

Efecto en las propiedades geotécnicas y compresibilidad de una arcilla expansiva contaminada con gasolina

Norma Patricia CURIEL-IÑIGUEZ^{a,1}, María de la Luz PÉREZ-REA^a, Eduardo ROJAS-GONZÁLES^a, Jaime Moisés HORTA-RANGEL^a, Elda MONTES-ZARAZÚA^b y José Alberto RODRÍGUEZ-MORALES^a

^a*División de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Santiago de Querétaro, México.*

^b*Departamento de Ciencias Ambientales, Centro Interdisciplinario del Noreste de la Universidad de Guanajuato.*

Resumen. El desarrollo económico de muchos países alrededor del mundo se basa en la industria petrolera, esto ha causado un incremento en emergencias ambientales por derrames accidentales de hidrocarburos en el suelo, esto provoca una modificación de sus características físicas y mecánicas. El objetivo de este trabajo consistió en determinar el efecto de la contaminación con gasolina en las propiedades geotécnicas y la compresibilidad de una arcilla de alta compresibilidad (CH) extraída de un predio del estado de Querétaro. Se determinó la gravedad específica, granulometría y límites de Atterberg del suelo natural y contaminado inicialmente en estado seco con 32.88% de gasolina y dejando reposar un periodo de 7 días y otro de 9 meses. En los resultados se observó una disminución en la gravedad específica de 2.599 a 2.534, una ligera modificación en los límites de Atterberg que no modificó su clasificación de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y una disminución en la superficie específica de 661.12 a 587.48 m²/g debido al recubrimiento de gasolina en las partículas del suelo. En las curvas de compresibilidad se obtuvo que el suelo contaminado a corto plazo (7 días) tiene una mayor expansión y que es menos compresible comparándolo con el suelo natural, efecto que se ve contrarrestado a largo plazo (9 meses). La contaminación con gasolina a corto o largo plazo le atribuye la capacidad de recuperación al suelo, presentando mayor recuperación de deformación el suelo contaminado que el suelo natural.

Palabras Clave. Hidrocarburo, contaminación, gasolina, propiedades geotécnicas, compresibilidad, arcilla, expansión, deformación.

1. Introducción

El aumento en el consumo de petróleo y sus derivados a aumento por el incremento en la población mundial en los últimos años, debido a que la economía de muchos países alrededor del mundo, incluyendo México, que se centra en la industria petrolera [1,2], esto ha causado que las actividades de extracción, refinamiento y transporte de hidrocarburos aumenten, así como la necesidad de más centros de almacenamiento, lo

¹ Autor de correspondencia: nopacu.14@gmail.com.

que ha llevado a que la posibilidad de que fugas o derrames de hidrocarburos en el suelo incremente en todo el mundo[2]. La contaminación del suelo puede causarse por fugas en tuberías o en instalaciones de transporte de petróleo, accidentes en tanques, derrames en talleres mecánicos durante la reparación y mantenimiento a automóviles y maquinaria de construcción, etcétera [3].

La persistencia del hidrocarburo en el suelo aumenta cuanto más pequeño es el tamaño de partícula, debido a ello se considera importante revisar la modificación de las propiedades de los suelos finos contaminados con hidrocarburos [4]. Los estudios acerca de las alteraciones en las propiedades geotécnicas y mecánicas del suelo contaminado con algún hidrocarburo, manifiestan la importancia de continuar haciendo investigaciones acerca del tema, debido a que se ha encontrado que el hidrocarburo altera las propiedades físicas del suelo lo que conduce a problemas geotécnicos relacionados con la construcción, principalmente en la estructura de cimentación en sitios contaminados [5, 6, 7].

Ocampo et al. [5] y Nasehi et al. [8] estudiaron una arena limosa (SM) y una arena costera contaminadas con gasolina y petróleo, respectivamente, reportando un aumento en el contenido de arcillas y mayor cantidad de finos en las curvas granulométricas de los suelos contaminados. En contraste Ijimdiya [9] estudió una arcilla de baja compresibilidad (CL) contaminada con aceite de motor y observó en las curvas granulométricas una reducción en el porcentaje de finos con el aumento en el contenido del aceite.

