

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



**Optimización de la subrasante mediante la incorporación de polietileno de
alta densidad en la ruta Granja Sasape, Túcume**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

AUTOR

Richard Joel Chapoñan Vidaurre

ASESOR

Atilio Ruben Lopez Carranza

<https://orcid.org/0000-0002-3631-2001>

Chiclayo, 2026

**Optimización de la subrasante mediante la incorporación de
polietileno de alta densidad en la ruta Granja Sasape, Túcume**

PRESENTADA POR

Richard Joel Chapoñan Vidaurre

A la Facultad de Ingeniería de la
Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo
para optar el título de
INGENIERO CIVIL

APROBADA POR

Carlos Javier Ramirez Muñoz

PRESIDENTE

Fidel Ortiz Zapata

SECRETARIO

Atilio Ruben Lopez Carranza

VOCAL

Dedicatoria

A mis queridos padres, José Asunción y Mercedes, cuyo amor, sacrificio y apoyo incondicional han sido la columna que ha sostenido mis sueños. Gracias por enseñarme el verdadero valor del esfuerzo y la perseverancia, por estar siempre a mi lado, alentándome a seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles.

A mis hermanas, por ser mi fuente constante de inspiración, cariño y motivación. Cada uno de ustedes ha jugado un papel fundamental en este logro, brindándome su amor, comprensión y apoyo en cada paso de este camino.

Con todo mi corazón, dedico esta tesis a ustedes, que son mi mayor fortaleza.

Agradecimientos

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a Dios, a mi familia y a todas las personas que, de alguna manera, contribuyeron a la realización de esta investigación, brindándome apoyo y motivación para continuar con este trabajo. Mi especial reconocimiento al Ing. Atilio Rubén

López Carranza, mi asesor, por su valiosa guía, por compartir sus conocimientos con paciencia y dedicación, y por ser un pilar fundamental en el desarrollo de esta investigación.

Optimización de la subrasante mediante la incorporación de polietileno de alta densidad en la ruta Granja Sasape, Túcume

 A003

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3618:140981701

Fecha de entrega

29 may 2026, 10:45 GMT-5

Fecha de descarga

29 may 2026, 10:49 GMT-5

Nombre del archivo

Optimización de la subrasante mediante la incorporación de polietileno de alta densidad en la ru....pdf

Tamaño del archivo

4.8 MB

147 páginas

36.029 palabras

198.678 caracteres



Página 1 de 153 - Portada

Identificador de la entrega trn:oid:::3618:140981701



Página 2 de 153 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:oid:::3618:140981701

7% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

- 5%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 5%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Índice

Resumen.....	9
Abstract.....	10
Introducción	11
Revisión De Literatura	15
Antecedentes.....	15
Bases Legales.....	23
Bases Teóricas	33
Materiales y Métodos	47
Tipo y nivel de Investigación	48
Diseño de Investigación.....	48
Población, muestra y muestreo	50
Variables de estudio y Operacionalización.....	53
Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	57
Procedimiento	57
Resultados y Discusiones	61
Referencias bibliográficas	131
Anexos	135

Lista de Tablas

Tabla I: clasificación de suelos según AASHTO [27].....	36
Tabla II: Adaptado de Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos - MTC, 2014 [38].....	40
Tabla III: Tabla para la extracción de calicatas	42
Tabla IV: Tabla de ensayos de laboratorio.....	50
Tabla V: Tabla de porcentajes de HDPE.....	52
Tabla VI: Operacionalización de variables.....	54
Tabla VII: Matriz de consistencia del proyecto a realizar	56
Tabla VIII: Coordenadas UTM de las calicatas realizadas en el tramo de estudio.....	58
Tabla IX: Estudio de IMDA	61
Tabla X: Estudio de IMDA.....	61
Tabla XI: Estudio de tráfico	62
Tabla XII: Resultado de contenido de humedad de muestra natural.....	63
Tabla XIII: Resultado de granulometría de la muestra natural.....	64
Tabla XIV: Resultado de Límite de Atterberg de la muestra natural C1	66
Tabla XV: Resultado de Límite de Atterberg de la muestra natural C2	66
Tabla XVI: Resultado de Límite de Atterberg de la muestra natural C3	67
Tabla XVII: Clasificación de suelo de muestras naturales.....	68
Tabla XVIII: Resultados de Proctor Modificado C-01.....	69
Tabla XIX: Resultados de Proctor Modificado C-02.....	70
Tabla XX: Resultados de Proctor Modificado C-03	70
Tabla XXI: Resultados de CBR – C1	71
Tabla XXII: Resultados de CBR – C2	71
Tabla XXIII: Resultados de CBR – C3.....	71
Tabla XXIV: Resultados de C1- Limite de Atterberg + 2.5% HDPE	72
Tabla XXV: Resultados de C1- Limite de Atterberg + 3% HDPE.....	73
Tabla XXVI: Resultados de C1- Limite de Atterberg + 4% HDPE.....	74
Tabla XXVII: Resultados de C1- Limite de Atterberg + 5% HDPE	75
Tabla XXVIII: Resultados de C1- Limite de Atterberg + 6% HDPE.....	76
Tabla XXIX: Resultados de C2- Limite de Atterberg + 2.5% HDPE.....	77
Tabla XXX: Resultados de C2- Limite de Atterberg + 3% HDPE	78
Tabla XXXI: Resultados de C2- Limite de Atterberg + 4% HDPE.....	79
Tabla XXXII: Resultados de C2- Limite de Atterberg + 5% HDPE	80
Tabla XXXIII: Resultados de C2- Limite de Atterberg + 6% HDPE.....	81
Tabla XXXIV: Resultados de C3- Limite de Atterberg + 2.5% HDPE	82
Tabla XXXV: Resultados de C3- Limite de Atterberg + 3% HDPE.....	83
Tabla XXXVI: Resultados de C3- Limite de Atterberg + 4% HDPE.....	84
Tabla XXXVII: Resultados de C3- Limite de Atterberg + 5% HDPE	85
Tabla XXXVIII: Resultados de C3- Limite de Atterberg + 6% HDPE.....	86
Tabla XXXIX: Resultados de Proctor Modificado C-01 +2.5% HDPE.....	87
Tabla XL: Resultados de Proctor Modificado C-01 +3% HDPE.....	87
Tabla XLI: Resultados de Proctor Modificado C-01 +4% HDPE	88
Tabla XLII: Resultados de Proctor Modificado C-01 +5% HDPE.....	88
Tabla XLIII: Resultados de Proctor Modificado C-01 +6% HDPE	89

Tabla XLIV: Resultados de Proctor Modificado C-02 +2.5% HDPE	89
Tabla XLV: Resultados de Proctor Modificado C-02 +3% HDPE	90
Tabla XLVI: Resultados de Proctor Modificado C-02 +4% HDPE	90
Tabla XLVII: Resultados de Proctor Modificado C-02 +5% HDPE	90
Tabla XLVIII: Resultados de Proctor Modificado C-02 +6% HDPE	91
Tabla XLIX: Resultados de Proctor Modificado C-02 +2.5% HDPE	91
Tabla L: Resultados de Proctor Modificado C-02 +3% HDPE	92
Tabla LI: Resultados de Proctor Modificado C-02 +4% HDPE	92
Tabla LII: Resultados de Proctor Modificado C-02 +5% HDPE	93
Tabla LIII: Resultados de Proctor Modificado C-02 +6% HDPE	93
Tabla LIV: Resultados de CBR – C1 + 2.5% HDPE	94
Tabla LV: Resultados de CBR – C1 + 3% HDPE	95
Tabla LVI: Resultados de CBR – C1 + 4% HDPE	95
Tabla LVII: Resultados de CBR – C1 + 5% HDPE	96
Tabla LVIII: Resultados de CBR – C1 + 6% HDPE	97
Tabla LIX: Resultados de CBR – C2 + 2.5% HDPE	97
Tabla LX: Resultados de CBR – C2 + 3% HDPE	98
Tabla LXI: Resultados de CBR – C2 + 4% HDPE	98
Tabla LXII: Resultados de CBR – C2 + 5% HDPE	99
Tabla LXIII: Resultados de CBR – C2 + 6% HDPE	100
Tabla LXIV: Resultados de CBR – C3 + 2.5% HDPE	100
Tabla LXV: Resultados de CBR – C3 + 3% HDPE	101
Tabla LXVI: Resultados de CBR – C3 + 4% HDPE	102
Tabla LXVII: Resultados de CBR – C3 + 5% HDPE	102
Tabla LXVIII: Resultados de CBR – C3 + 6% HDPE	103
Tabla LXIX: Matriz de Leopold de obtención de HDPE	115
Tabla LXX: Matriz de Leopold de conformación de subrasante con HDPE	116

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1: Estructura de un pavimento.....	41
Ilustración 2: Envases de limpieza y detergentes	46
Ilustración 3: Envases de botellas de leche y jugos	46
Ilustración 4: Tuberías para agua y gas.....	46
Ilustración 5: Tapas de botella y envases	47
Ilustración 6: Contenedores de basura y reciclaje	47
Ilustración 7: Flujograma	49
Ilustración 8: Ubicación de calicatas	58
Ilustración 9: Calicata N°1 – extracción de muestra.....	59
Ilustración 10: Calicata N°2 – extracción de muestra.....	59
Ilustración 11: Calicata N°3 – extracción de muestra	59
Ilustración 12: Aditivo de polietileno de alta densidad reciclado.....	60
Ilustración 13: Curva de granulometría de las 3 calicatas.....	65
Ilustración 14: Gráfica de Límite de Atterberg de muestra natural C1.....	66
Ilustración 15: Gráfica de Límite de Atterberg de muestra natural C2.....	67
Ilustración 16: Gráfica de Límite de Atterberg de muestra natural C3.....	68
Ilustración 17: Gráfica de Límite de Atterberg – C1 (SN +2.5%HDPE)	73
Ilustración 18: Gráfica de Límite de Atterberg – C1 (SN + 3%HDPE)	74
Ilustración 19: Gráfica de Límite de Atterberg – C1 (SN + 4%HDPE)	75
Ilustración 20: Gráfica de Límite de Atterberg – C1 (SN + 5%HDPE)	76
Ilustración 21: Gráfica de Límite de Atterberg – C1 (SN + 6%HDPE)	77
Ilustración 22: Gráfica de Límite de Atterberg – C2 (SN + 2.5%HDPE)	78
Ilustración 23: Gráfica de Límite de Atterberg – C2 (SN + 3%HDPE)	79
Ilustración 24: Gráfica de Límite de Atterberg – C2 (SN + 4%HDPE)	80
Ilustración 25: Gráfica de Límite de Atterberg – C2 (SN + 5%HDPE)	81
Ilustración 26: Gráfica de Límite de Atterberg – C2 (SN + 6%HDPE)	82
Ilustración 27: Gráfica de Límite de Atterberg – C2 (SN + 2.5%HDPE)	83
Ilustración 28: Gráfica de Límite de Atterberg – C2 (SN + 3%HDPE)	84
Ilustración 29: Gráfica de Límite de Atterberg – C2 (SN + 4%HDPE)	85
Ilustración 30: Gráfica de Límite de Atterberg – C2 (SN + 5%HDPE)	86
Ilustración 31: Gráfica de Límite de Atterberg – C2 (SN + 5%HDPE)	87
Ilustración 32: Análisis de precios de SN +4% HDPE	120
Ilustración 33: Análisis de precios de SN + 5% HDPE	120
Ilustración 34: Análisis de precios de SN + 6% HDPE	121
Ilustración 35: Análisis de precios de SN + Cemento portland tipo I.....	122

Resumen

Esta investigación evalúa la viabilidad de incorporar polietileno de alta densidad (HDPE) reciclado para mejorar las propiedades físico-mecánicas de la subrasante en la ruta Granja Sasape, distrito de Túcume. El objetivo general es optimizar la subrasante mediante HDPE, y los objetivos específicos incluyen: el análisis del tránsito para determinar cargas aplicadas, la caracterización del suelo natural, la determinación del porcentaje óptimo de HDPE, la evaluación del comportamiento mecánico mediante CBR, y los análisis ambiental y económico del uso del aditivo. El conteo vehicular manual realizado durante siete días determinó un IMDA de 453 vehículos/día, lo cual, según el MTC, justificó la ejecución de tres calicatas. Los ensayos iniciales mostraron que el suelo corresponde a una arcilla de alta plasticidad (CH – SUCS / A-7-6 – AASHTO), con un índice de plasticidad de 23.68%, densidad seca máxima de 1.74 g/cm³, humedad óptima de 16.8% y CBR de 4.3%, valor inferior al mínimo normativo para subrasantes (6%). La incorporación de HDPE evidenció mejoras significativas en el comportamiento del suelo. Con 4% de HDPE, el índice de plasticidad disminuyó a 8.74%, la humedad óptima se redujo a 14.6% y el CBR alcanzó 10%, superando el requisito normativo. En lo ambiental, se obtuvo un impacto positivo de 260 puntos debido al uso de material reciclado. Finalmente, el análisis económico identificó el 4% como la dosificación óptima, con un costo unitario de 122.02 soles/m³, demostrando eficiencia técnica, económica y sostenible.

Palabras clave: HDPE, subrasante, CBR, pavimento, suelo arcilloso

Abstract

This research evaluates the feasibility of incorporating recycled high-density polyethylene (HDPE) to improve the physical-mechanical properties of the subgrade along the Granja Sasape route, in the district of Túcume. The main objective is to optimize the subgrade through the use of HDPE, while the specific objectives include: traffic analysis to determine applied loads, characterization of the natural soil, determination of the optimal HDPE dosage, evaluation of the mechanical behavior using the CBR test, and environmental and economic assessments of the additive's application. A manual traffic count performed over seven consecutive days determined an ADT of 453 vehicles/day, which, according to MTC standards, justified the execution of three test pits. Initial laboratory results classified the natural soil as high-plasticity clay (CH – SUCS / A-7-6 – AASHTO), with a plasticity index of 23.68%, maximum dry density of 1.74 g/cm³, optimum moisture content of 16.8%, and CBR of 4.3%, a value below the minimum requirement (6%) for subgrades. The incorporation of HDPE demonstrated significant improvements in soil performance. With a 4% HDPE dosage, the plasticity index decreased to 8.74%, the optimum moisture content reduced to 14.6%, and the CBR increased to 10%, exceeding normative standards. The environmental evaluation showed a positive impact score of 260 due to the use of recycled material. Finally, the economic analysis identified 4% HDPE as the optimal dosage, with a unit cost of 122.02 soles/m³, demonstrating technical, economic, and sustainable efficiency.

