclinicos, triclinicos y son un componente importante de algunos tipos de rocas. Abundante en granitos y sienitas, generalmente su color varía de blanco a rosado [13]. El feldespato se considera un material moderadamente duro.

Cuarzo: Es un mineral muy común, constituyente esencial de rocas ígneas félsicas y otras rocas, comúnmente tiene un color translucido a blanco lechoso, y es uno de los más resistentes a la meteorización [14].

Minerales ferro-magnesianos: Corresponden al grupo de los silicatos que contienen tanto hierro como magnesio. Este grupo contiene las variedades de: piroxenos, anfíboles, hornblenda y olivino. Estos minerales abundan en las rocas ígneas básicas ultrabásicas, tienen tonalidades oscuras y moderada dureza [13].

Mica: Son un grupo de minerales monoclinicos en forma de hojuelas o láminas delgadas translucidas, generalmente está presente en los granitos y rocas ácidas. Entre las variedades de mica se encuentran: la moscovita que tiene láminas plateadas y la biotita que tiene hojuela gris oscuro o negro [15].

Óxidos de hierro: Constituyen minerales accesorios de las rocas, son minerales que contienen hierro (Fe_2O_3), entre los cuales se encuentran la limonita, hematita, y magnetita. Aunque se presentan en menor cantidad estos minerales dan un distintivo color rustico a las rocas y suelos. [15]

Minerales secundarios: Tienen su origen en la alteración de minerales preexistentes, entre los cuales están: los minerales del grupo de las arcillas, la calcita, dolomita, clorita y otros [6].

1.4 Procedencia de Suelo

El suelo proviene de la descomposición de la roca madre, definiéndose como roca madre aquella sobre la que se desarrolla el suelo y cuya disgregación aporta la parte mineral. La descomposición se debe al clima que la rodea. Los minerales representados en un suelo están en valores entre el 45% y 49%, pero dentro de la fase sólida un suelo posee entre un 90% a 99% de minerales y un 1% a 10% de materia orgánica, siendo ésta fase la más representativa por su estabilidad [11].

1.5 Conceptos Fundamentales

Proctor normal: La compactación consiste en un proceso repetitivo, cuyo objetivo es conseguir una densidad específica para una relación óptima de agua, a fin de garantizar las características mecánicas necesarias de resistencia del suelo [15]. El procedimiento consiste en situar una primera capa de suelo base granular dentro de un recipiente, se compacta de manera uniforme con un martillo proporcionando golpes de presión, posteriormente se sitúan capas similares a la primera y se continúa compactando, hasta alcanzar un nivel determinado. Luego se repite en varias ocasiones este procedimiento variando la cantidad de agua aplicada, y se compara finalmente los resultados obtenidos a partir del ensayo en una curva (esfuerzo vs. deformación), donde el pico más alto establece el contenido de humedad óptima al que el suelo llega a la densidad seca máxima. Realizar la compactación genera ventajas como el aumento de la capacidad para soportar cargas, e impedir el hundimiento del suelo, reduciendo el escurrimiento del agua, el esponjamiento y la contracción del suelo [16].

Crushing: Es el efecto consecuente de la fracturación de las partículas debido a la aplicación de cargas constantes de magnitud suficiente para desarticular las cadenas generadas por la compactación misma, es un sobre-apisonamiento del suelo, se hace evidente en suelos granulares y se incrementa por la angularidad, la composición mineralógica, la relación de vacíos, la presencia de agua, entre otros [17].

Humedad óptima: Dentro del suelo es aquella con la que se consigue la máxima densidad seca, para la energía de compactación indicada [18].

Relación de vacíos: Es la relación del volumen de vacíos (V_v) contra el volumen de sólidos (V_s). Cabe destacar que, en la deformación bajo esfuerzo cortante, las arenas sueltas disminuyen su volumen y, por lo tanto, su relación de vacíos, en tanto que en las arenas compactadas ambos aumentan [16].