En los estudios realizados por Olchawa y Kumor [10], Kermani y Ebadi [11], Antonio Zárate [12], Pusadkar y Bharambe [2] y Nasehi et al. [10] en suelos arcillosos y limosos contaminados artificialmente con petróleo, diésel y gasóleo, reportan que los valores del límite líquido (LL) y el límite plástico (LP) aumentan con el incremento en el porcentaje de contaminación, Khosravi et al. [13] en una arcilla de baja compresibilidad (CL) contaminada con diésel observó un incremento en el LL y una disminución en el LP, además Pusadkar y Bharambe [2] concluyen que en una arcilla el límite de contracción aumenta cuando se contamina con diésel o petróleo.

Por otro lado Khosravi et al. [13] y Cabello-Suárez et al. [14] investigaron una arcilla de baja compresibilidad (CL) y una arcilla de alta compresibilidad (CH) contaminadas con diésel en ambos estudios, encontraron una disminución en el índice de compresibilidad (C_c), por lo que el suelo contaminado se vuelve menos deformable. Amaziah [15] observó una disminución en el coeficiente de consolidación (C_v) en un suelo arcilloso cuando se contaminaba con petróleo crudo, el proceso de consolidación de suelo se logra en un tiempo más largo en el suelo contaminado que en el suelo natural.

Las discrepancias en las investigaciones se deben a la metodología usada. Los trabajos de construcción en suelos contaminados aumentan el riesgo e incrementan los costos de construcción [16], por lo que investigar suelos contaminados pueden usarse con fines geotécnicos beneficiando a los ingenieros a tomar decisiones en el reciclaje o la reutilización de suelos contaminados [10].

Para presente trabajo se estudió la modificación en las propiedades geotécnicas de una arcilla expansiva contaminada con gasolina, estudiando dos tiempos de exposición al contaminante elegidos en base a las limitantes del proyecto en cuanto a tiempo y equipo, se eligió un periodo de 7 días, semejando el corto plazo, y un periodo de 9 meses, semejando el largo plazo. Además de que en investigaciones se encontró que el periodo de equilibrio cuando el fluido es un hidrocarburo es entre 3-7 días [13].

2. Metodología

2.1. Materiales

El suelo usado se extrajo del fraccionamiento Jurica, en el estado de Querétaro, México. Se realizó un pozo a cielo abierto hasta una profundidad de 2.75 m, se tomaron muestras alteradas de arcilla en costales y una muestra inalterada para obtener las propiedades naturales del suelo. Es necesario puntualizar que el sitio de muestreo no se encuentra contaminado, ni fue contaminado durante la presente investigación. La gasolina usada para este estudio fue gasolina con 87% de octanaje.

2.2. Métodos

2.2.1. Propiedades geotécnicas suelo natural

De la muestra inalterada se obtuvo la humedad del suelo natural, masa volumétrica, relación de vacíos, porosidad y grado de saturación. La muestra alterada de suelo se secó al aire libre, se disgregó y cuarteo, después se obtuvo la gravedad específica, los límites de Atterberg, la granulometría por tamizado y por hidrómetro, la superficie específica, el potencial de hidrógeno y la materia orgánica del suelo; se definió la clasificación SUCS del suelo y la actividad de las arcillas, basándose principalmente en los procesos estandarizados descritos en las normas ASTM y NMX.

2.2.2. Consolidación unidimensional del suelo natural

Se siguió el procedimiento descrito en la norma ASTM D 2435-03, por el Método de prueba B, en muestras remoldeadas de suelo, confinadas y con flujo en cara superior e inferior. Con los datos de la humedad natural, masa volumétrica del suelo natural y volumen del anillo de consolidación se calculó la cantidad de suelo a compactar en el anillo, después se colocó en el consolidómetro, se agregó la carga de sitio correspondiente a 50 kPa aproximadamente, se esperó que la muestra se estabilizara, enseguida se prosiguió a la saturación de la muestra con agua destilada, las lecturas de deformación se tomaron a los 20, 30, 40, 50 segundos, 1, 2, 5, 5, 10, 15, 30 minutos, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 24 horas y de ahí cada 24 horas para cada incremento de carga de 50, 100, 200, 400 y 800 kPa. Después de la estabilización con la última se prosiguió a realizar la descarga para formar la curva de recuperación del suelo y después de descargar se obtuvo la humedad de la muestra.