Keywords: HDPE, subgrade, CBR, pavement, clayey soil

Introducción

El estado de las infraestructuras viales en el Perú, especialmente en las zonas rurales y de difícil acceso, presenta serias deficiencias asociadas a la baja capacidad portante de los suelos subrasantes, donde predominan los suelos arcillosos con alta plasticidad y sensibilidad a la humedad. Estas condiciones geotécnicas inestables provocan deformaciones, agrietamientos y deterioro prematuro en las capas estructurales del pavimento, afectando su resistencia y reduciendo significativamente su vida útil[1]. La combinación de cargas vehiculares continuas y factores climáticos adversos, como las lluvias estacionales, agrava el problema, generando fallas tempranas que incrementan los costos de mantenimiento y dificultan la conectividad y el desarrollo socioeconómico de las comunidades rurales. A su vez, un número significativo de países presentan problemas que enfrentan graves dificultades en la conservación y durabilidad de sus infraestructuras viales debido a la presencia de suelos arcillosos en las capas de subrasante.[2]

En India, particularmente en el nordeste (Mizoram), los trabajos geotécnicos han documentado subrasantes arcillosas con valores de CBR muy bajos en estado natural (frecuentemente en el rango de 2–5 %) y altas variaciones de comportamiento ante la humedad. Estas condiciones se traducen en fallas prematuras de pavimentos flexibles, ondas, fisuras longitudinales y deformaciones tras las temporadas húmedas, porque la arcilla pierde rigidez y la capacidad portante se reduce drásticamente. Los informes técnicos y tesis locales señalan que la combinación de pendientes, drenaje deficiente y suelos de alta plasticidad explica la recurrencia de estas fallas, que obligan a intervenciones repetidas y a gastos de mantenimiento elevados.[3]

De igual manera, en Australia, los suelos expansivos constituyen una de las principales causas de deterioro de carreteras y caminos secundarios. En estados como Victoria, Queensland y Australia del Sur, las arcillas reactivas tienden a hincharse con la humedad y a contraerse en temporadas secas, provocando agrietamientos, bombeo de agua y deformaciones diferenciales en la superficie del pavimento. Estas variaciones volumétricas del suelo generan movimientos estructurales que debilitan la subrasante y reducen significativamente la vida útil de las vías. Los informes de los departamentos de transporte australianos advierten que gran parte de las fallas en pavimentos se deben al comportamiento inestable de los suelos arcillosos donde el CBR de subrasante no estabilizada puede ser estar en el 2%, los cuales no garantizan una capacidad de carga uniforme durante el año.[4]

En Estados Unidos, especialmente en los estados del sur como Texas, Louisiana y Florida, los suelos arcillosos expansivos son una causa frecuente de problemas en la infraestructura vial. Estos suelos se caracterizan por su alta sensibilidad a los cambios de humedad, lo que ocasiona asentamientos diferenciales y pérdida de soporte estructural en las subrasantes. Además, se presentan condiciones de subrasante “muy pobres” ($\text{CBR} < 5 \%$) en tramos problemáticos, en zonas costeras y con niveles freáticos elevados, la saturación de las capas inferiores debilita los pavimentos, provocando agrietamientos y deformaciones visibles poco tiempo después de la construcción. Los informes del Federal Highway Administration (FHWA) destacan que las carreteras construidas sobre arcillas expansivas requieren constantes labores de rehabilitación, representando un desafío económico y técnico para los departamentos de transporte estatales.[5]

A nivel nacional, el Perú enfrenta una situación similar, especialmente en zonas donde predominan suelos arcillosos de baja capacidad portante. En la región Loreto, particularmente en la ciudad de Iquitos, los estudios geotécnicos han identificado subrasantes con un comportamiento muy plástico y un bajo valor de CBR ($6\% <$), lo que se traduce en deformaciones permanentes, hundimientos y fisuras en las vías. La alta humedad del ambiente amazónico y las lluvias frecuentes agravan el problema, generando una pérdida progresiva de la estabilidad del pavimento y dificultando la transitabilidad en zonas urbanas y rurales. Estos suelos, al saturarse, pierden rigidez y resistencia, provocando que la capa de rodadura se deteriore en poco tiempo tras su ejecución.[6]

En la región Piura, específicamente en el distrito de La Encantada, provincia de Morropón, la presencia de suelos arcillosos con un alto contenido de limo ha ocasionado serias limitaciones para el desarrollo de obras viales. Las carreteras locales exhiben ondulaciones, grietas y hundimientos durante la temporada de lluvias debido a la escasa capacidad de drenaje y a la alta plasticidad del terreno lo que nos indica que los valores de CBR en estado natural que en varios estudios se ubican por debajo de 6% . Este tipo de suelo presenta una estructura débil que no resiste adecuadamente las cargas del tránsito pesado ni las variaciones de humedad, generando fallas estructurales tempranas y afectando el transporte de productos agrícolas, base económica de la zona.[7]

En la región Lambayeque, en zonas como Cholo Lindo (distrito de Reque, provincia de Chiclayo), los suelos de subrasante presentan un comportamiento similar, caracterizado por una baja densidad natural, alta plasticidad y gran sensibilidad a la humedad. Estas condiciones han generado el deterioro prematuro de varias vías urbanas y rurales, evidenciado en la aparición de baches, fisuras y deformaciones bajo el paso continuo de vehículos. Durante los periodos

lluviosos, la saturación del terreno reduce drásticamente su capacidad de soporte, provocando que la superficie de rodadura pierda uniformidad y estabilidad. Este panorama refleja la persistencia de un problema estructural generalizado en la región, donde los suelos arcillosos constituyen una de las principales causas del mal estado de las carreteras.[8]

En la ciudad de Chiclayo, específicamente en la Urbanización La Primavera, se han identificado suelos arcillosos que presentan características inadecuadas para ser utilizados como subrasante en pavimentos. Estos suelos se distinguen por su alta plasticidad, baja densidad seca natural y escasa capacidad portante, factores que influyen negativamente en el desempeño estructural de las vías. Debido a estas condiciones, los pavimentos construidos sobre dichos suelos experimentan un deterioro prematuro, evidenciado en deformaciones, fisuras y hundimientos que afectan la transitabilidad y reducen su vida útil. Esta problemática se agrava durante las épocas de lluvia, cuando el suelo arcilloso tiende a absorber y retener agua, perdiendo rigidez y aumentando su deformación bajo carga.[9]

En ese contexto, la presente investigación busca analizar el efecto de la incorporación de polietileno de alta densidad (HDPE) reciclado en las propiedades físico-mecánicas de los suelos arcillosos utilizados como subrasante en la ruta Granja Sasape, distrito de Túcume. A partir de esta premisa, surge la siguiente interrogante de investigación: ¿De qué manera influye la incorporación de HDPE reciclado en las propiedades físico-mecánicas de la subrasante en dicha zona?

De esta manera la presente investigación se justifica en el ámbito técnico porque propone una alternativa innovadora para mejorar el desempeño de los suelos arcillosos empleados en subrasantes de pavimentos flexibles mediante la incorporación de polietileno de alta densidad (HDPE). En la ingeniería civil, la calidad del suelo de fundación es determinante para garantizar la capacidad estructural de la vía, ya que una subrasante débil o con baja resistencia ocasiona fallas prematuras como deformaciones, fisuras y baches. Por ello, resulta indispensable explorar materiales y técnicas que optimicen las propiedades físico-mecánicas del suelo, logrando un mejor comportamiento frente a las cargas del tránsito vehicular. El HDPE reciclado, al ser incorporado en proporciones controladas, actúa como un refuerzo que contribuye a la redistribución de esfuerzos, aumentando el soporte y la estabilidad del terreno. De este modo, la investigación aporta conocimiento técnico-científico que puede ser replicado en otros proyectos de pavimentación, fortaleciendo la práctica profesional y la innovación en la ingeniería vial. [10]

La investigación se justifica teóricamente porque demuestra que la incorporación de polietileno de alta densidad (HDPE) reciclado puede mejorar el comportamiento mecánico de

los suelos arcillosos usados en subrasantes. Al integrarse con las partículas del suelo, el HDPE actúa como un refuerzo que aumenta la fricción interna, reduce la plasticidad y mejora la compactación, logrando una base más estable y resistente frente a las cargas del tránsito. De esta manera, se optimiza la capacidad estructural del pavimento y se promueve el uso de materiales reciclados como alternativa técnica sostenible en la ingeniería vial. [11]

En cuanto a la justificación social de la investigación se sustenta en los beneficios directos que genera para la población del sector Granja Sasape, distrito de Túcume, donde el deficiente estado de las vías limita la transitabilidad, la seguridad y el acceso a servicios básicos. Una vía pavimentada con una subrasante optimizada garantiza un tránsito más fluido y seguro, reduciendo el tiempo de desplazamiento y facilitando la conectividad de los habitantes con centros educativos, de salud y de comercio. Además, al mejorar la calidad de la infraestructura vial se incrementa la seguridad de los peatones y conductores, disminuyendo riesgos de accidentes ocasionados por el mal estado del terreno. El estudio, por tanto, no solo representa un avance en la ingeniería, sino también un aporte significativo a la mejora de la calidad de vida de la población, contribuyendo al desarrollo urbano y rural de la zona.[11]

En cuanto a la justificación ambiental de la investigación radica en el aprovechamiento del polietileno de alta densidad reciclado, material que constituye uno de los principales desechos plásticos a nivel mundial y cuya disposición inadecuada genera impactos negativos en suelos, ríos y mares. Incorporar este material en el mejoramiento de suelos para subrasantes no solo ofrece una alternativa técnica viable, sino que también promueve prácticas sostenibles alineadas con la gestión integral de residuos sólidos. De esta manera, se reduce el volumen de plásticos que terminan en vertederos o en el ambiente, contribuyendo a mitigar la contaminación y fomentar la economía circular. Asimismo, la propuesta se enmarca en los lineamientos actuales de desarrollo sostenible y construcción responsable, promoviendo el uso de materiales reciclados en obras civiles como una estrategia para equilibrar el progreso técnico con la preservación del entorno natural.[12]

En la justificación económica se centra en que la incorporación de HDPE reciclado en el mejoramiento de suelos constituye una alternativa de bajo costo frente a otros métodos de estabilización más tradicionales, como el uso de cal o cemento, que demandan mayor inversión. El empleo de un material reciclado reduce los costos de adquisición y transporte, generando un ahorro significativo en la etapa constructiva. Asimismo, al mejorar la resistencia y durabilidad de la subrasante, se prolonga la vida útil del pavimento y se disminuyen los gastos de mantenimiento y rehabilitación, que suelen representar una carga económica considerable para las municipalidades y el Estado. Por lo tanto, esta investigación no solo demuestra la viabilidad

técnica del HDPE, sino que también resalta su potencial como solución económica sostenible, accesible y replicable en proyectos viales de diferentes magnitudes.[13]

En base a lo expuesto el objetivo general de esta investigación es optimizar el desempeño y mejorar las propiedades físico-mecánicas de la subrasante mediante la incorporación de polietileno de alta densidad (HDPE) en la ruta Granja Sasape, Túcume. Para alcanzar esta meta, se establecieron objetivos específicos como: realizar un conteo y análisis de la demanda vehicular en la ruta para establecer datos de carga. Posteriormente, se determinará las propiedades físico-mecánicas del suelo de la ruta para su caracterización inicial. A continuación, se definirá el porcentaje óptimo de HDPE reciclado en diferentes dosificaciones (2.5%, 3%, 4%, 5% y 6%). Seguidamente, se cuantificará las variaciones en las propiedades del suelo arcilloso con HDPE mediante ensayos CBR. Asimismo, se evaluará el impacto ambiental del uso de HDPE en los suelos; y finalmente, se analizará la variación económica que implica su aplicación en la subrasante de pavimentos.

Revisión De Literatura

Antecedentes

Shelema Amena[14] en su tesis titulada “Utilización de residuos plásticos sólidos en las capas de pavimento de subrasante para reducir la contaminación ambiental por plásticos” (2022), tuvo como objetivo evaluar la viabilidad del uso de residuos plásticos sólidos como refuerzo en suelos expansivos empleados en capas de subrasante, buscando simultáneamente mejorar sus propiedades físico-mecánicas y reducir la contaminación ambiental por plásticos. Para ello se emplearon métodos experimentales y se aplicaron ensayos de granulometría, límites de Atterberg, Proctor estándar, resistencia a la compresión no confinada (UCS), ensayo CBR y ensayo de hinchamiento libre, siguiendo normas ASTM. Los porcentajes de plástico incorporados variaron entre 0.25% y 2%. La muestra utilizada correspondió a un suelo arcilloso expansivo de la ciudad de Jimma, Etiopía, clasificado según AASHTO, junto con tiras de plástico. Los resultados del estudio indicaron que la incorporación de hasta un 1.5% del aditivo en el suelo mejoró de manera significativa las propiedades mecánicas, como el índice CBR y la resistencia a la compresión sin confinamiento, al mismo tiempo que redujo el hinchamiento del suelo. Además, la adición de polietileno resultó en una reducción del contenido de humedad óptima y un ligero aumento en la densidad seca máxima del suelo tratado. La investigación concluyó que el uso de desechos plásticos en suelos expansivos no solo es beneficioso desde el

punto de vista de la ingeniería, sino que también representa una solución ecológica para la gestión de residuos plásticos, ayudando a mitigar la contaminación ambiental

Anil et al. [15] en la tesis titulada “Comportamiento de pavimentos flexibles mediante la adición de residuos plásticos” (2022), el objetivo de esta investigación fue analizar el comportamiento estructural y la durabilidad de los pavimentos flexibles mediante la incorporación de residuos plásticos como aditivo en mezclas bituminosas, buscando a la vez una solución al problema ambiental ocasionado por la acumulación de plásticos. Metodológicamente, se emplearon tanto el proceso en seco como el proceso en húmedo de incorporación de plásticos en la mezcla bituminosa, y se realizaron ensayos de laboratorio para evaluar parámetros como el valor de impacto de los agregados, la abrasión Los Ángeles, la ductilidad del asfalto y el punto de ablandamiento del betún modificado. La muestra utilizada consistió en agregados pétreos recubiertos con diferentes porcentajes de desechos plásticos, principalmente polietileno, poliestireno y polipropileno, los cuales fueron triturados hasta alcanzar tamaños menores a 4.75 mm para garantizar su adecuada mezcla con el betún. Los resultados mostraron que la adición de residuos plásticos mejora la flexibilidad del pavimento, disminuye la aparición de grietas y aumenta la resistencia a la deformación. Asimismo, el betún modificado con plásticos presentó mayor resistencia al impacto y a la abrasión, con valores óptimos cuando la adición de plástico se encontraba entre el 9% y 10% en peso. Finalmente se concluyó que la incorporación de desechos plásticos en pavimentos flexibles no solo mejora sus características mecánicas y prolonga su vida útil, sino que también representa una alternativa sostenible y económica al reducir el consumo de betún en un 9–10%, además de contribuir a la mitigación de los impactos ambientales derivados de la disposición inadecuada de plásticos.