Mineralogía del suelo: Los minerales que componen el suelo pueden ser tan variados como lo sea la naturaleza de las rocas. No obstante, está condicionado por un lado por el fac-

tor composicional, y por otro por el climático que establece la temperatura, la pluviosidad, y la composición de las fases líquida y gaseosa en contacto con el suelo [19].

Angularidad: Es una característica importante dentro de la caracterización del suelo, puesto que determina la forma de las partículas, la textura de la superficie, como se van a agrupar, qué densidad tendrá y cómo se moverá dentro del suelo cuando está sometido a cargas [6].

Porosidad: Es el espacio de suelo que no está ocupado por sólidos y se expresa en porcentajes. Los poros que constituyen el espacio poroso del suelo se encuentran en un rango continuo de tamaño, sin embargo, se dividen usualmente en dos tipos: los macro poros y los micro poros o poros capilares. La tasa de movimiento del agua y del aire a través del suelo es determinada, en gran medida, por el tamaño de los poros [6].

2. TEORÍA/METODOLOGÍA

La investigación es aplicada con un enfoque cuantitativo, con un nivel de investigación descriptiva, explicativa y un diseño de investigación experimental, donde se busca establecer el comportamiento de las partículas del suelo al ser sometido a cargas.

Como población se contó con 3 muestras de suelos obtenidas del terreno ubicado al NW del Centro Comercial Guatapurí con un área de 24,337m², tomadas aleatoriamente con un peso de 10 kg cada una, a más de un metro de profundidad según lo estipulado en la norma I.N.V. E – 141 – 07.

Para realizar el estudio del fenómeno del crushing se siguió la norma Colombiana:

Relaciones de humedad – masa unitaria seca en los suelos (ensayo normal de compactación) I.N.V. E – 141 – 07.

En la primera etapa del estudio, la cual consiste en la realización del Proctor normal, como lo determina la norma anteriormente mencionada para determinar la disposición más conveniente del suelo para que pueda ser sometido a esfuerzos (construcción) y posteriormente se realizó el mismo procedimiento, alterando la metodología al aumentar la cantidad de golpes especificados, para lograr el efecto crushing en la muestra [16].

De los procedimientos alternativos descritos se seleccionó el método C establecido por la norma I.N.V. E – 141 – 07.

Para ello se necesitan hacer las siguientes consideraciones y procedimientos, si la muestra de suelo está húmeda cuando se recibe del terreno, se deberá secar hasta hacerse friable bajo la acción de una espátula. El secado se puede efectuar al aire o por medio de aparatos de secado de manera que la temperatura de la muestra no pase de 60 °C (140 °F).

Rómpanse entonces los terrones de una manera tal, que no se reduzca el tamaño natural de las partículas individuales de la muestra.

Se tamiza una cantidad representativa de suelo pulverizado sobre el tamiz de 19.0 mm (3/4"). Se descarta el material grueso retenido.

Cuando fuese aconsejable, mantener en la muestra el mismo porcentaje de agregado grueso que pasa por el tamiz de 50 mm (2") y queda retenido en el tamiz de 4.75 mm (No.4), para el ensayo humedad-masa unitaria, que, en la muestra original de campo es el material retenido sobre el tamiz 19.0 mm (3/4"), deberá ser reemplazado en la forma siguiente: se tamiza una cantidad adecuada de suelo pulverizado sobre los tamices de 50 mm (2") y 19.0 mm (3/4"). Se pesa el material que pasa tamiz de 50 mm (2") y que queda retenido en el tamiz de 19.0 mm (3/4") y se reemplaza con un peso igual que pase dicho tamiz y que quede retenido en el de 4.75 mm (No.4). Se toma el material para sustitución de la porción sobrante de la muestra, para luego proceder al secado de la muestra y compactación [15].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el proceso de investigación se considera de gran importancia destacar que la falla de una partícula bajo un efecto de fuerzas de compresión, es realmente una falla bajo tensión [20].

Al aplicar los ensayos se obtuvieron los siguientes resultados.