2.2.3. Contaminación del suelo con gasolina con 87% de octanaje

Se tomó una porción del suelo de la muestra alterada se secó en el horno a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 48 horas aproximadamente, se colocó en bolsas de plástico para evitar que absorbiera humedad del ambiente y después se realizó la contaminación con un porcentaje de gasolina equivalente a la humedad natural del suelo y se estudiaron dos periodos de reposo un de 7 días y otro de 9 meses. El porcentaje de gasolina remanente en el suelo después del periodo de reposo se obtuvo por pérdida de peso.

2.2.4. Propiedades geotécnicas del suelo contaminado

Después del periodo de reposo del suelo con la gasolina se obtuvo la gravedad específica, los límites de Atterberg, la granulometría por tamizado y por hidrómetro, la superficie específica, el potencial de hidrogeno y la materia orgánica del suelo siguiendo los procesos estandarizados en las normas ASTM y NMX. Se usó agua natural para obtener las propiedades geotécnicas, con estas se definió la clasificación SUCS del suelo contaminado y la actividad de las arcillas.

2.2.5. Consolidación unidimensional del suelo contaminado

Se siguió el procedimiento descrito en la norma ASTM D 2435-03, por el Método de prueba B. El remanente de gasolina en el suelo fue de 12% después de 7 días y 6% después de 9 meses, la gasolina remanente en el suelo forma parte del fluido de poro. El remoldeo del suelo contaminado se hizo basándose en la configuración mostrada en la Figura 1 propuesta por Amaziah [17]. La muestra contaminada fue mezclada con el agua necesaria para que esta sumada al remanente de gasolina fuera equivalente a la humedad natural del suelo. Con los datos de masa volumétrica del suelo natural y volumen del anillo de consolidación se calculó la cantidad de suelo a compactar, enseguida se colocó en el consolidómetro y se siguió el mismo procedimiento usado para el suelo natural, saturando la muestra con agua destilada.

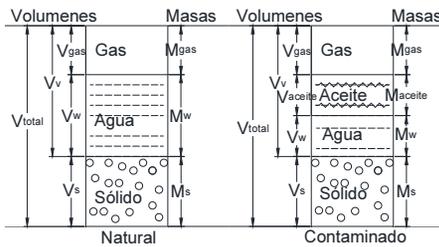


Figura 1. Fases del suelo contaminado y natural de acuerdo a Amaziah [15].

3. Resultados y discusiones

En la Tabla 1 se muestran las propiedades del suelo natural usadas para el remoldeo de muestras para la prueba de consolidación. El valor de la porosidad nos define que se trata de una muestra medianamente densa o firme considerada una arcilla suave, la gravedad específica corresponde a minerales de caolinita o clorita, además de que la masa volumétrica sólida corresponde a una arcilla de acuerdo a Budhu [19] y Das [20].

Tabla 1. Relaciones volumétricas y gravimétricas del suelo natural.

Propiedad	Símbolo	Valor	Unidad
Humedad natural	ω	32.88	%
Masa volumétrica de la muestra	γ_m	17.17	kN/m ³
Masa volumétrica solida	γ_d	12.95	kN/m ³
Gravedad específica	G_s	2.599	
Relación de vacío	e	0.97	
Porosidad	n	49.29	%
Grado de saturación	G_w	87.95	%

En la Tabla 2 se muestran las propiedades geotécnicas del suelo natural y del suelo contaminado con un porcentaje inicial de gasolina con 87% de octanaje de 32.88% con respecto al peso del suelo seco, que después del periodo de reposo de 9 meses el contenido de gasolina resulto de 6%. En la prueba de límites de Atterberg en el suelo contaminado se controló la cantidad de agua agregada, por lo que se tiene el resultado de la prueba y el porcentaje teórico, con lo que se comprueba que en la prueba al agregar agua se remueve parte de la gasolina, y después de la prueba queda gasolina en el suelo.

Tabla 2. Propiedades de suelo natural y suelo contaminado.