Mukhtar Abukhettala y Mamadou Fall [16] en el año 2021, en la Universidad de Ottawa (Canadá), desarrollaron la investigación en la tesis titulada “Caracterización geotécnica de residuos plásticos en aplicaciones de subrasante de pavimentos”. El objetivo principal de este estudio fue caracterizar las propiedades geotécnicas de los suelos subrasantes modificados con diferentes tipos y formas de plásticos reciclados, con la finalidad de evaluar su viabilidad en aplicaciones viales. En cuanto a la metodología, se aplicaron ensayos de caracterización geotécnica bajo normas ASTM y AASHTO, tales como análisis granulométrico, límites de Atterberg, ensayos de compactación Proctor modificado, resistencia a la compresión no confinada (UCS), ensayo triaxial, prueba CBR, permeabilidad e incluso la estimación del módulo resiliente. Las mezclas se elaboraron incorporando diferentes porcentajes de plástico

(1% a 10%) al suelo natural, evaluando así su efecto en las propiedades físico-mecánicas. La muestra estuvo conformada por suelos clasificados como A-2-7 según AASHTO, recolectados en tres zonas de Ottawa-Gatineau. Asimismo, se emplearon plásticos posconsumo: polietileno de baja densidad, polietileno tereftalato y polipropileno. Los resultados demostraron que la incorporación de plásticos disminuye la densidad seca máxima del suelo debido a la menor densidad relativa del plástico frente a las partículas minerales. En cuanto al CBR, se observó que su valor podía aumentar o disminuir dependiendo del tipo, forma y contenido de plástico, destacándose mejoras significativas con HDPE y PP en escamas y pellets. Asimismo, se reportó que la permeabilidad tendía a aumentar con plásticos en forma de pellets, mejorando la capacidad de drenaje. No obstante, la resistencia a compresión no confinada mostró una tendencia decreciente, al igual que la cohesión, aunque el ángulo de fricción interna sí presentó incrementos. Este estudio concluyó que el uso de plásticos reciclados en la subrasante tiene un gran potencial para aplicaciones viales, aunque los resultados varían según el tipo y la forma del plástico utilizado

En el año 2023, Maher M. Khazaal y Qassun S. Mohammed Shafiqu [17], de la Universidad Al-Nahrain en Bagdad, Irak, realizaron la investigación titulada “Mejora de las propiedades de ingeniería de suelos yesosos mediante la adición de polímeros de polietileno de alta densidad: Una evaluación experimental exhaustiva”. El objetivo principal del estudio fue evaluar la influencia del polietileno de alta densidad en la mejora de las propiedades ingenieriles de los suelos yesíferos, conocidos por su alta susceptibilidad al colapso al entrar en contacto con el agua. La metodología aplicada fue de carácter experimental y comprendió ensayos de compactación (Proctor estándar), doble edómetro para medir el potencial de colapso, corte directo para determinar cohesión y ángulo de fricción interna, además del ensayo CBR en estado seco y saturado, todos bajo normas ASTM. La muestra utilizada consistió en suelos con un contenido de yeso del 38%, recolectados en la región de Tikrit, Irak, los cuales fueron tratados con tres porcentajes: 1%, 3% y 6%. Los resultados mostraron una mejora notable en la resistencia al deslizamiento y en la fricción interna del suelo, tanto en condiciones secas como húmedas, con una disminución significativa en la susceptibilidad al colapso del suelo. potencial de colapso del suelo. En particular, la adición de un 6% redujo el potencial de colapso en un 83.2%, mientras que el índice CBR aumentó bajo condiciones de humedad, lo que sugiere que el HDPE puede ser utilizado adecuadamente para mejorar la estabilidad de suelos en regiones áridas y semiáridas. Concluyendo que la adición de HDPE constituye una alternativa viable para mejorar el comportamiento mecánico de suelos yesíferos, especialmente en condiciones

de saturación, lo que incrementa la seguridad y durabilidad de obras civiles en zonas con este tipo de terrenos.

Banerji, Alam, Das y Roy [18] en el año 2024 desarrollaron la investigación titulada “Efecto de la adición de escamas de polietileno de alta densidad de desecho en el suelo de la subrasante comportamiento y caracterización para pavimentos aplicaciones”. Tiene como objetivo principal de este estudio fue evaluar el efecto de incorporar escamas de polietileno de alta densidad reciclado en el comportamiento del suelo de subrasante destinado a aplicaciones de pavimentos, como una estrategia de mejora sostenible y de reciclaje de plásticos. La metodología experimental se basó en ensayos geotécnicos de laboratorio, tales como compactación Proctor, resistencia a la compresión simple (UCS) y ensayo de índice CBR en condición saturada, además de simulaciones mediante el programa IITPAVE, siguiendo las especificaciones de la norma india IRC 37:2018. Para ello, se trabajó con muestras de suelo arcilloso-limoso obtenidas en la localidad de Fuljhore, Durgapur, West Bengal, extraídas a una profundidad de 2.5 m. Dicho suelo presentaba características de un material clasificado como arcilla limosa, con un 54 % de arcilla y 38 % de limo. El material plástico empleado fueron fibras de HDPE obtenidas a partir de botellas recicladas, cortadas en tiras de 1 cm de ancho y 2–3 mm de espesor, añadidas en proporciones del 1 %, 3 % y 5 % respecto al peso seco del suelo. Los resultados mostraron que la incorporación de HDPE redujo tanto la densidad seca máxima como el contenido de humedad óptimo, pero mejoró significativamente la capacidad portante del suelo. En efecto, el valor del CBR pasó de 4.1 % (suelo natural) a 6.2 % con la adición del 5 % de HDPE, lo que representó una mejora del 51.21 %. Asimismo, el espesor de diseño del pavimento se redujo aproximadamente en un 12 %, mientras que la deformación vertical máxima y la deflexión superficial se redujeron en torno al 9.5 %. En conclusión, los autores señalaron que el uso de HDPE como refuerzo en subrasantes resulta efectivo para incrementar la resistencia y rigidez de los suelos arcillosos, permitiendo reducir los espesores estructurales de los pavimentos y, por ende, los costos de construcción. Sin embargo, recomiendan profundizar en estudios de desempeño a largo plazo para confirmar su durabilidad en condiciones reales de tránsito.

Yafet Olmedo, Mauricio Cano y Marko López [19] en el año 2024 presentaron la investigación titulada “Estudio experimental de arcillas de alta plasticidad reforzadas con mezclas de residuos plásticos y cal en subrasantes de pavimentos flexibles” durante el XX Congreso Brasileño de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, donde su objetivo principal del estudio fue evaluar experimentalmente el comportamiento mecánico de suelos arcillosos de

alta plasticidad reforzados con mezclas de residuos plásticos de polietileno tereftalato (PET) y cal, con la finalidad de mejorar sus propiedades y emplearlos en subrasantes de pavimentos flexibles. El estudio fue de tipo experimental, con diseño de laboratorio y un enfoque cuantitativo, se realizó ensayos de límites de Atterberg, Proctor modificado, ensayo CBR, módulo resiliente y resistencia a la compresión simple, todos desarrollados bajo normas ASTM y AASHTO. La muestra utilizada consistió en arcillas altamente plásticas recolectadas en la ciudad de Pucallpa, distrito de Callería, en la región amazónica del Perú. Estas arcillas presentaban un índice de plasticidad elevado ($PI = 33$) y fueron sometidas a ensayos en tres condiciones: suelo natural, mezcla 1 (97.5 % arcilla + 2.5 % PET) y mezcla 2 (96 % arcilla + 2.5 % PET + 1.5 % cal). Los resultados indicaron que la adición de PET redujo la densidad seca máxima e incrementó el contenido óptimo de humedad, mientras que la combinación de PET y cal disminuyó significativamente la plasticidad y la expansión de las arcillas. En particular, el valor del CBR aumentó de 2.25 % en el suelo natural a 18.50 % en la mezcla 2, evidenciando un incremento sustancial en la capacidad portante. Asimismo, el módulo resiliente alcanzó valores promedio de 218.24 MPa en la mezcla con PET y cal, lo que representa un aumento de 64.57 % respecto al suelo natural. Finalmente se concluyó que el estudio es que la incorporación de un bajo porcentaje de PET (2.5 %) junto con cal (1.5 %) mejora notablemente las propiedades mecánicas de suelos arcillosos de alta plasticidad, logrando una reducción del espesor de subrasante requerido en el diseño de pavimentos y promoviendo el aprovechamiento de residuos plásticos en la construcción vial. No obstante, se recomienda que, en condiciones sin confinamiento, se emplee únicamente PET como refuerzo físico, dado que las muestras con cal presentaron una menor resistencia a la compresión simple.

En el año 2022, Renzo Elehazar Palomino Miranda y Alessandra Patricia Trujillo Vidal [20] desarrollaron la tesis titulada “Mejoramiento de las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso a nivel de subrasante mediante el uso de PET chancado y triturado en la carretera Yurimaguas-Munichis, Loreto”, presentada en la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. El objetivo principal del estudio fue determinar la influencia de la incorporación de tereftalato de polietileno (PET) reciclado, en estado chancado y triturado, en un suelo cohesivo de la selva baja peruana, con la finalidad de mejorar sus propiedades mecánicas y su capacidad de soporte en el diseño de subrasantes. La investigación se clasificó como un estudio de tipo experimental, con un diseño de laboratorio y un enfoque cuantitativo, ya que se sometió el suelo a diferentes ensayos normalizados para evaluar cómo variaban sus propiedades al incorporar distintas dosificaciones de PET. La metodología empleada incluyó ensayos de caracterización del suelo

(contenido de humedad, gravedad específica, análisis granulométrico, límites de consistencia) y pruebas de compactación y soporte, principalmente el CBR, a diferentes dosificaciones de PET: 1 %, 3 %, 4 %, 5 %, 10 % y 15 % en peso respecto al suelo. La muestra de suelo fue extraída en la carretera Yurimaguas-Munichis, provincia de Alto Amazonas (Loreto), mediante calicatas de 1.50 m de profundidad, empleando la parte inferior (0.30 m) para los ensayos. Para el refuerzo, se recolectaron aproximadamente 40 kg de botellas plásticas PET, que fueron trituradas y procesadas hasta obtener partículas de 4 mm de tamaño. Los resultados evidenciaron que la incorporación de PET triturado mejoró significativamente la capacidad de soporte del suelo arcilloso, alcanzando valores de CBR superiores al mínimo requerido (6 %) para su uso como subrasante. Sin embargo, se determinó que dosificaciones mayores al 5 % no generaban mejoras adicionales, llegando incluso a disminuir la resistencia. Asimismo, se concluyó que la adición de PET chancado y triturado en bajas proporciones constituye una alternativa técnica viable y sostenible para optimizar el comportamiento mecánico de los suelos arcillosos de la selva peruana, permitiendo su utilización en proyectos viales.

Cueva Vélchez, Johny Wilson y Álvarez Vizarreta, Luis Alberto [21] en el año 2023 desarrollaron la investigación titulada “Propuesta para la estabilización de la subrasante en suelos arcillosos con el uso de plástico molido reciclado para carreteras en la zona de Lurín - Lima”, presentada en la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC). El objetivo principal de este trabajo fue analizar la incorporación de polipropileno molido reciclado como insumo estabilizante de suelos arcillosos, con miras a mejorar el desempeño de la subrasante en proyectos viales. La metodología empleada correspondió a un diseño experimental, de tipo exploratorio con nivel analítico, enfoque aplicado y corte transversal. Se realizó la recolección de muestras en la urbanización Huertos de Lurín, distrito de Lurín, donde se excavaron dos calicatas de 1,0 m y 1,20 m de profundidad, respectivamente, obteniendo alrededor de 20 kg de suelo arcilloso. Asimismo, se validaron resultados con diez muestras adicionales recopiladas por el CISMID en la misma zona. El tratamiento consistió en añadir un 4% de plástico molido reciclado con respecto al peso seco del suelo y se sometió a ensayos de granulometría, límites de Atterberg, Proctor modificado y CBR (California Bearing Ratio). Los resultados evidenciaron que el suelo natural presentó una capacidad de soporte regular (CBR de 9,6%), mientras que con la adición del 4% de plástico molido se alcanzó un CBR de 10,4% al 95% de la densidad máxima seca, clasificándose como una subrasante “buena” según los parámetros del MTC. De igual manera, al compactar al 100%, el valor de CBR pasó de 15% a 17%, lo cual representó una mejora en la resistencia. Sin embargo, se observó que la densidad máxima seca

disminuyó ligeramente debido a la menor densidad del aditivo, mientras que la expansión del suelo también se redujo de 0,91 mm a 0,87 mm. Asimismo, se concluye que la incorporación del plástico molido reciclado en un porcentaje del 4% permite mejorar de forma significativa la capacidad portante de suelos arcillosos empleados como subrasante, generando un material más resistente y con menor susceptibilidad a la expansión.

En el año 2021, Castro Álvarez, Alexa Pamela y Cruzado Carranza, Tomasa Jamilet [22], desarrollaron la investigación titulada “Influencia de la adición de fibras de polímeros reciclados en la capacidad de soporte de la subrasante, para el diseño del pavimento flexible, Alto Trujillo – Barrio I, 2021”. El objetivo principal de este estudio fue determinar cómo influye la adición de fibras de PET reciclado en la capacidad de soporte (CBR) de los suelos de la subrasante, con fines de diseño de pavimento flexible en la zona de Alto Trujillo. La metodología empleada fue de tipo experimental, con un enfoque aplicado y diseño transversal, orientada a la comprobación de hipótesis mediante ensayos de laboratorio. Se realizaron ocho exploraciones a tajo abierto (calicatas), cada una con una profundidad de 2 metros y separadas a 500 metros entre sí, en las cuales se extrajo un único estrato por calicata. Se aplicaron ensayos de caracterización del suelo según los sistemas SUCS y AASHTO, además de pruebas de densidad máxima y mínima para determinar la compactación óptima. Posteriormente, las muestras se mezclaron con fibras de PET en diferentes proporciones (2,5%, 5% y 7,5%) y se sometieron a ensayos de CBR para evaluar la capacidad de soporte. La muestra estuvo constituida por los suelos arenosos (clasificados como SP: arena mal graduada) recolectados en las calicatas del Barrio I – Alto Trujillo. Los resultados demostraron que la adición de fibras de PET incrementó significativamente la resistencia del suelo, siendo el 2,5% la dosificación óptima, con un valor promedio de CBR de 22,4%, lo que representó un aumento del 59,1% respecto al valor obtenido del suelo patrón sin aditivos. En porcentajes superiores al 2,5% (5% y 7,5%), el incremento no fue proporcional y, en algunos casos, los valores tendieron a estabilizarse o disminuir. Asimismo, se concluye que la incorporación de fibras de PET recicladas en proporciones controladas constituye una alternativa eficiente para mejorar la capacidad portante de suelos arenosos empleados como subrasante. En particular, el 2,5% de adición es el porcentaje óptimo que permite un incremento considerable en el índice de CBR, lo cual favorece el diseño de pavimentos más resistentes, duraderos y sostenibles en contextos urbanos como Alto Trujillo.

En el año 2023, Guevara Idrogo, Jheniffer Paola [23] desarrolló la investigación titulada “Utilización de bolsas de polietileno para el mejoramiento de suelo a nivel de la subrasante en

el caserío de Santa Bárbara, distrito de Los Baños del Inca, Cajamarca 2022”, presentada en la Universidad Privada del Norte. El objetivo principal de este estudio fue determinar la variación del CBR en la capa de subrasante al adicionar bolsas de polietileno en diferentes proporciones (2%, 4% y 6%), con el fin de mejorar sus propiedades físico-mecánicas. La metodología aplicada correspondió a una investigación de tipo descriptiva, con diseño experimental, enfoque cuantitativo y alcance correlacional. La muestra utilizada consistió en tres calicatas de 1,5 metros de profundidad, excavadas en el caserío de Santa Bárbara, de donde se recolectaron suelos arcillosos representativos de la zona. En el laboratorio de suelos de la Universidad Privada del Norte de Cajamarca se realizaron 63 ensayos, entre los que destacaron: análisis granulométrico por lavado, límites de Atterberg, contenido de humedad, peso específico, Proctor modificado y pruebas de CBR tanto en suelo natural como en las mezclas con adiciones de polietileno. Los resultados mostraron que el CBR del suelo natural fue de apenas 1,76%, lo que lo clasificaba como no apto para subrasante según el Manual de Carreteras MTC-05-14 (que exige un mínimo de 6%). Al incorporar bolsas de polietileno, se observó una mejora progresiva, alcanzando un CBR máximo de 4,11% con la adición del 6% de polietileno, es decir, un incremento de 2,35 puntos respecto al suelo sin aditivos. Sin embargo, pese a la mejora obtenida, el suelo no logró alcanzar el valor mínimo normativo requerido. Finalmente se concluyó que la incorporación de bolsas de polietileno en proporciones controladas sí contribuye a mejorar la capacidad de soporte de los suelos arcillosos en la subrasante, aunque los valores alcanzados todavía resultan insuficientes para ser considerados como suelos aptos según normativa.