Peso muestra húmeda = 238,3 gr (A)

Peso muestra seca con taza = 266,4 gr (B)

Peso taza = 62,6 gr (C)

Humedad Natural = 9,8%

Área del cilindro = $\pi \times r^2$ $r = 5,05$ cm $h = 11,6$ cm

Área del cilindro = 80,11 cm²

Volumen del cilindro = Área del cilindro x altura del cilindro

Volumen del cilindro = 929,374 cm³ = 0,0328 ft³

Peso muestra húmeda / (Humedad del horno / 100) + 1 = peso muestra seca

Muestra seca 1 = 1580,90 gr = 3,48 lb

Muestra seca 2 = 1687,70 gr = 3,72 lb

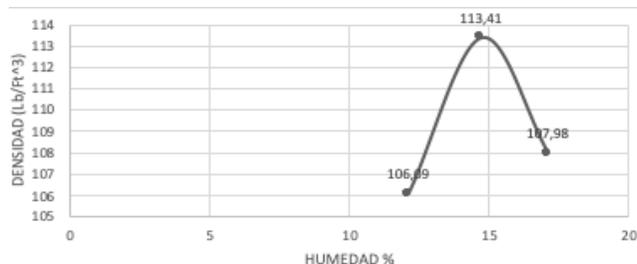
Muestra seca 3 = 1609,90 gr = 3,54 lb

De los ensayos tipo proctor efectuados, se adquirieron los siguientes resultados (Tabla 1, Tabla 2) (Figuras 1 y 2).

Tabla 1. Resultados del ensayo proctor normal.
Table 1. Results of the normal proctor test.

Resultado del proctor normal			
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
# De Golpes	25	25	25
Humedad deseada	12.3%	14.8%	17.3%
Humedad natural	9.8	9.8%	9.8%
Humedad adicional	2.5	5%	7.5%
Peso muestra húmeda	3000 gr	3000 gr	3000 gr
Peso muestra seca	2732.2 gr	2732.2 gr	2732.2 gr
Agua adicional (CM³)	68.3 cm³	136.6 cm³	204.4 cm³
Peso muestra húmeda + molde	3546.6 gr	3710.2 gr	3659.3 gr
Peso molde	1774.4 gr	1774.4 gr	1774.4 gr
Peso muestra húmeda	1772.2 gr	1935.8 gr	1884.9 gr
Humedad horno	12.1%	14.7 %	17.1%
Peso muestra seca (Gr)	1580.9 gr	1687.7 gr	1606.9 gr
Peso muestra seca (Lb)	3.48 lb	3.72 lb	3.72 lb
Volumen del cilindro (Ft³)	0.0328 ft³	0.0328 ft³	0.0328 ft³
Densidad (Lb/Ft³)	106.09 lb/ft³	113.41 lb/ft³	107.98 lb/ft³

Figura 1. Representación del contenido de humedad y densidad de la muestra.
Figure 1. Representation of moisture content and density of the sample.



Densidad max = 113,41lb/ft³ (2) / Humedad óptima = 14,9 %

Tabla 2. Resultados del ensayo del proctor con crushing.
Table 2. Results of the proctor trial with crushing.

Resultado del proctor normal			
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
# de Golpes	50	50	50
Peso muestra húmeda crushing	3635.3	3748.1	3689.9
Humedad horno	12.1%	14.7%	17.1%
Peso muestra seca (Gr)	1660.03 gr	1720.74 gr	1635.78 gr
Peso muestra seca(Lb)	3659 lb	3.793 lb	3.606 lb
Volumen del cilindro (Ft³)	0.0328 ft³	0.0328 ft³	0.0328 ft³
Densidad (Lb/Ft³)	111.55 lb/ft³	115.64 lb/ft³	109.93lb/ft³

Figura 2. Resultados del ensayo Proctor con crushing graficados en curva representativas de contenido de humedad y densidad de la muestra de suelo.
Figure 2. Results of the Proctor test with crushing curve graphs representative of moisture content and density of the soil sample.