Propiedad	Símbolo	Suelo natural	Suelo contaminado	Unidad
Gravedad específica	G _s	2.599	2.534	
Límite líquido	LL	81.33	84.46- 81.41	%
Límite plástico	LP	34.22	38.18- 35.13	%
Índice de plasticidad	I _p	47.12	46.37- 46.28	%
Contracción lineal	CL	20.91	21.24- 18.19	%
Límite de contracción	LC	13.12	13.38	%
Gravas	G	0.48	0.03	%
Arena	S	1.44	1.74	%
Limo	M	35.24	37.36	%
Arcilla	C	62.84	60.87	%
Clasificación SUCS	---	CH	CH	%
Superficie específica	Se	661.12	587.48	m ² /g
Actividad	A	0.75	0.78	
Acidez	pH	7.94	7.66	
Materia orgánica	MO	5.96	12.5	

Como se puede observar en la Tabla 2 la gravedad específica del suelo contaminado disminuye, sin embargo los hidrocarburos no causan una modificación en la mineralogía, por lo que la disminución en la gravedad específica se desprecia y se considera que se debe a la gasolina que queda alrededor de las partículas del suelo, como el peso volumétrico de la gasolina es menor, causa una disminución en la gravedad específica del suelo.

En LL y el LP muestran una variación poco significativa, comparando los valores de la prueba y el resultado teórico se observa que en el suelo contaminado queda aproximadamente un 3% de gasolina después de la prueba. La variación en el LL y el LP causa una disminución en el IP, pero no cambia la clasificación del suelo, el suelo contaminado y natural son una arcilla de alta compresibilidad (CH), sin embargo el suelo contaminado se acerca más a la línea de A de la carta de plasticidad, concluyendo que considerando los límites de Atterberg, el suelo contaminado es menos compresible que el suelo natural.

La granulometría por tamizado y por hidrómetro no presenta variación significativa cuando el suelo se contamina con gasolina. La variación en el porcentaje de arcillas y el IP entre el suelo natural y el contaminado hace que la actividad aumente, pero aún se considera como actividad normal. En el pH del suelo disminuye cuando se contamina con gasolina, se acidifica, lo que coincide con lo encontrado en otros estudios. El incremento de la MO en el suelo contaminado corresponde al porcentaje de gasolina contenido en el suelo.

La superficie específica del suelo disminuye cuando se contamina con gasolina, esto puede deberse a que, al realizar la prueba el azul de metileno no alcanza a cubrir toda la superficie de la partícula de suelo debido se encuentra envuelta por el

hidrocarburo, estos resultados coinciden con lo encontrado en trabajos revisados. Oztoprak y Pisirici [21] concluyeron que esta disminución se debía a la formación de una biopelícula que rodeaba completamente las partículas de suelo y crea partículas más grandes equivalentes.

En la Figura 2 se muestran las curvas de compresibilidad del suelo natural, el suelo contaminado 7 días y el de 9 meses, y en la Tabla 3 se muestran los valores calculados basándose en las curvas de compresibilidad para cada caso estudiado. Como se puede observar en la Tabla 3 la carga de sitio causa mayor deformación inicial en el suelo natural, seguida del suelo contaminado 9 meses y finalmente el suelo contaminado 7 días, también se observa que al saturar la muestra, el suelo contaminado 7 días presenta mayor expansión, seguida del suelo natural y finalmente el suelo contaminado 9 meses.

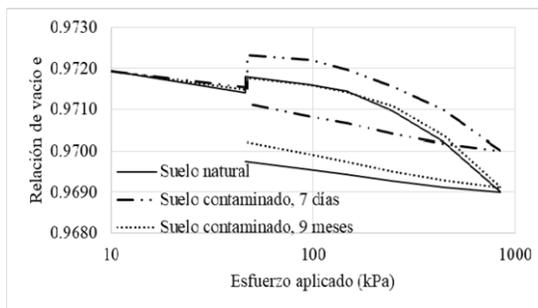


Figura 2. Curvas de compresibilidad del suelo natural, suelo contaminado, 7 días y suelo contaminado, 9 meses.

Tabla 3. Valores calculados basándose en las curvas de compresibilidad.