En 2021, Kevin Adrian Celi Yanchapanta [24] desarrolló el trabajo experimental titulado “Estabilización de suelos granulares de subrasante con finos de tereftalato de polietileno (PET), polipropileno (PP) y polietileno (PE)”. El objetivo principal de esta investigación fue evaluar la viabilidad de mejorar las prestaciones de suelos granulares empleados en subrasantes mediante la adición de finos plásticos (PET, PP y PE) en distintas dosificaciones, buscando aumentar la capacidad portante del material. La metodología fue experimental (con enfoque cuantitativo y diseño de laboratorio: se tomaron muestras representativas en la provincia de Tungurahua (Ambato) a una profundidad de 60 cm y se sometieron a ensayos de caracterización (granulometría, límites de Atterberg, gravedad específica) y ensayos de compactación y resistencia (Proctor modificado y CBR) para las mezclas con diferentes porcentajes de finos plásticos (incluyendo 0 % y dosificaciones reportadas en anexos como 9 % y 12 %). La muestra estuvo constituida por suelos granulares recolectados en las zonas muestreadas (varias muestras

representativas identificadas en el proyecto) y las pruebas se realizaron para cada dosificación propuesta. Entre los resultados se observaron cambios en la densidad seca máxima y en el contenido de humedad óptimo (valores de γ_d máx. informados en los anexos entre 1.521 y 1.596 g/cm³ y contenidos óptimos alrededor de 11–13 % según dosificación) y, en varias mezclas, aumentos relevantes del índice CBR en algunos casos el CBR de diseño alcanzó valores cercanos a 15.6 %, lo que indica una mejora de la capacidad portante. Finalmente se concluyó que la incorporación controlada de finos plásticos (PET/PP/PE) puede mejorar las propiedades mecánicas de suelos granulares para subrasante especialmente el CBR, aunque el efecto sobre la compactación y la densidad seca depende de la dosificación; por tanto, es necesario optimizar la proporción de aditivo para maximizar beneficios y evitar efectos adversos en la compactación.

En 2023, Fernando Ernesto Turpo Huanca [25] presentó la tesis “Efectos del tereftalato de polietileno reciclado en las propiedades de suelos finos para su uso en subrasantes”, cuyo objetivo fue evaluar cómo incide la adición de PET reciclado (dosificaciones 0 %, 2 %, 4 % y 6 %) sobre las propiedades físico-mecánicas de suelos finos extraídos de la calle Áncash, Asentamiento Humano San Gabriel, distrito de Comas (Lima). La investigación adoptó una metodología experimental, de tipo aplicada, con alcance explicativo y diseño transversal: la población y muestra fueron equivalentes (un total de 590.4 kg de suelo utilizados en los ensayos), se realizaron calicatas y se llevaron a cabo ensayos de granulometría, límites de Atterberg, Proctor modificado y CBR (al 95 % y 100 % de la MDS) para cada mezcla con las distintas proporciones de PET. Los resultados mostraron mejoras en las propiedades mecánicas al incorporar PET, destacando incrementos en la capacidad de soporte medidos por CBR al aumentar la dosificación; en particular, la mezcla con 6 % de PET presentó la mayor mejora en resistencia mecánica, mientras que las propiedades físicas (granulometría, límites de consistencia) no mostraron cambios significativos. Asimismo, se concluye que la incorporación del 6 % de PET reciclado mejora las propiedades mecánicas de suelos finos (clasificados en el estudio como tipo A-6(4)) para su uso en subrasantes, incrementando su capacidad portante y constituyendo una alternativa técnica y ambientalmente favorable para el aprovechamiento de residuos plásticos en estabilización de subrasantes.

Bases Legales

NORMA DE SUELOS Y CIMENTACIONES - PERÚ, E-050

La Norma Técnica Peruana E.050, titulada Suelos y Cimentaciones, establece los lineamientos fundamentales para la ejecución adecuada de los estudios de mecánica de suelos en proyectos de

ingeniería civil. Esta normativa especifica los criterios y procedimientos que deben seguirse en las investigaciones geotécnicas, tanto en campo como en laboratorio, dependiendo de las características del terreno [26]. Además, clasifica los distintos métodos de ensayo según su aplicabilidad a los diversos tipos de suelos, identificando cuáles son adecuados para ciertos materiales y cuáles no se recomiendan debido a sus propiedades físicas o comportamiento mecánico. Su correcta aplicación garantiza la confiabilidad en el diseño de cimentaciones y estructuras apoyadas sobre suelos naturales o mejorados.[26]

MANUAL DE CARRETERAS, SECCIÓN SUELOS Y PAVIMENTOS – PERÚ

El Manual de Carreteras, específicamente en su Sección de Suelos y Pavimentos, constituye una guía técnica para el diseño estructural de carreteras, abarcando desde la evaluación del terreno natural hasta la selección y mejora de las capas estructurales del pavimento. En lo referente a subrasantes, proporciona criterios para su identificación, caracterización y, si fuera necesario, su estabilización. Entre los estudios recomendados se incluyen el análisis granulométrico, determinación de límites de Atterberg, contenido de humedad natural, peso específico, ensayo Proctor Modificado, identificación de materia orgánica, así como la evaluación de la densidad y peso unitario del suelo en campo mediante el método del cono de arena. Estos ensayos permiten conocer las condiciones mecánicas del terreno y tomar decisiones informadas para garantizar la durabilidad y funcionalidad del pavimento. [27]

NORMA TÉCNICA PERUANA (NTP)

Las NTP son documentos oficiales elaborados por el Instituto Nacional de Calidad, que establecen especificaciones técnicas, métodos de ensayo, procedimientos y criterios de calidad aplicables a productos, procesos o servicios dentro del territorio nacional. Su objetivo principal es estandarizar prácticas en diferentes sectores como construcción, ingeniería, salud, alimentos, entre otros, promoviendo la calidad, seguridad, sostenibilidad y competitividad. Aunque su aplicación puede ser voluntaria o de cumplimiento obligatorio cuando son citadas por normas legales o contractuales, las NTP son una referencia esencial en proyectos de infraestructura pública y privada [28]

- **Contenido de Humedad - NTP 339.127**

El ensayo de contenido de humedad consiste en determinar la cantidad de agua que la muestra contiene, expresando ese valor en un porcentaje del peso de agua entre el peso del material seco. [29]

Equipos y materiales.

- Balanza con precisión de 0.1gr.
- Horno de secado con temperaturas de 110 ± 5 °C
- Fuentes de aluminio
- Guantes y sujetador para manipulación de recipientes [29]

Procedimiento del ensayo

- Primer se pesan las taras en una balanza electrónica
- Colocar las muestras en dichas taras que estén limpias y secas.
- Luego pesar la muestra húmeda más el recipiente.
- Posteriormente introducir las taras con cada una de las muestras húmedas en el horno a 110°C por 24h.
- Después de haberse pasado las 24 horas retiramos cada muestra seca del horno y se deja enfriar a temperatura ambiente
- Finalmente se registrar el peso del material seco más el recipiente. [29]

Cálculos:

$$W = \frac{W_w}{W_s} * 100$$

W_w = Peso de la muestra húmeda

W_s = Peso de la muestra seca

• **Análisis Granulométrico de suelos por Tamizado – NTP 339.128**

El análisis granulométrico es un procedimiento utilizado para clasificar las partículas del suelo según su tamaño. Este se realiza haciendo pasar el material a través de una serie de tamices con diferentes aberturas, hasta llegar al tamiz N.º 200 (0.074 mm). Como resultado de este proceso se obtiene una curva granulométrica, la cual se representa gráficamente mostrando la relación entre el tamaño de las partículas y el porcentaje acumulado que atraviesa cada tamiz. [29]

Equipos y materiales.

- Balanza con precisión de 0.01gr.
- Horno de secado con temperaturas 110 ± 5 °C

- Juego de tamices de malla cuadrada + tapa y fondo
- Envases o bandejas
- Cepillo metálico y brocha para limpieza

Procedimiento del ensayo

- Se cuartea y se pesan la muestra a analizar en una balanza de sensibilidad 0.01gr
- Luego la muestra se pasapor el tamiz N°4 y lo pasante lavar utilizando el tamiz N°200 evitando la fricción con el tamiz para no perder partículas.
- Colocar el material en un recipiente y llevar al horno a una temperatura de 110 ± 5 durante 24h.
- Retirar la muestra del horno y enfriar la muestra al aire libre
- Pasamos las muestras secas por los tamices a utilizar y agitar manualmente
- Pesar el material retenido en cada tamiz y del fondo. [29]

Cálculos:

Porcentaje de peso retenido.

$$\% \text{ Retenido} = \frac{\text{Peso retenido en el tamiz}}{\text{Peso de la muestra}} * 100$$

Porcentaje de peso retenido acumulado

$$\% \text{ Retenido acumulado} = \% \text{ retenido anterior} + \% \text{ retenido}$$

Porcentaje que pasa.

$$\% \text{ que pasa} = 100 - \% \text{ retenido acumulada}$$

• Límites de Atterberg (Limite Líquido, Limite Plástico e Índice de Plasticidad) - NTP 339.129

Los límites de Atterberg son parámetros clave que ayudan a caracterizar el comportamiento plástico de los suelos finos, especialmente los arcillosos, en función de su contenido de humedad. Estos límites permiten identificar el estado del suelo (sólido, semisólido, plástico o líquido) y son fundamentales para su correcta clasificación. [29]

Equipos y materiales

- Recipientes de porcelana o plástico para la muestra
- Tamiz N°40

- Copa de Casagrande
- Acanalador
- Cápsulas para obtener el contenido de humedad balanza
- Una balanza de 0.01gr
- Horno para el secado de la muestra por 24 horas
- Agua destilada
- Placa de vidrio esmerilado de por lo menos 30 centímetros de largo y 20 centímetros, con un espesor de 1 centímetro.
- Espátula
- Horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ [29]

Límite Líquido

Este ensayo se realiza utilizando el aparato de Copa de Casagrande y permite determinar el contenido de agua necesario para cerrar una ranura de $\frac{1}{2}$ pulgada tras aplicar 25 golpes. Un límite líquido más alto indica un suelo con mayor plasticidad. [29]

- Colocar muestra en un recipiente respectivamente del suelo pasante por el tamiz N°40 y añadir de agua a la muestra.
- Dejar que la muestra se humedezca.
- Mezclar con ayuda de la espátula hasta que el color sea uniforme y conseguir una mezcla homogénea.
- Se deja secar la muestra saturada por 24 horas
- Luego, colocar una porción del suelo preparado en la copa del dispositivo de límite líquido esparciéndola en la copa formando una superficie aproximadamente horizontal.
- Posteriormente, utilizando el acanalador dividir la muestra contenida en la copa, haciendo una ranura a través del suelo siguiendo una línea que una el punto más alto y el más bajo sobre el borde de la copa.
- Después, poner en movimiento la cazuela con ayuda de la manivela y suministrar los golpes a una velocidad de dos golpes por segundo que sean necesarios para cerrar la ranura en 12.7 mm cuando se cierre la ranura, registrar la cantidad de golpes y tomar una muestra de la parte central para la determinación del contenido de humedad.
- Las muestras se llevan al horno para determinar el contenido de humedad.

- Finalmente, las muestras son sacadas del horno, se dejan enfriar y se pesan. [29]

Límite Plástico

Se define como el contenido de humedad en el que el suelo empieza a comportarse como un material plástico, es decir, puede ser moldeado sin agrietarse ni desmoronarse. Este límite se determina formando cilindros de suelo de 3.2 mm de diámetro que no presenten fisuras al ser manipulados. [29]

- Primero, elegimos la muestra menos húmeda pero moldeable y hacemos una esfera de 1.5 cm aproximadamente.
- Segundo, empezamos a girar o rolar con la palma de la mano sobre la placa de vidrio haciendo un cilindro alargado con un diámetro de 3.2 mm.
- Tercero, si este cilindro presenta agrietamientos múltiples, se dice que el suelo presenta el límite plástico, donde se obtendrá muestras de suelo, se someterán al secado para determinar el contenido de agua, el cual equivale al LP.
- Cuarto, en caso de no cumplirse la anterior condición, se hará de nuevo una esfera con el suelo y se repetirá el proceso hasta que se cumpla lo especificado.

Índice de Plasticidad

Este índice mide el rango de humedad en el cual el suelo presenta características plásticas. Un índice de plasticidad elevado indica un suelo altamente arcilloso, lo que afecta su capacidad de carga, estabilidad y respuesta frente a variaciones de humedad. [29]

$$IP = LL - LP$$

IP= Índice Plástico

LL= Límite Líquido

LP= Límite Plástico

• Clasificación del suelo mediante SUCS – NPT 339.134

Este procedimiento es empleado en el ámbito de la ingeniería para clasificar suelos de origen mineral u orgánico. Su aplicación se fundamenta en el análisis granulométrico y en la determinación de los límites de Atterberg, siendo recomendable su uso cuando se necesita una clasificación detallada y exacta del suelo. [28]

Equipos y materiales

- Carta de plasticidad
- Curva de distribución acumulativa del tamaño de las partículas

Procedimiento del ensayo

- Una vez que se ha determinado los Límites Agtterberg.
- Se ubicará los valores de Limite Liquido y el Índice de plasticidad en la gráfica de plasticidad del SUCS
- Una vez ubicados los valores se podrá determinar el tipo de suelo de la muestra en estudio.

• **Ensayo de Compactación (Proctor Modificado) – NTP 339.141**

Este ensayo de laboratorio consiste en determinar la relación entre el contenido de humedad y la densidad seca de suelos compactados en un molde, aplicando golpes mediante un pisón que se deja caer desde una altura de 18 pulgadas. [29]

Equipos y materiales

- Moldes cilíndricos 4"
- Pisón con caída libre de 18"
- Balanza de 0.01gr.
- Horno a temperaturas 110 ± 5 °C
- Juego de tamices
- Envases o bandejas
- Regla

Muestra

- Se empleará la muestra que se ha secado al aire libre por 24 horas.

Procedimiento del ensayo

- Se prepara mínimo cuatro especímenes con contenidos de agua, de modo que estos tengan un contenido de agua lo más cercano al óptimo estimado.
- Preparar cuatro o cinco muestras de 3 kg
- Determinar y anotar la masa y volumen del molde.