Densidad max = 115,64 lb/ft³ (3) / Humedad óptima = 14,7 %

Se logra apreciar un cambio significativo en la relación existente entre la densidad máxima y la humedad óptima durante los ensayos de tipo proctor normal con y sin crushing, presentándose una variación de valores que representan un cambio de comportamiento del suelo luego de haber sobrepasado su estado de máxima compactación, ya que la compresión es comúnmente acompañada por cierta cantidad de rotura de granos, mostrando así en el suelo con partículas angulosas más compresión y más rotura de granos que en el suelo con partículas redondeadas. El suelo de mayor partículas angulosas muestra variación en su granulometría, después de la afectación por la compresión ejercida al momento de la sobre compactación, generándose un cambio en la relación densidad humedad, causando un aumento en la densidad seca máxima y una disminución en la humedad óptima, reflejando la variación en el comportamiento del terreno, que ya no se podría seguir evaluando de la misma manera, debido a que su comportamiento plástico no sería el mismo y podría causar consecuencias en obras futuras en el área.

4. CONCLUSIONES

Un suelo que está sometido a cargas repetidas de forma uniforme y constante sufre particulación, conllevando a una variación en el porcentaje final de humedad óptima y de la densidad seca máxima disminuyendo y aumentando respectivamente.

Es necesaria una cantidad correcta de agua para que las partículas del suelo o de agregados se deslicen unas con otras. El agua actúa como un lubricante, en caso de que exista mucha agua en el suelo, ocupará los espacios entre las partículas y evitará que permanezcan juntas. Lo que significa que el efecto crushing influye considerablemente en esta deducción al alterar directamente la cantidad de humedad óptima presente en el suelo.