Propiedad	Símbolo	Suelo natural	Suelo contaminado 7 días	Suelo contaminado 9 meses	Unidad
Deformación aplicando carga de sitio	---	0.0268	0.0201	0.0234	%
Expansión con carga de sitio	---	0.0198	0.0399	0.0155	%
Presión de preconsolidación	σ'_c	243	212	339	kPa
Presión de expansión	σ'_{swe}	153	250	130	kPa
Índice de compresión	Cc	0.0043	0.0034	0.0045	
Índice de recuperación	Cs	0.0006	0.0009	0.0009	
Humedad final	ω_F	40.56	41.68	43.16	%

En la Tabla 3 se observa que la σ'_c es mayor en el suelo contaminado 9 meses, seguida del suelo natural y finalmente el suelo contaminado 7 días, la contaminación con gasolina a corto plazo causa que el suelo aparente haber sido sometido a una carga menor a la real, y a largo plazo el efecto es contrario, se sobreestima el valor de la preconsolidación. En el caso de la presión de expansión es mayor en el suelo contaminado 7 días, seguido del suelo natural y finalmente el suelo contaminado 9 meses, con esto se puede apreciar que el suelo contaminado 7 días necesita una presión más grande para contrarrestar la expansión obtenida después de la saturación de la muestra. El mayor valor de índice de compresión es el del suelo contaminado 9 meses, seguido del suelo natural y finalmente el suelo contaminado 7 días, es menos compresible el suelo contaminado con gasolina a corto plazo. La disminución de la

compresibilidad del suelo puede deberse a que la gasolina tiene un peso volumétrico menor y ocupa mayor espacio. En el índice de recuperación es mayor en el suelo contaminado 7 días, seguida del suelo contaminado 9 meses y finalmente el suelo natural, lo que hace concluir que la gasolina causa que el suelo sea más flexible, y al momento de retirar las cargas tenga mayor recuperación de deformación.

Los valores de deformación al aplicar la carga de sitio, de expansión y de índice de compresión del suelo natural y del suelo contaminado 9 meses son bastante semejantes lo que hace concluir que la modificación en estos valores se revierte a los 9 meses de contaminación.

Al finalizar los ensayos se secaron las muestras de suelo para obtener su humedad final, los valores de la humedad final se muestran en la Tabla 3, la variación de las humedades puede deberse a que aun después del ensayo queda una cantidad de gasolina en el suelo.

4. Conclusiones

La modificación en las propiedades geotécnicas del suelo expansivo debido a su contaminación con gasolina no presentaron variación significativa, la variación que presentó la cantidad de arcilla y el índice plástico modificaron la actividad de la arcilla de 0.75 en el suelo natural a 0.78 en el suelo contaminado, pero continúa siendo una actividad normal. La gasolina causó una disminución en el pH del suelo y un aumento en la materia orgánica. La disminución en la superficie específica del suelo contaminado puede deberse a que las partículas de suelo tienen un recubrimiento de gasolina que evita que el azul de metileno alcance a cubrir toda la superficie de la partícula.

Comparando las curvas de compresibilidad se tiene que el suelo contaminado a 7 días presenta una menor deformación al aplicar la carga de sitio y una mayor expansión cuando se satura la muestra, concluyendo que el suelo contaminado con gasolina a corto plazo (7 días) es menos deformable y más expansivo, esto puede deberse a que la gasolina tiene un peso volumétrico menor que el agua y el aumento en la expansión es causa de que las partículas del suelo tienen mayor afinidad por el agua que por la gasolina, estos procesos se ven revertidos a largo plazo (9 meses), siendo semejantes a los del suelo natural en la prueba de consolidación unidimensional. Visualmente el comportamiento de las curvas de compresibilidad en el tramo de carga del suelo natural y del suelo contaminado 9 meses es semejante, pero en el tramo de descarga los comportamientos observados son diferentes en los tres casos. El valor del índice de compresión calculado en el suelo natural y el suelo contaminado 9 meses es semejante y es mayor al del suelo contaminado 7 días, lo que hace concluir que a corto plazo (7 días) la gasolina en el suelo causa que sea menos compresible, efecto que desaparece a largo plazo (9 meses). Respecto al índice de expansión o de recuperación en el suelo contaminado es mayor que el suelo natural, por lo que se da a entender que la gasolina le atribuye la capacidad de recuperación al suelo. La importancia de la modificación que se presenta en el valor de preconsolidación del suelo contaminado radica en la sobreestimación o subestimación de la capacidad a la que ha sido sometido el suelo, esto afecta directamente el diseño de cimentaciones.