- Colocar la primera capa en el molde y aplicarle 25 o 56 golpes, según el método de ensayo.
- Compactar el espécimen en cinco capas. Cada una deberá tener aproximadamente el mismo espesor.
- Se aplicarán los golpes en una relación uniforme de aproximadamente 25 golpes por minuto.
- La última capa debe quedar en el collarín, de manera que luego se pueda nivelar y enrasar el material compactado utilizando la regla metálica en la parte superior para conformar una superficie plana
- Pesar el suelo compactado con el molde, luego remover el material del molde para extraer una porción de suelo para determinar el contenido de humedad.
- Llevar las muestras al horno para determinar la humedad.
- Repetir el ensayo para las distintas pruebas con diferentes contenidos de agua [29]

Cálculos

Cuando se tenga el contenido de humedad de cada espécimen se determina la densidad seca de cada punto con la siguiente ecuación:

Fórmula para la Densidad Seca

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{1 + \omega}$$

Donde:

γ_d = densidad seca de la muestra compactada (Mg/m^3)

γ_m = densidad húmeda de la muestra compactada (Mg/m^3)

ω = contenido de humedad (%)

Fórmula para la Densidad Húmeda

$$\rho_m = 1000 * \frac{(M_t - M_{md})}{V}$$

Donde:

ρ_m = Densidad húmeda de la muestra compactada (Mg/m^3)

M_t = Peso de la muestra húmeda compactada con el molde (kg)

M_{md} = Peso del molde (kg)

V = Volumen del molde de compactación (m^3)

- **Razón de Soporte California (CBR) – NTP 339.145**

Esta prueba permite determinar el índice de capacidad de soporte del suelo, evaluando la resistencia potencial de la subrasante y de otras capas estructurales, como la subbase, la base, e incluso los materiales reciclados utilizados en la construcción de pavimentos. [29]

Materiales

- Máquina de aplicación de carga
- Molde cilindro para compactación
- Martillo de compactación
- Placa de metal y sobrecargas metálicas
- Deformímetro
- Cilindro de Penetración
- Balanza de precisión

Procedimiento del ensayo

Para la compactación:

- Registro del peso del molde incluyendo base.
- Colocar el collarín junto con el disco espaciador y por encima, un papel filtro con el mismo diámetro, para evitar el tapado de suelo en futuros ensayos.
- Introducir la muestra en el molde en cinco capas, utilizando la dosificación de agua óptima y aplicando la energía de compactación correspondiente: 12, 25 y 56 golpes por capa.
- Una vez finalizada la compactación, retirar el collarín y nivelar la superficie del molde con el enrasador.
- Retirar el disco espaciador, colocar un papel filtro sobre la base e invertir el molde con el material compactado; ajustar y registrar el peso total. [29]

Para la inmersión.

- Colocar una placa perforada con vástago ajustable sobre la muestra invertida y por encima, la sobrecarga que sea necesaria.
- Posicionar el conjunto del trípode con el dial de deformación sobre el borde del molde.
- Registrar la primera lectura antes de sumergir el molde en agua y, posteriormente, retirar el trípode.

Para la expansión

- Sumergir el molde con la sobrecarga en un recipiente con agua durante 96 horas
- Tomar lecturas del deformímetro cada 24 horas para monitorear la expansión del suelo.
- Al finalizar los 4 días, retirar el molde del agua y dejar drenar durante 15 minutos.

Para la penetración.

- Colocar nuevamente las pesas de sobrecarga por encima de la muestra.
- Ubicar el pistón de penetración en el centro de la muestra
- Aplicar una carga aproximada de 50N. en el indicador de presión para que el pistón asiente.
- Tomar nota de las diferentes lecturas de la presión a distintas pulgadas de penetración
- Finalmente, desmontar el molde y extraer una muestra representativa de la parte superior para determinar el contenido de humedad. [29]

Ley General del Ambiente – Ley N.º 28611

La Ley General del Ambiente constituye el marco legal principal para la protección, conservación y mejora del medio ambiente en el Perú. Esta norma reconoce el derecho de todas las personas a vivir en un entorno equilibrado y saludable, así como la obligación de contribuir a su cuidado. Además, promueve una gestión ambiental integral y responsable, incentivando la prevención de la contaminación, la conservación de los recursos naturales y el uso sostenible del territorio. La ley también establece mecanismos e instrumentos de gestión que buscan asegurar la participación ciudadana, la transparencia y la responsabilidad frente a los daños

ambientales, con el objetivo de lograr un desarrollo armonioso entre las actividades humanas y el medio natural. [30]

Bases Teóricas

Definición de suelo

El suelo es una sustancia natural compuesta por partículas minerales, materia orgánica, aire y agua, que se forma a partir de la descomposición de rocas y materiales orgánicos e inorgánicos bajo la influencia de factores climáticos. El suelo posee diversas propiedades físicas, como textura y permeabilidad; y químicas, como pH y capacidad de retener nutrientes, las cuales dependen de su origen y composición. Además de ser el soporte para la vegetación, el suelo cumple un papel fundamental en la regulación del ciclo del agua y como hábitat de microorganismos. En ingeniería, el análisis de sus características es esencial para determinar la capacidad de carga en la construcción de infraestructuras como carreteras y edificaciones.[31]

- Propiedades de los suelos:
 - Tamaño de partícula (granulometría): Se refiere a la distribución del tamaño de las partículas que componen el suelo (gravas, arenas, limos y arcillas). La curva granulométrica permite clasificar el suelo como bien graduado, mal graduado o uniforme, lo cual influye en su compactación y drenaje.
 - Textura: Es la proporción relativa entre arena, limo y arcilla en el suelo. Determina el tacto del suelo (arenoso, limoso o arcilloso) y afecta directamente su plasticidad, cohesión y permeabilidad.
 - Contenido de humedad: Representa la cantidad de agua presente en el suelo en un momento dado. Se expresa como un porcentaje del peso seco del suelo y es clave para su compactación y estabilidad.
 - Peso específico (gravedad específica): Es la relación entre el peso de un volumen dado de partículas sólidas del suelo y el peso del mismo volumen de agua. Se utiliza para calcular otras propiedades como la densidad y la saturación del suelo. [31]

Tipos de suelo

Los **tipos de suelo** se clasifican principalmente según el tamaño de sus partículas, su estructura, y su composición mineralógica. Los suelos más comunes son los siguientes:

- **Suelos Arenosos:** Están formados predominantemente por partículas de arena, de mayor tamaño, lo que les otorga baja cohesión y alta permeabilidad. Son suelos que drenan bien, pero tienen una capacidad portante limitada debido a su falta de cohesión, lo que los hace poco estables bajo carga sin compactación adicional.[32]
- **Suelos Arcillosos:** Contienen partículas finas y son altamente cohesivos. Los suelos arcillosos se caracterizan por su baja permeabilidad, elevadad de retención de agua y una gran capacidad portante cuando están secos, pero tienden a hincharse y reducir su resistencia cuando están húmedos. Son difíciles de manejar en la construcción debido a su comportamiento expansivo y contracción al secarse.[32]
- **Suelos Limosos:** Los limos tienen partículas de tamaño intermedio entre las arcillas y arenas. Son suelos no cohesivos, con moderada permeabilidad y retención de agua. Aunque tienen mayor capacidad de carga que las arcillas, pueden volverse inestables cuando están saturados, lo que puede provocar asentamientos.[32]

Clasificación de suelo

Los suelos se clasifican principalmente en dos sistemas universalmente aceptados en la ingeniería geotécnica: SUCS y AASHTO, son sistemas son esenciales para evaluar las características de los suelos en proyectos de construcción y pavimentación, permitiendo un análisis detallado para seleccionar los suelos adecuados en función de su rendimiento mecánico y estructural.[33]

- **Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS):** se desarrolló para clasificar los suelos según sus características de tamaño de partícula y plasticidad. Se utiliza ampliamente en proyectos de ingeniería civil, especialmente en obras de cimentación y estabilidad de suelos [33]. El SUCS clasifica los suelos en dos grandes categorías:
 1. **Suelos Gruesos:** Suelos con más del 50% de partículas mayores que 0.075 mm (tamaño de la malla #200), como gravas y arenas [33]. Se clasifican adicionalmente en:
 - ✓ **Gravas (G):** Partículas con diámetros mayores de 2 mm. Se pueden clasificar como limpias o con finos dependiendo de la cantidad de partículas más pequeñas presentes.

- ✓ **Arenas (S):** Son partículas con diámetros entre 0.075 mm y 2 mm. También se clasifican en limpias o con finos, con base en la cantidad de arcillas y limos presentes.[33]
- 2. **Suelos Finos:** Suelos con más del 50% de partículas inferiores a 0.075 mm, como limos y arcillas [33]. Estos suelos se clasifican en función de su plasticidad y consistencia:
 - ✓ **Limos (M):** No cohesivos, de baja plasticidad y capacidad de carga.
 - ✓ **Arcillas (C):** Altamente cohesivas y con alta plasticidad, pudiendo tener una capacidad portante elevada cuando están secas, pero reduciéndose cuando están saturadas [33]
- **Sistema de Clasificación de Suelos AASHTO:** fue diseñado específicamente para clasificar suelos en función de su idoneidad para pavimentación de carreteras. La clasificación AASHTO está enfocada en la capacidad del suelo para ser usado como material de subrasante, basándose en su tamaño de partícula, plasticidad y las características de los finos.[27]

En este sistema, los suelos se agrupan en 7 clases principales, numeradas de **A-1** a **A-7**:

1. **Fragmentos de Arena y Grava (Grupo A-1):** Este grupo incluye suelos con grandes fragmentos de arena y grava. Se trata de materiales granulares que contribuyen a la estabilidad del terreno.
2. **Arena y Gravas con Limo y Arcilla (Grupo A-2):** Aquí se encuentran suelos que combinan arenas y gravas con un porcentaje de arcilla y limo, presentando una mezcla de propiedades.
3. **Arena Fina (Grupo A-3):** Este grupo abarca suelos arenosos con partículas finas, diferenciándose de las gravas y arenas más gruesas.
4. **Suelos Limosos (Grupos A-4 y A-5):** Los suelos limosos se clasifican en los subgrupos A-4 y A-5, según sus características particulares.
5. **Suelos Arcillosos (Grupos A-6 y A-7):** Los suelos arcillosos se dividen en los grupos A-6 y A-7, según el contenido de limo y arcilla. Estos suelos destacan por sus propiedades plásticas.

Tabla I: clasificación de suelos según AASHTO [27]

Clasificación General	Material Granular						Material limo arcillosos				
Grupos	A-1		A-2				A-3	A-4	A-5	A-6	A-7
Subgrupos	A-1a	A-1b	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7					A-7-5
											A-7-6
% pasante #10 #40 #200	50% máx 30% máx 15% máx	50% máx 25% máx	35% máx	35% máx	35% máx	35% máx	51% mín 10% máx	36% mín	36% mín	36% mín	36% mín
Características del material que pasa por el tamiz #40 LL Ip			40% máx 10% máx	41% mín 10% máx	40% máx 11% mín	41% mín 11% mín	N.P.	40% máx 10% máx	41% mín 10% máx	40% máx 11% mín	41% mín 11% mín
Ig	0	0	0	0	4 máx	4 máx	0	8 máx	12 máx	16 máx	20 máx
Tipo de material	Fragmentos pétreos de gravas y arenas		Gravas y arenas, limosas y arcillosas				Arena fina	Suelos limosos		Suelos arcillosos	

Estabilización de suelo

La mejora de suelos es el procedimiento mediante el cual se optimiza las propiedades físico-mecánicas de un suelo para que sea adecuado para soportar cargas estructurales. Esto puede lograrse mediante la adición de estabilizantes como cemento, cal, polímeros, o materiales reciclados como el HDPE.[31]

Según el Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos [27], nos dice que los criterios para la estabilización de suelos son:

- Se considerarán materiales adecuados para las capas de la subrasante los suelos con un $\text{CBR} \geq 6\%$. Si el valor es inferior (subrasante insuficiente o inadecuada), o si se presentan zonas blandas, se llevará a cabo un estudio adecuado para su estabilización. En este estudio, el Ingeniero Responsable evaluará diversas alternativas, tales como: reemplazar el suelo de cimentación, adición de aditivos que mejoren las propiedades del suelo, evaluar una estabilización con geosintéticos (geotextiles, geomallas u otros) o reconfiguración del trazado vial. [27]
- Cuando la subrasante esté formada por suelos arcillosos o limosos y, al humedecerse, los materiales de estos suelos puedan penetrar en las capas granulares del pavimento, contaminándolas, donde se deberá incluir una capa de material anticontaminante de al menos 10 cm de espesor, según lo determine el Ingeniero Responsable. Además, el

Ingeniero debe analizar si es necesario realizar tratamientos adicionales para asegurar que las capas granulares se mantengan libres de contaminación, como la aplicación de selladores o refuerzos adicionales. Estas medidas son cruciales para evitar la degradación prematura de la infraestructura y garantizar su durabilidad a largo plazo. [27]

- La subrasante debe mantenerse por encima del nivel de la capa freática, con un mínimo de 0.60 m de altura en el caso de una subrasante de calidad excepcional; 0.80 m para una subrasante buena o regular; 1.00 m cuando se trate de una subrasante insuficiente; y 1.20 m en el caso de una subrasante inadecuada. Si fuera necesario, se instalarán subdrenes, capas anticontaminantes o drenantes, o se procederá a elevar la rasante hasta alcanzar la altura requerida. Además, se evaluará la necesidad de reforzar estas capas con materiales adicionales o geosintéticos para asegurar la estabilidad a largo plazo de la subrasante, mejorando su resistencia a la saturación y protegiendo las capas superiores del pavimento.[27]

Tipos de estabilización

Según el MTC, la estabilización de suelos es un proceso que busca mejorar las propiedades físico-mecánicas del suelo, como su plasticidad, resistencia y capacidad portante, mediante la adición de materiales o técnicas específicas[27]. A continuación, se detallan los principales métodos de estabilización de suelos mencionados por el MTC:

- **Estabilización mecánica**

La estabilización mecánica se refiere a la modificación de las características del suelo mediante procesos físicos, como la compactación o la mezcla con otros tipos de suelos más estables. Este proceso no altera la composición química del suelo, pero mejora su densidad, capacidad portante y estabilidad mediante la acción de equipos de compactación o técnicas de mezcla. [27]

- **Estabilización fisicoquímica**

Este tipo de estabilización implica el uso de agentes químicos que reaccionan con el suelo para modificar sus propiedades. Los productos utilizados pueden incluir cal, cemento, escorias o productos sintéticos, los cuales, al combinarse con el suelo, producen cambios permanentes en su estructura y comportamiento mecánico, mejorando su cohesión y resistencia. [27]