Se puede decir que los suelos con grumos más gruesos tienden a mostrar diferencia en las resistencias finales significativas. Es de esperar que la energía aplicada en la particulación seca se gaste en gran parte al romper esa estructura inicial de suelo, disgregándolos, pero aparentemente sin lograr acomodarlos mejor, por lo que al aplicar mayor humedad se logran seguramente distribuciones más uniformes de agua en los grumos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos al ingeniero de minas Daniel Morales, profesor e investigador de la Facultad de Ingeniería de la Fundación Universitaria del Área Andina; por sus importantes e invaluable aportes en la finalización de esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- [1] G. Duque, C. Escobar, “Geomecánica para ingenieros”. En: origen formación y constitución del suelo, fisicoquímica de las arcillas, ed.; Universidad Nacional, 2009, p. 11-28
- [2] H. Arslan, G. Baykal, S. Sture, Analysis of the influence of crushing on the behavior of granular materials under shear, *Revista Granular Matter*, 11 (2), pp 87–97, 2009.
- [3] E. Alonso (2016) Suelos compactados en la teoría y en la práctica [Internet], Universidad Politécnica de Cataluña / España. Disponible desde: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779573409891/SuelosCompTeoPrat.pdf> [Acceso 6 de febrero de 2019]
- [4] Armenta, J. (2007). Evaluación del potencial del agua subterránea para riego de los sistemas acuíferos cono aluvial y llanura aluvial de Valledupar, departamento del cesar. [Internet] Ideam.gov.co. Disponible desde: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/15022/INFORME+FINAL+CONVENIO+047+2004++DICIEMBRE+-+2007.pdf/b2a37cea-374a-405b-9d55-808b2fbbd380> [Acceso 6 de Febrero de 2019].
- [5] C. Cortes, J. Camacho-Tamayo, F. Leiva. “Análisis multivariado del comportamiento espacial y temporal de la resistencia del suelo a la penetración. *acta agronómica*”, *Revista Acta Agronómica*. 62 (3), p 268-278, 2013.
- [6] D. Jaramillo, Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia, 2002, pp. 1-619
- [7] Dorronsoro, C. (2005). Introducción a la edafología. [Internet] Cidetmoodle.pedagogica.edu.co. Disponible desde: http://cidetmoodle.pedagogica.edu.co/pluginfile.php/13466/mod_resource/content/1/INTRODUCCION_A_LA_EDAFOLOGIA.pdf [Acceso 23 de Noviembre de 2017].
- [8] Gutiérrez, L. (2003). El concreto y otros materiales para la construcción. [Internet] Bdigital.unal.edu.co. Disponible desde: http://bdigital.unal.edu.co/6167/5/9589322824_Parte1.pdf [Acceso 20 de Noviembre de 2017].
- [9] Jaramillo, D. (2002). Introducción a la ciencia del suelo. [Internet] Bdigital.unal.edu.co. Disponible desde: <http://www.bdigital.unal.edu.co/2242/1/70060838.2002.pdf> [Acceso 21 de Noviembre de 2017].
- [10] Geoservidorperu.minam.gob.pe. (2002). Memoria descriptiva del mapa de pendientes y fisiografía de la región Tacna. [Internet] Disponible desde: http://geoservidorperu.minam.gob.pe/geoservidor/Archivos/Mapa/Tacna/Memoria_Descriptiva_Fisiografia.pdf [Acceso 25 de Noviembre de 2017].
- [8] G. Duque, C. Escobar, “Erosión y movimientos en masa”. En: origen formación y constitución del suelo, fisicoquímica de las arcillas, ed.; Universidad Nacional, 2009, p. 124-166.
- [9] M. Chinchilla, A. Alvarado, R. Mata, “Factores formadores y distribución de suelos de la subcuenca del río Pirrís, Talamanca, Costa Rica”, *Agronomía Costarricense* 35(1): 33-57, 2011.
- [10] S. W. Buol, Francis Doan Hole, R. J. McCracken, *Soil genesis and classification*, Iowa State University Press United States, 1973, pp. 1- 360.
- [11] J. Montero. 1999. Minerales y Rocas [Internet], Universidad Nacional de Colombia. Disponible desde: <http://www.docentes.unal.edu.co/jmonteroo/docs/4-5%20Minerales%20-Rocas.pdf> [Acceso 6 de febrero de 2019].
- [12] A. Egger, (2005) Minerales II [Internet], Disponible desde: <https://www.visionlearning.com/es/library/Ciencias-de-la-Tierra/6/Minerales-II/130/qupz/resources> [Acceso 6 de febrero de 2019].
- [13] L. González, Ingeniería Geológica. Madrid, Pearson Editorial, 2002, pp.1-738.
- [14] W. Botía. (2015) Manual de procedimientos de ensayos de suelos y memoria de cálculo. Tesis de Pregrado, Universidad Militar Nueva Granada.
- [15] Salinas, L., Campos, J. and Guardia, G. (2001). Fundamentos de mecánica de suelos. 1st ed. Cochabamba - Bolivia: fundamentos de mecánica de suelos universidad mayor de san simón facultad de ciencias y tecnología, p.19.
- [15] Instituto Nacional de Vías, “Relaciones de humedad – masa unitaria seca en los suelos (ensayo normal de compactación”. En: *Normas y especificaciones 2012 ENVIAS*, ed.; INVIAS. Colombia, p. 365-377.
- [16] K. Kuwajima, M. Hyodo, A. Hyde, “Pile bearing capacity factors and soil crushability”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135 (7), 901-913, 2009.
- [17] L. Ortiz, A. Batista, (2013) Estudio del fenómeno del crushing en el ensayo de compactación de un proctor normal. Tesis de Pregrado, Universidad Católica de Colombia.
- [18] A. Ezaoui, T. Lecompte, H. Di Benedetto, E. Garcia, “Effects of various loading stress paths on the stress-strain properties and on crushability of an industrial soft granular material”, *Granular Matter*, 13 (4), 283–301, 2011.
- [19] C. Escobar, G. Duque “Erosión y movimientos en masa”. En: *Geotecnia para el trópico andino*, ed., Universidad Nacional de Colombia, p. 124-136.
- [20] P. Garnica, J. Antonio, L. Enrique, Efecto de rotura de granos en material de balastro bajo carga repetida. México, Instituto Mexicano de Transporte editores, 1997, pp. 1-124.