Los resultados presentes en el artículo aplican solo cuando se tienen las condiciones explicadas de los ensayos, en caso de los resultados obtenidos en las curvas de compresibilidad semejanando una condición de sitio sería que el suelo se

contaminara, se estabilizara y enseguida ocurriera un proceso de saturación de suelo por flujo de agua de lluvia, por rotura de tubería de agua potable u otra condición que semeje las condiciones de los ensayos.

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindar un espacio y apoyo económico para el desarrollo de la ciencia y tecnología en el presente trabajo de investigación.

Referencias

- [1] Tosoni, G. A. (2007). “La macroeconomía de los hidrocarburos en México y sus relaciones intersectoriales”, *Problemas del Desarrollo*, 38(150):167–192.
- [2] Pusadkar, S. S. & Barambe P. S. (2014). “Performance of Petrol and Diesel Contaminated Black Cotton Soil”, *International Journal of Engineering Research & Technology*, 3(7):536–539.
- [3] Sabat, A. K. & S. Mohanta. (2017). “Unconfined compressive strength of dolime fine stabilized diesel contaminated expansive soil”, *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8(1):01–08.
- [4] Rodríguez, L. S. (2017). “Impacto geotécnico de los derrames de diésel en suelos finos”, Tesis Maestría, Escuela Colombia de Ingeniería Julio Garavito.
- [5] Ocampo, D., L. Hernández, Y. Valencia, & O. Echeverri. (2010). “Análisis de las alteraciones físicas, químicas, mineralógicas y mecánicas de un suelo residual de Batolito Antioqueño contaminado con gasolina”, *XIII Congreso e VII Seminario Colombiano de Geotecnia*, At Manizales, Colombia.
- [6] Di Matteo, L., F. Bigotti, & R. Ricco. (2011). “Compressibility of Kaolinitic Clay Contaminated by Ethanol-Gasoline Blends”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(9):846–849.
- [7] Joseph, J., & G. Hari. (2015). “Investigation on the Effects of Hydrocarbon Spillage on Soil Properties”, *International Journal of Engineering Research & Technology*, 4(10):136–140.
- [8] Nasehi, S. A., A. Uromeihy, M. R. Nikudel, & A. Morsali. (2016). “Influence of Gas Oil Contamination on Geotechnical Properties of Fine and Coarse-Grained Soils”, *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(1):333–345.
- [9] Ijimdiya, T. S. (2013). “The Effects of Oil Contamination on the Consolidation Properties of Lateritic Soil”, *Development and Applications of Oceanic Engineering*, 2(2):53–59.
- [10] Olchawa, A., & M. Kumor. (2008). “Compressibility of Organic Soils Polluted with Diesel Oil”, *Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, 54(4):299–307.
- [11] Kermani, M., & T. Ebadí. (2012). “The Effect of Oil Contamination on the Geotechnical Properties of Fine-Grained Soils”, *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 21(5):655–671.
- [12] Antonio Zárate, Y. (2014). “Evaluación del impacto de la contaminación con diésel en las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso”, Tesis Maestría, Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería, México.
- [13] Khosravi, E., H. Ghasemzadeh, M. Reza, & H. Yazdani. (2013). “Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite”, *Engineering Geology*, (166):11–16.
- [14] Cabello-Suárez, L. Y., M. L. Pérez-Rea, R. Galaviz-González, E. Rojas, & C. E. Hernández-Mendoza. (2017). “Impact of diesel contamination on the compressibility of a clayey soil”, *13th International Engineering Congress, CONIN 2017*, Publicación IEE.
- [15] Amaziah, W. O. (2010). “Reduction of the Shear Strength of Soils in the Niger delta area of Nigeria due to crude oil production”, *Nigerian Journal of Technology*, 29(2):130–140.
- [16] Pradeepan, V. ., V. Reethi, & N. Namitha. (2016). “Effect of Diesel Contamination on Geotechnical Properties of Clay Near Bpcl”, *International Journal of Engineering Research & Technology*, 7(2):152–158.
- [17] Budhu, M. (2011). *SOIL Mechanics AND Foundations*, 3ra Edición, United States of Arizona.
- [18] Das, B. M. 2001. *Fundamentos de Ingeniería geotécnica*, 1ra Edición, International Thomson, México.
- [19] Oztoprak, S., & B. Pisirici. (2011). “Effects of micro structure changes on the macro behaviour of Istanbul (Turkey) clays exposed to landfill leachate”, *Engineering Geology*, (121):110–122.