- ✓ **Estabilización in situ con cal:** este método se utiliza principalmente en suelos arcillosos y consiste en la adición de cal directamente en el suelo natural, mejorando su plasticidad y aumentando su resistencia. La cal reacciona con el agua y las partículas del suelo, disminuyendo su expansividad y generando una estructura más rígida y estable, apta para su uso en la construcción de subrasantes y bases de pavimentos.[34]
- ✓ **Estabilización con cemento:** esta estabilización con cemento implica la mezcla de suelo con una determinada cantidad de cemento y agua para formar una masa de suelo-cemento. Esta técnica es utilizada para incrementar la rigidez y resistencia del suelo, haciendo que sea más adecuado para soportar cargas pesadas en estructuras como carreteras. Una vez compactado y curado, el suelo-cemento se convierte en un material de gran durabilidad.[35]
- ✓ **Estabilización con productos bituminosos:** Este tipo de estabilización utiliza productos derivados del petróleo, como el betún o emulsiones bituminosas, que se mezclan con el suelo para mejorar su impermeabilidad y cohesión. Es especialmente útil en climas húmedos, ya que reduce la susceptibilidad del suelo a los cambios de humedad y mejora su resistencia a la deformación bajo cargas repetitivas, como las que se producen por el tránsito vehicular.[36]
- ✓ **Estabilización con HDPE:** utiliza polietileno de alta densidad reciclado para reforzar suelos, mejorando su resistencia y capacidad portante. Este método distribuye mejor las cargas aplicadas, disminuyendo la deformación y mejorando el rendimiento de suelos arcillosos, especialmente en subrasantes de pavimentos.[37]

Pavimentos

El pavimento es una estructura formada por varias capas de materiales colocados sobre el terreno natural (subrasante) para resistir las cargas del tráfico vehicular y distribuir las de manera uniforme. Su función principal es proporcionar una superficie segura y cómoda para el tránsito, al mismo tiempo que protege el suelo de deformaciones y desgaste.[38]

Los pavimentos se clasifican en los siguientes tipos:

- **Pavimentos flexibles:** están compuestos por varias capas de materiales granulares y una capa de rodadura asfáltica. Son llamados "flexibles" porque tienen la capacidad de deformarse bajo carga sin romperse, distribuyendo las tensiones hacia abajo. Su mantenimiento es más frecuente que el de otros tipos de pavimento.[38]

- **Pavimento semirrígido:** se trata de una combinación de materiales flexibles y rígidos. Normalmente incluye una base de concreto o suelo-cemento y una capa superior de asfalto. Ofrecen mayor resistencia a las deformaciones que los pavimentos flexibles y su vida útil es mayor.[38]
- **Pavimentos rígidos:** este tipo de pavimentos están formados principalmente por losas de concreto, lo que les confiere gran resistencia y rigidez. Su capacidad de carga es alta y distribuyen las tensiones sobre una amplia área. Son más duraderos que los pavimentos flexibles y requieren menos mantenimiento.[38]
- **Pavimentos articulados:** están constituidos por piezas individuales, como adoquines, que se colocan sobre una base granular. Permiten la distribución de las cargas a través de las uniones entre las piezas, y tienen la ventaja de ser fácilmente reemplazables en caso de daño. Son comúnmente utilizados en áreas peatonales y estacionamientos. [38]

Factores que considerar en el diseño de pavimentos.

- **El tránsito:** el diseño de pavimentos depende del tipo y cantidad de vehículos que circularán por la vía. Es esencial calcular las cargas equivalentes para asegurar que el pavimento resista sin sufrir daños prematuros.[38]
- **Los materiales disponibles:** la calidad y disponibilidad de los materiales como agregados, asfaltos y cementos influyen en la durabilidad y el costo del proyecto. La correcta selección es crucial para el rendimiento del pavimento.[38]
- **Clima:** las condiciones climáticas afectan el comportamiento del pavimento. En climas cálidos, se pueden producir deformaciones, mientras que en climas fríos las heladas causan grietas. El diseño debe adaptarse a estas condiciones.[38]
- **Subrasante:** la subrasante es la capa de suelo natural sobre la cual se apoya el pavimento. La capacidad portante de la subrasante es un factor crucial, ya que determina la forma en que las cargas vehiculares se distribuyen a través del pavimento. Suelos con baja capacidad portante, como los suelos arcillosos, pueden requerir estabilización o el uso de materiales de refuerzo para mejorar su desempeño. Un buen análisis de la subrasante permite diseñar un pavimento que soporte adecuadamente las cargas y evite deformaciones excesivas o asentamientos.[27]

Tabla II: Adaptado de Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos - MTC, 2014 [38]

Categorías de Subrasante	CBR
S0: Subrasante Inadecuada	CBR < 3%
S1: Subrasante insuficiente	De CBR $\geq$ 3% A CBR < 6%
S2: Subrasante Regular	De CBR $\geq$ 6% A CBR < 10%
S3: Subrasante Buena	De CBR $\geq$ 10% A CBR < 20%
S4: Subrasante Muy Buena	De CBR $\geq$ 20% A CBR < 30%
S5: Subrasante Excelente	CBR $\geq$ 30%

Estructura del pavimento

Carpeta Asfáltica

Es la capa superior que está en contacto directo con el tráfico, cuya función es proporcionar una superficie de rodadura cómoda y segura, resistente al desgaste, al agua, y al deslizamiento. Está compuesta principalmente por mezclas asfálticas diseñadas para soportar la abrasión y minimizar la penetración de agua a las capas inferiores. [38]

Capa Base:

Es la capa que se encuentra ubicada por debajo de la capa de asfáltica, esta capa es fundamental para la distribución de cargas y proporciona soporte estructural adicional. La capa base suele estar constituida por materiales granulares de alta calidad, como roca triturada o grava compactada. En algunos casos, puede estabilizarse con cemento o asfalto para incrementar su resistencia. [38]

Capa Subbase:

La subbase es la capa que se encuentra entre la subrasante y la base. Su función principal es distribuir las cargas de manera uniforme y proteger las capas superiores de posibles deformaciones del suelo natural. Esta capa es construida con materiales granulares compactados, generalmente de menor calidad que los de la base, pero que también ofrecen soporte estructural y facilitan el drenaje de agua hacia el suelo. [38]

Subrasante:

Es la capa de suelo natural sobre la cual se apoya toda la estructura del pavimento. La subrasante soporta y distribuye las cargas de tráfico hacia el terreno natural. Para mejorar sus características de resistencia y estabilidad, puede ser tratada o estabilizada con materiales como cal, cemento o polímeros (por ejemplo, HDPE) cuando el suelo natural no cumple con las especificaciones requeridas para una base sólida. [38]



Ilustración 1: Estructura de un pavimento

Índice Medio Diario Anual (IMDA)

El IMDA, o Intensidad Media Diaria Anual, representa el promedio diario de tránsito vehicular durante todo un año en una sección específica de vía. Este valor ofrece una referencia cuantitativa sobre la importancia del tramo analizado y permite fundamentar estudios de factibilidad económica. Su uso es esencial ya que proporciona datos necesarios para clasificar carreteras, definir características geométricas, y programar obras de mantenimiento o mejora. Además, contribuye en la evaluación de seguridad vial y del nivel de servicio. La demanda diaria proyectada se estima a partir del flujo actual, considerando una tasa de crecimiento anual, y puede ser obtenida mediante aforos manuales o sistemas tecnológicos.[27]

Tabla III: Tabla para la extracción de calicatas

Tipo de Carretera	Profundidad (m)	Número mínimo de Calicatas	Observación
Autopistas: carreteras de IMDA mayor de 6000 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	1.50 m respecto al nivel de sub rasante del proyecto	- Calzada 2 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido - Calzada 3 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido - Calzada 4 carriles por sentido: 6 calicatas x km x sentido	Las calicatas se ubicarán longitudinalmente y en forma alternada
Carreteras Duales o Multicarril: carreteras de IMDA entre 6000 y 4001 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	1.50 m respecto al nivel de sub rasante del proyecto	- Calzada 2 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido - Calzada 3 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido - Calzada 4 carriles por sentido: 6 calicatas x km x sentido	
Carreteras de Primera Clase: carreteras con un IMDA entre 4000-2001 veh/día, de una calzada de dos carriles.	1.50 m respecto al nivel de sub rasante del proyecto	4 calicatas x km	Las calicatas se ubicarán longitudinalmente y en forma alternada
Carreteras de Segunda Clase: carreteras con un IMDA entre 2000-401 veh/día, de una calzada de dos carriles.	1.50 m respecto al nivel de sub rasante del proyecto	3 calicatas x km	
Carreteras de Tercera Clase: carreteras con un IMDA entre 400-201 veh/día, de una calzada de dos carriles.	1.50 m respecto al nivel de sub rasante del proyecto	2 calicatas x km	
Carreteras de Bajo Volumen de Tránsito: carreteras con un IMDA $\leq$ 200 veh/día, de una calzada.	1.50 m respecto al nivel de sub rasante del proyecto	1 calicata x km	

Fuente: Manual de Ensayo de carreteras. [27]

Procedimiento

Con la finalidad de recopilar información precisa sobre la demanda vehiculares que circulan en la ruta Granja Sasape, Túcume, se llevará a cabo un conteo vehicular manual. Este procedimiento se desarrollará de la siguiente manera:

- Se identificará un tramo representativo de la vía en estudio, preferentemente con buena visibilidad y condiciones seguras para el personal encargado del conteo. El punto será ubicado estratégicamente para captar el flujo principal de vehículos que transitan por la ruta.
- El aforo vehicular se realizará durante siete días de estudio con diferentes horarios. Este intervalo permitirá cubrir los periodos de mayor flujo vehicular, conocidos como "horas pico".
- Los vehículos serán clasificados en las siguientes categorías, conforme al Manual de Carreteras – Secciones de Tránsito:

- Livianos (autos, camionetas)
 - Medianos (combis, minibuses)
 - Pesados (ómnibus, camiones de 2 o más ejes)
 - Mototaxis y motocicletas
- Se utilizará una ficha de conteo en formato tabulado, desglosada por intervalos de 15 minutos, donde se anotará la cantidad de vehículos por tipo y sentido de circulación. [27]
 - Finalizado el conteo, los datos serán sistematizados en hojas de cálculo para obtener:
 - El flujo vehicular total por día
 - La intensidad media diaria (IMD)

Evaluación del Impacto Ambiental por Incorporación de HDPE en Subrasantes

La evaluación del impacto ambiental consiste en identificar, analizar y valorar los posibles efectos positivos o negativos que genera la incorporación de HDPE en suelos arcillosos utilizados como subrasante. Este proceso permite anticipar consecuencias sobre el entorno y garantizar que el uso de materiales reciclados se realice de manera sostenible, alineado con la normativa ambiental vigente y los principios de protección del medio ambiente.[30]

Procedimiento

- Primero, se recopilará y analizará la normativa ambiental vigente aplicable al estudio, incluyendo la Ley General del Ambiente (Ley N.º 28611) y documentos técnicos del Ministerio del Ambiente y del sector transportes, con el fin de enmarcar legalmente la investigación. [30]
- Segundo, se identificarán los aspectos ambientales relacionados con el uso del HDPE como aditivo estabilizante en suelos, considerando su origen, proceso de recolección, transporte, almacenamiento, manipulación y disposición final.
- Tercero, se elaborará una matriz cualitativa de impacto ambiental (tipo Leopold simplificada) para evaluar los efectos del uso de HDPE sobre los componentes del medio ambiente, tales como el suelo, agua subterránea, aire y salud humana. Se

calificarán parámetros como magnitud, duración, reversibilidad y frecuencia del impacto.

- Cuarto, se analizarán los beneficios ambientales que implica la incorporación de HDPE reciclado, destacando su aporte en la reutilización de residuos plásticos y su contribución a una gestión más sostenible de materiales.
- Quinto, se realizará un análisis simplificado del ciclo de vida del HDPE utilizado, desde su recolección hasta su incorporación al suelo, evaluando su impacto en términos de consumo energético, emisiones, y residuos generados en el proceso.
- Sexto, se elaborarán conclusiones con base en los resultados obtenidos, y se propondrán recomendaciones ambientales para garantizar un manejo adecuado y responsable del HDPE durante su aplicación en campo o laboratorio.

Polímeros Reciclados

Los polímeros reciclados son materiales plásticos que han sido recuperados después de su uso inicial y reprocesados para ser reutilizados en diversas aplicaciones. Estos materiales provienen, en su mayoría, de residuos sólidos urbanos, industriales o agrícolas, y su uso contribuye a reducir la acumulación de desechos plásticos en el medio ambiente, fomentando así una economía circular y sostenible. [39]

Polietileno de alta densidad (HDPE) reciclado

El polietileno de alta densidad es un polímero plástico fabricado a partir del etileno. Su estructura molecular lineal le otorga una alta resistencia y densidad. El HDPE reciclado proviene de productos plásticos posconsumo, como botellas, envases y tuberías, que se reprocesan para ser reutilizados en nuevas aplicaciones. Este material es particularmente apreciado por su resistencia a la corrosión y su capacidad de mantener sus propiedades mecánicas después de ser reciclado.[39]

- **Propiedades del HDPE reciclado:** el HDPE reciclado mantiene características similares al material virgen, tales como:
 - ✓ Resistencia química: Es altamente resistente a sustancias químicas agresivas, lo que lo hace ideal para aplicaciones en entornos expuestos a la humedad y a productos químicos.[40]

- ✓ Alta resistencia a la tracción y a la compresión: A pesar de ser un material reciclado, el HDPE conserva su capacidad para resistir cargas pesadas, lo que lo convierte en un material adecuado para aplicaciones estructurales como la estabilización de suelos.
 - ✓ Baja permeabilidad: Su estructura molecular compacta le otorga una baja permeabilidad al agua, lo que reduce la filtración de agua en suelos donde se incorpora.[41]
 - ✓ Durabilidad: El HDPE reciclado es resistente al desgaste, lo que contribuye a la longevidad de las estructuras en las que se utiliza.
- **Aplicaciones del HDPE reciclado en la estabilización de suelos:** una de las aplicaciones más recientes y sostenibles del HDPE reciclado es su uso en la estabilización de suelos. Esta técnica consiste en la adición de tiras, fibras o partículas de HDPE a suelos arcillosos o de baja capacidad portante, con el objetivo de optimizar sus propiedades físicas y mecánicas[42]. Algunos beneficios son:
 - ✓ Optimizar la capacidad portante: La incorporación de HDPE aumenta la resistencia del suelo a la compresión, lo que es clave para su uso en subrasantes de pavimentos.
 - ✓ Reducción de la deformabilidad: El HDPE ayuda a disminuir la susceptibilidad del suelo a deformaciones bajo cargas, aumentando la estabilidad de la estructura.
 - ✓ Control de la expansión y contracción: En suelos arcillosos, la adición de HDPE reduce el efecto de expansión y contracción que se produce con cambios de humedad, estabilizando el suelo.[41]

Clasificación de HDPE

- **Envases de productos de limpieza y detergentes**
Los envases para productos como detergentes líquidos, suavizantes y limpiadores suelen estar fabricados con HDPE debido a su resistencia química y durabilidad. [42]



Ilustración 2: Envases de limpieza y detergentes

- **Botellas de leche y jugos**

Las botellas opacas utilizadas para envasar leche, jugos y otros líquidos alimenticios están hechas de HDPE, ya que este material no reacciona con los alimentos y ofrece una buena barrera contra la humedad. [42]



Ilustración 3: Envases de botellas de leche y jugos

- **Tuberías para agua y gas**

Las tuberías de HDPE se utilizan ampliamente en sistemas de distribución de agua potable y gas debido a su flexibilidad, resistencia a la corrosión y larga vida útil [42]



Ilustración 4: Tuberías para agua y gas

- **Tapas de botellas y envases**

Las tapas de botellas para bebidas, productos de limpieza y cosméticos están comúnmente fabricadas con HDPE, aprovechando su rigidez y capacidad para formar sellos herméticos. [42]



Ilustración 5: Tapas de botella y envases

- **Contenedores de basura y reciclaje**

Los contenedores de basura y reciclaje, tanto domésticos como industriales, se fabrican con HDPE debido a su resistencia al impacto y a las condiciones climáticas adversas. [42]



Ilustración 6: Contenedores de basura y reciclaje

Materiales y Métodos

Materiales

Esta investigación se desarrolló en el caserío Granja Sasape, del Distrito de Túcume, Región Lambayeque. Los materiales utilizados son los siguientes:

- ✓ Suelos arcillosos
- ✓ Polietileno de alta densidad reciclado
- ✓ Equipo de laboratorio:
 - Casa grande
 - Tamices
 - Moldes para preparación de probetas de Proctor y CBR.
 - Compactadora estándar para densidad máxima y humedad óptima.

- Balanza y tamices para granulometría.

Tipo y nivel de Investigación

✓ Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo descriptiva, ya que tiene como objetivo proporcionar una descripción detallada de las propiedades físico-mecánicas de los suelos arcillosos de subrasante y de los efectos de la incorporación de polietileno de alta densidad (HDPE) reciclado. Este tipo de investigación permite identificar de manera clara cómo varían los parámetros del suelo, como el CBR y la densidad seca máxima, frente a diferentes proporciones de HDPE, comprendiendo las características del fenómeno estudiado y ofreciendo información precisa sobre el comportamiento de la subrasante ante la adición de polímeros, basada en ensayos de laboratorio estandarizados.

✓ Nivel de investigación

La investigación se encuentra en un nivel explicativo, ya que su objetivo es determinar la relación causal existente entre la incorporación de HDPE y las variaciones en las propiedades físico-mecánicas del suelo. Se pretende no solo identificar cambios en parámetros como el CBR y la densidad seca máxima, sino también establecer las razones por las que el refuerzo con polímeros contribuye a mejorar el comportamiento del suelo frente a cargas de tránsito

✓ Enfoque de investigación

El enfoque de la investigación es cuantitativo, dado que se fundamenta en la recolección de datos numéricos obtenidos a partir de ensayos de laboratorio, con el propósito de establecer patrones de comportamiento y realizar comparaciones estadísticas que permitan validar la efectividad del HDPE en la optimización del desempeño de la subrasante.

Diseño de Investigación

La presente investigación tiene un diseño de tipo experimental, ya que se validará la hipótesis mediante ensayos de laboratorio aplicados a muestras de suelo natural y muestras tratadas con diferentes porcentajes de HDPE reciclado. La hipótesis será confirmada si se comprueba que la adición de HDPE mejora significativamente las propiedades físico-mecánicas de la subrasante frente al suelo sin aditivos.

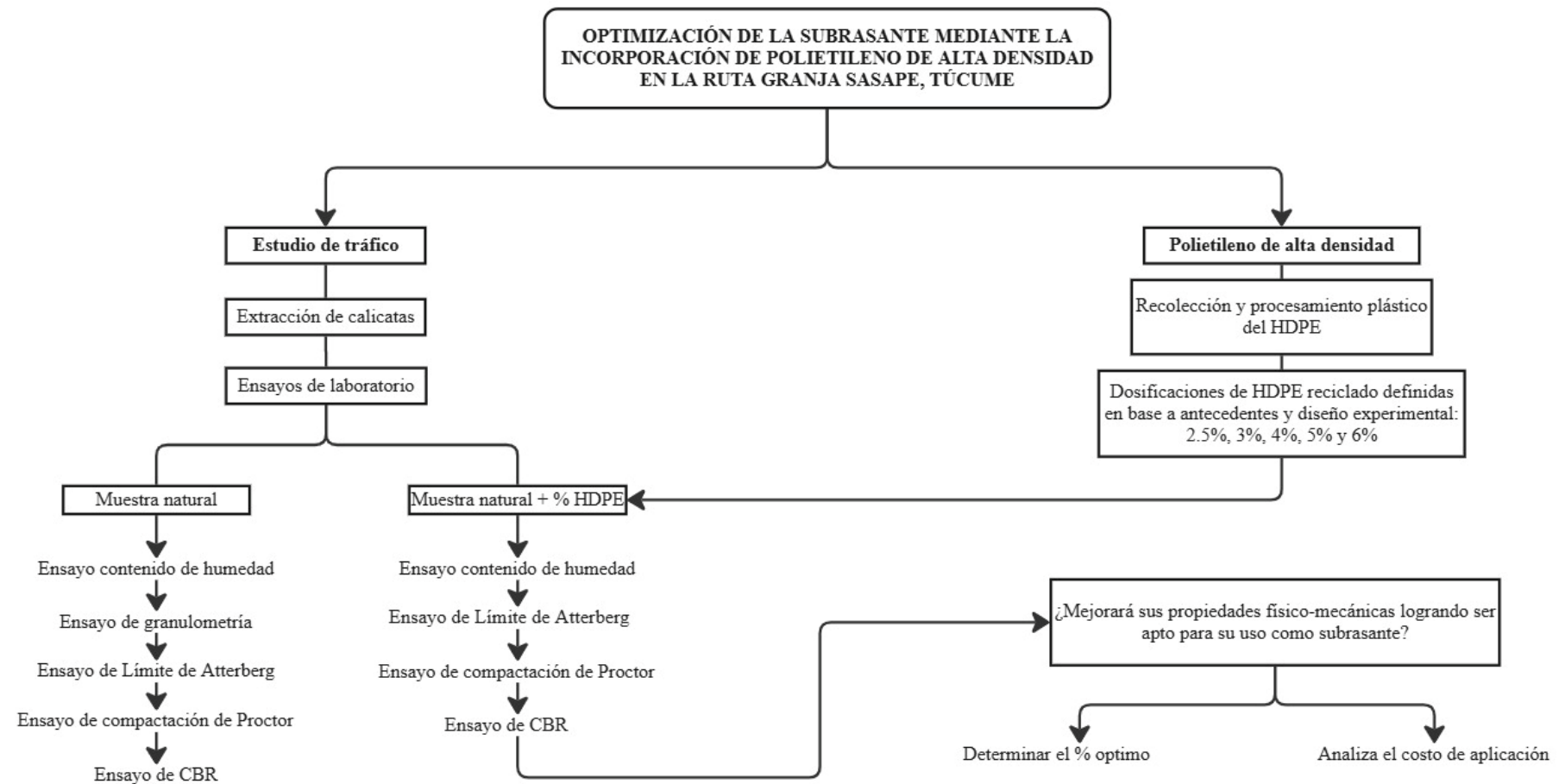


Ilustración 7: Flujograma

Población, muestra y muestreo

✓ Población

La población es el objeto de estudio que está constituida por los suelos a nivel de subrasante ubicado en el caserío Granja Sasape, en el distrito de Túcume.

✓ Muestra

La muestra estuvo conformada por 3 calicatas (C-01, C-02, C-03) ejecutadas dentro de la ruta Granja Sasape. De cada calicata se extrajeron secciones de suelo que fueron posteriormente tratadas en laboratorio con distintos porcentajes de HDPE reciclado (2.5%, 3%, 4%, 5% y 6%), además de una muestra control sin aditivos, utilizada como referencia comparativa.

✓ Muestreo

Se llevará a cabo un muestreo no probabilístico por conveniencia, seleccionando secciones representativas del suelo por criterio del investigador para evaluar sus propiedades físico-mecánicas antes y después de la incorporación del HDPE. Los resultados se registrarán en hojas de campo y serán evaluados mediante los diferentes ensayos de laboratorio.

Tabla IV: Tabla de ensayos de laboratorio.

Ensayos	Suelo Natural (SN)	SN+2.5% HDPE	SN+3% HDPE	SN+4% HDPE	SN+5% HDPE	SN+6% HDPE	Parcial
Granulometría	1	-	-	-	-	-	1
Contenido de Humedad	1	-	-	-	-	-	1
Límite Líquido	3	3	3	3	3	3	18
Límite Plástico	3	3	3	3	3	3	18
Proctor Modificado	3	3	3	3	3	3	18
CBR	3	3	3	3	3	3	18
Total							74

Se realizarán los ensayos de contenido de humedad y granulometría únicamente a la muestra de suelo natural. Respecto a los ensayos de límite líquido, límite plástico, Proctor modificado y CBR se realizan 3 veces tanto para la muestra patrón como para las muestras con adición de HDPE en distintos porcentajes. Teniendo finalmente 74 ensayos por calicata lo que significa un total de 222 ensayos en esta investigación.

Criterio de selección

La ubicación de las calicatas dentro del área de estudio y la selección del estrato de donde se obtuvieron las muestras de suelo se definieron siguiendo el análisis de IMDA. Se eligieron tres puntos de exploración estratégicamente localizados para que sus zonas de influencia cubrieran la mayor extensión posible del tramo evaluado. La selección del estrato muestreado se realizó considerando la uniformidad observada en campo y la profundidad adecuada de 1.50 m, acorde con lo establecido en la Norma Técnica Peruana CE.010 sobre Pavimentos Urbanos, para ser utilizado como subrasante.

En la presente investigación, se utilizó polietileno de alta densidad reciclado como material estabilizante del suelo arcilloso extraído de la ruta Granja Sasape, distrito de Túcume. El criterio adoptado para su elección se fundamenta en las propiedades fisicoquímicas de este polímero. El HDPE es un termoplástico reciclable, de alta resistencia química y mecánica, caracterizado por su baja absorción de agua y su estabilidad estructural. Estas cualidades lo hacen adecuado para mejorar las propiedades físico-mecánicas del suelo, tales como el índice CBR y la plasticidad. Asimismo, su uso promueve una alternativa sostenible al incorporar residuos plásticos reciclados en soluciones de ingeniería vial.

- **Procedimiento de Trituración del HDPE Reciclado**

El proceso de trituración del polietileno de alta densidad (HDPE) reciclado tiene como finalidad reducir el tamaño del material plástico para facilitar su incorporación homogénea al suelo arcilloso durante el proceso de mejora de la subrasante. Este procedimiento fue realizado siguiendo los pasos que se describen a continuación:

Selección del material plástico

- Se seleccionaron residuos de HDPE postconsumo, provenientes principalmente de botellas de detergente, envases de productos industriales y otros desechos plásticos duros. Se evitó el uso de plásticos contaminados con residuos orgánicos o materiales incompatibles.

Lavado y limpieza

- Los residuos fueron lavados manualmente con agua y detergente para eliminar impurezas, etiquetas, residuos químicos y suciedad superficial. Esta etapa es fundamental para evitar alteraciones en el comportamiento del suelo mejorado y garantizar la calidad del material incorporado.

Secado

- Posteriormente, los residuos plásticos lavados fueron colocados en un área ventilada y expuestos al sol para su secado natural. Se verificó que no queden restos de humedad que pudieran interferir en el proceso de trituration o en la mezcla con el suelo.

Trituración mecánica

- Los fragmentos fueron introducidos en una trituradora de plástico (molino de cuchillas), donde el HDPE fue reducido a partículas de entre 2 a 4cm. Se controló que el tamaño del material resultante fuese uniforme para garantizar su correcta mezcla con el suelo.

Almacenamiento del HDPE triturado

- El material triturado fue almacenado en bolsas de polietileno rotuladas con el porcentaje correspondiente, evitando la exposición directa al sol o humedad. Se mantuvo en un lugar seco y cubierto hasta su uso en los ensayos de laboratorio.

La selección de los diferentes porcentajes de polietileno de alta densidad utilizados en esta investigación se fundamentó en la revisión de antecedentes nacionales e internacionales, presentados en el capítulo de revisión de literatura. En dichos estudios se emplearon diversas proporciones, con base en esta información y considerando criterios de viabilidad técnica y comparabilidad experimental, se seleccionaron cinco porcentajes representativos: 2.5%, 3%, 4%, 5% y 6% en peso seco del suelo. Esta gradación permite identificar el comportamiento del suelo estabilizado con HDPE, y determinar el porcentaje óptimo que maximice la resistencia y reduzca la plasticidad del material, sin comprometer su trabajabilidad ni generar efectos negativos por sobre estabilización.

Tabla V: Tabla de porcentajes de HDPE

Porcentaje de HDPE	Sustento según antecedentes	Justificación para incluirlo en la tesis
2.5%	En el estudio de Anielt el al. se utilizó 2.5% de propileno en suelos arcillosos, observando ligeros incrementos en CBR y mejor trabajabilidad.	Se consideró como porcentaje inicial para verificar si pequeñas cantidades ya generan cambios físicos positivos.

3%	Abukhettala y Fall. encontraron que al usar 3% de Pet en subrasantes se optimizó la cohesión sin afectar la compactación.	Fue seleccionado para observar progresión del comportamiento mecánico respecto al 2.5%.
4%	Mejía y Soto (2021) reportaron que con 4% de HDPE se logró una mejora significativa en la resistencia a la penetración y la densidad seca.	Valor medio entre las dosificaciones, ideal para comparar si existe una mejora sostenida.
5%	Banerji et al. concluyó que el 5% era el porcentaje más eficiente antes de alcanzar la saturación, obteniendo el mayor CBR.	Se incluye como dosificación clave para identificar el punto óptimo de mejora en el suelo de Granja Sasape.
6%	Estudios, como el de Guevara, probaron porcentajes altos (6%) y los resultados mostraron cambios significativos en el CBR.	Se consideró como límite superior para verificar si el rendimiento sigue aumentando o empieza a disminuir.

Variables de estudio y Operacionalización

- Variable independiente: Incorporación de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) reciclado.
- Variable dependiente: Propiedades físico-mecánicas del suelo.

Variable y Operacionalización

Tabla VI: Operacionalización de variables

Tipo de variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicadores	Unidad de medida	Escala de medición	Instrumentos
Dependiente: Propiedades físico-mecánicas del suelo	Conjunto de características que determinan el comportamiento del suelo como subrasante en pavimentos, tales como plasticidad, compactación y capacidad de soporte.[27]	Las muestras de suelo con y sin HDPE serán evaluadas mediante ensayos de laboratorio normados (NTP y ASTM) para determinar los cambios en su comportamiento físico-mecánico.	Granulometría	% de material retenido y pasante en tamices	%	Razón	NTP 339.128 (Tamizado e hidrómetro)
			Contenido de humedad	Porcentaje de humedad natural y óptima del suelo	%	Razón	NTP 339.127
			Límites de Atterberg	LL, LP e IP del suelo	%	Razón	NTP 339.129
			Compactación (Proctor modificado)	Densidad seca máxima y humedad óptima	g/cm ³ y %	Razón	NTP 339.141
			Capacidad de soporte (CBR)	Valor de CBR al 95% y 100% MDS	%	Razón	NTP 339.145
			Clasificación SUCS	Índice y grupo del suelo según SUCS	Índices	Nominal/Ordinal	NTP 339.134

Independiente: Incorporación de HDPE reciclado	El polietileno de alta densidad (HDPE) reciclado es un polímero termoplástico derivado del petróleo, ampliamente utilizado en envases y de alta durabilidad. En ingeniería geotécnica puede emplearse como aditivo estabilizante para suelos, mejorando su capacidad de soporte y reduciendo la plasticidad.	El HDPE será dosificado en porcentajes de 0% (patrón), 2.5%, 3%, 4%, 5% y 6% respecto al peso seco del suelo. Cada dosificación será pesada en balanza de precisión y mezclada homogéneamente con el suelo.	Dosificación	Proporción de HDPE en la mezcla de suelo	%	Razón	Balanza de precisión
--	--	---	--------------	--	---	-------	----------------------

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla VII: Matriz de consistencia del proyecto a realizar

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología	Población
Problema General: ¿Cómo optimizar el desempeño de la subrasante mediante la incorporación de HDPE?	Objetivo General: Optimizar el desempeño y mejorar las propiedades físico-mecánicas de la subrasante mediante la incorporación de polietileno de alta densidad (HDPE) en la ruta Granja Sasape, Túcume	Hipótesis General: La incorporación de HDPE en la subrasante de los pavimentos flexibles mejora significativamente las propiedades físico-mecánicas del suelo.	Variable Independiente: Incorporación de HDPE Dimensiones: Diferentes porcentajes de HDPE (2.5%, 3%, 4%, 5%, y 6%)	Tipo de Investigación: Descriptiva Nivel de investigación: Explicativo Enfoque de investigación: Cuantitativo.	Población: Suelos a nivel de subrasante ubicados en el caserío Granja Sasape, distrito de Túcume Muestra: Tres calicatas (C-01, C-02, C-03) dentro de la ruta Granja Sasape. De cada calicata se extrajeron secciones de suelo tratadas con distintos porcentajes de HDPE reciclado (2.5%, 3%, 4%, 5% y 6%), además de una muestra control sin aditivos.
Problemas Específicos: 1. ¿Cuál es el porcentaje óptimo de HDPE para mejorar las propiedades físico-mecánicas de la subrasante? 2. ¿Cómo influye la incorporación de HDPE en la resistencia y el comportamiento mecánico del suelo? 3. ¿Cuál es el impacto ambiental del uso de HDPE en el suelo?	Objetivos Específicos: 1. Realizar un conteo y análisis de la demanda vehicular en la ruta para establecer datos de carga. 2. Determinar las propiedades físico-mecánicas del suelo de la ruta para su caracterización inicial. 3. Definir el porcentaje óptimo de HDPE reciclado en diferentes dosificaciones (2.5%, 3%, 4%, 5% y 6%). 4. Cuantificar las variaciones en las propiedades del suelo arcilloso con HDPE mediante ensayos CBR. 5. Evaluar el impacto ambiental del uso de HDPE en los suelos. 6. Analizar la variación económica que implica su aplicación en la subrasante de pavimentos	Hipótesis Específicas: 1. La incorporación de HDPE mejora la capacidad de soporte del suelo en un X%. 2. La incorporación de HDPE mejora la resistencia y estabilidad del suelo, reduciendo la deformabilidad. 3. La implementación de HDPE es económicamente viable y ambientalmente sostenible.	Variable Dependiente: Propiedades físico-mecánicas del suelo. Dimensiones: Ensayo Proctor Modificado Ensayo CBR Límites de Atterberg Contenido de humedad Clasificación de suelos (SUCS) Granulometría Impacto ambiental.	Técnicas: 1. Ensayo de laboratorio (CBR, Proctor, Granulometría). 2. Análisis ambiental. 3. Análisis económico comparativo entre métodos convencionales y con HDPE.	Instrumentos: Equipos de ensayo de suelo: compactador, equipos CBR, sonómetros. Normas técnicas peruanas (NTP).

Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

En el presente proyecto investigativo se utilizará la técnica de observación de campo y ensayos de laboratorio, con la cual se obtendrá información detallada sobre las propiedades físico-mecánicas del suelo y el impacto de la incorporación de HDPE reciclado en la subrasante. Los datos recolectados se registrarán en una hoja de campo y mediante registros de laboratorio, que incluirán los resultados de ensayos como el CBR, el ensayo de compactación Proctor, y los límites de plasticidad, entre otros, los cuales permitirán analizar el comportamiento del suelo con y sin HDPE

Procedimiento

Se detallará los materiales y el procedimiento usado para el desarrollo del programa experimental sobre el que se fundamenta esta investigación. Inicialmente, se obtuvieron los materiales principales: suelo arcilloso proveniente de la ruta Granja Sasape, distrito de Túcume, y polietileno de alta densidad (HDPE) reciclado. Para la obtención del suelo, se realizó una inspección preliminar en campo con el fin de identificar las zonas representativas de estudio. La ubicación de las calicatas se definió según criterio técnico del investigador, considerando homogeneidad del terreno y accesibilidad. Se excavaron tres (03) calicatas, cada una con una profundidad mínima de 1.50 metros, extrayéndose aproximadamente seis (06) sacos por calicata, con un peso promedio de 60 kg por saco. El HDPE fue recolectado mediante la recuperación de residuos plásticos de alta densidad en sus diferentes formas (envases, tapas, tuberías, entre otros), siendo triturado para su posterior uso. Una vez obtenidos los materiales principales para la investigación, estos fueron transportados al laboratorio para el desarrollo de los ensayos. La fase experimental se inició con la caracterización del suelo en su estado natural a través de una serie de ensayos de laboratorio. Posteriormente, se procedió a realizar los mismos ensayos sobre mezclas de suelo arcilloso con adición de HDPE en diferentes proporciones: 2.5%, 3%, 4%, 5% y 6% respecto al peso seco del suelo, con el propósito de evaluar la influencia del material reciclado en el comportamiento físico-mecánico del mismo.

Materiales en estado natural

Suelo arcilloso

El suelo empleado en la presente investigación fue extraído de la ruta Granja Sasape, ubicada en el distrito de Túcume, provincia de Lambayeque. Para su recolección, se realizaron tres (03) calicatas a lo largo del tramo de estudio, excavadas manualmente hasta una

profundidad de 1.50 metros, con el objetivo de obtener muestras representativas del suelo natural destinado a la estabilización. Durante la excavación, se observaron las condiciones del perfil del suelo y se verificó que no se presentó presencia de nivel freático en ninguna de las calicatas

En la imagen se puede apreciar la ubicación de cada calicata extraída.



Ilustración 8: Ubicación de calicatas

Tabla VIII: Coordenadas UTM de las calicatas realizadas en el tramo de estudio

Calicata	Coordenadas UTM	
C-01	6°29'7.77"S	79°54'9.19"O
C-02	6°28'58.50"S	79°54'6.58"O
C-03	6°28'47.26"S	79°54'3.27"O

A continuación, se presenta la ubicación exacta de los puntos donde se realizaron las calicatas correspondientes para la extracción del suelo utilizado en esta investigación.

Calicata N°01



Ilustración 9: Calicata N°1 – extracción de muestra

Calicata N°2



Ilustración 10: Calicata N°2 – extracción de muestra

Calicata N°03



Ilustración 11: Calicata N°3 – extracción de muestra

Polietileno de alta densidad

El polímero fue obtenido a través de la recolección de residuos de polietileno de alta densidad (HDPE) en sus diversas presentaciones, tales como envases, tapas y fragmentos de tuberías.



Ilustración 12: Aditivo de polietileno de alta densidad reciclado

Ensayos de laboratorio

Posteriormente a la obtención de los materiales para la investigación, se procedió a iniciar los ensayos de laboratorio correspondiente. Estos ensayos se llevan a cabo siguiendo las directrices establecidas en el manual de ensayos de materiales para la carretera de MTC

Ensayos físicos:

- Contenido de humedad del suelo (MTC E 108 – ASTM D2216)
- Análisis granulométrico del suelo por tamizado (MTC E 107 – ASTM D 722)
- Ensayo de límite de atterberg (MTC E 110)

Ensayos mecánicos:

- Ensayo de proctor modificado (ASTM D 1557 – NTP 339.141)
- Ensayo de CBR (MTC E 132 – ASTM D 1883)

Se realizaron los diferentes ensayos de laboratorio a las muestras extraídas de cada calicata, tanto en su estado natural como con la adición de HDPE, con el propósito de determinar sus propiedades físico-mecánicas y establecer el porcentaje óptimo de polietileno de alta densidad para la mejora del suelo.

Resultados y Discusiones

Realizar un conteo y análisis de la demanda vehicular en la ruta para establecer datos de carga

Dando cumplimiento al primer objetivo de la presente investigación, se llevó a cabo el cálculo del Índice Medio Diario Anual (IMDA) con el fin de estimar el tránsito vehicular en ambos sentidos de la vía de dos carriles ubicada en la ruta del caserío Granja Sasape, distrito de Túcume. El estudio se efectuó durante 7 días consecutivos, siguiendo lo establecido por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), obteniéndose como resultado un IMDA de 453 vehículos por día. De acuerdo con el rango determinado por el MTC, que establece entre 401 y 2000 vehículos/día para realizar tres calicatas, se ha considerado apropiado ejecutar tres calicatas de estudio, las cuales permitirán desarrollar los ensayos correspondientes en laboratorio para la caracterización físico-mecánica del suelo.

Datos obtenidos mediante el conteo vehicular

Ya que el conteo se hizo por 7 días (de lunes a domingo) y se consideraron ambos sentidos (ida y vuelta), sumamos los totales de cada día así:

Tabla IX: Estudio de IMDA

Día	Total, Día (ambos sentidos)
Lunes	$371 + 569 = 940$
Martes	$528 + 420 = 948$
Miércoles	$443 + 469 = 912$
Jueves	$423 + 395 = 818$
Viernes	$420 + 394 = 814$
Sábado	$506 + 504 = 1,010$
Domingo	$418 + 452 = 870$

Calcular el IMDA final

El IMDA es el promedio de los IMD diarios durante los 7 días de conteo:

$$IMDA = \frac{470 + 474 + 456 + 409 + 407 + 505 + 435}{7}$$

$$IMDA = 31687 = 453.14 \approx 453 \text{ veh/día.}$$

Tabla X: Estudio de IMDA

Tabla XI: Estudio de tráfico

Día / Hora	Sentido	Automóvil	Station wagon	Pick Up	Panel	Combi Rural	Micro	Ómnibus 2 Ejes	Ómnibus 3 Ejes	Ómnibus 4 Ejes	Camión 2 Ejes	Camión 3 Ejes	Camión 4 Ejes	Total, del día
Lunes: 7am – 9am	Sasape – Túcume	56	19	65	25	28	7	26	57	6	34	42	6	371
Lunes 5pm – 7pm	Túcume – Sasape	68	64	25	37	62	26	53	63	22	64	19	66	569
Martes: 7am – 9am	Sasape – Túcume	66	51	66	55	59	68	7	55	11	25	43	22	528
Martes: 5pm – 7pm	Túcume – Sasape	40	64	18	13	57	6	64	48	12	51	39	8	420
Miércoles: 7am – 9am	Sasape – Túcume	54	46	26	10	58	8	58	67	22	48	38	8	443
Miércoles: 5pm – 7pm	Túcume – Sasape	33	64	62	28	48	67	25	12	18	42	26	44	469
Jueves: 7am – 9am	Sasape – Túcume	55	59	30	35	25	21	67	36	9	58	14	14	423
Jueves: 5pm – 7pm	Túcume – Sasape	25	12	53	17	67	60	45	64	33	49	28	44	395
Viernes: 7am – 9am	Sasape – Túcume	36	44	15	65	59	10	55	38	29	20	26	23	420
Viernes: 5pm – 7pm	Túcume – Sasape	28	29	50	25	34	18	26	47	32	31	21	53	394
Sábado: 7am – 9am	Sasape – Túcume	42	51	66	33	58	16	38	41	24	63	42	32	506
Sábado: 5pm – 7pm	Túcume – Sasape	37	39	21	20	44	14	60	32	15	69	29	38	504
Domingo: 7am – 9am	Sasape – Túcume	44	22	43	35	62	37	18	54	10	40	38	15	418
Domingo: 5pm – 7pm	Túcume – Sasape	36	41	20	31	45	17	50	21	17	46	27	39	452

Interpretación del resultado del conteo vehicular

El conteo vehicular realizado en la ruta Granja Sasape, distrito de Túcume, permitió identificar una demanda promedio diaria de tránsito de 453 vehículos, resultado que se obtuvo aplicando el método de conteo manual durante 7 días consecutivos, en ambos sentidos de circulación, conforme a los lineamientos establecidos por el MTC.

Este valor del IMDA resulta fundamental dentro del desarrollo de la presente investigación, ya que, según los criterios establecidos en el Manual de Carreteras – Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos (MTC), para rangos de tránsito vehicular entre 401 y 2000 vehículos por día, corresponde la ejecución de tres calicatas para caracterizar el suelo del tramo en estudio.

Por tanto, el resultado obtenido justifica técnicamente la realización de tres calicatas, las cuales permitirán extraer muestras representativas del suelo para la ejecución de ensayos de laboratorio, asegurando así que las condiciones del terreno sean adecuadamente evaluadas y sirvan de base para la posterior incorporación del aditivo HDPE en el mejoramiento de la subrasante.

Determinar las propiedades físico-mecánicas del suelo para su caracterización inicial

ENSAYOS DE MUESTRA PATRÓN

Ensayo de contenido de humedad - MTC E108

En el presente estudio, se determinó el contenido de humedad natural de las muestras obtenidas de las tres calicatas realizadas en la ruta del caserío Granja Sasape, distrito de Túcume. Este ensayo se efectuó conforme a los lineamientos establecidos en la norma NTP 339.127 (ASTM D2216), que especifica el procedimiento para determinar la cantidad de agua presente en una muestra de suelo inalterado.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla XII: Resultado de contenido de humedad de muestra natural

CONTENIDO DE HUMEDAD		
Calicata	Profundidad	% de humedad
C-1	1.5	9.51%
C-2	1.5	9.78%

C-3	1.5	9.72%
-----	-----	-------

El contenido de humedad natural determinado para las calicatas fue de **9.51% (C-1)**, **9.78% (C-2)** y **9.72% (C-3)**. Estos valores presentan una variación mínima, lo que indica homogeneidad en las condiciones del suelo a lo largo del tramo estudiado. El hecho de que el contenido de humedad se encuentre por debajo del rango óptimo para compactación sugiere que el suelo, en estado natural, podría no alcanzar una buena densificación sin previo acondicionamiento. Esta información es clave para el diseño del mejoramiento con HDPE, ya que permite ajustar la humedad durante la compactación para lograr una mezcla eficiente y representativa en los ensayos de laboratorio.

Ensayo de granulometría por tamizado - MTC E 107

Con el objetivo de clasificar las muestras de suelo provenientes de las calicatas C-01, C-02 y C-03, se llevó a cabo el análisis granulométrico utilizando el método de tamizado.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del análisis granulométrico realizado a la muestra de suelo extraída de la calicata C-01, C-02, C-03

Tabla XIII: Resultado de granulometría de la muestra natural

Granulometría por tamizado-muestras naturales			
Calicata	Grava (%)	Arena (%)	Arcilla y Limo (%)
C-01	0.2%	6.0%	93.8%
C-02	0.7%	7.1%	92.2%
C-03	0.4%	5.9%	93.7%

En general, las muestras analizadas presentan un alto contenido de material fino (arcilla y limo), con valores que oscilan entre el 92.2% y el 93.8%, lo que confirma la predominancia de suelos arcillosos en la zona de estudio. La calicata C-01 registra la mayor proporción de finos (93.8%), seguida de C-03 (93.7%), mientras que la C-02 presenta un valor ligeramente menor (92.2%), aunque mantiene la misma tendencia de suelos finos. El contenido de grava y arena en las tres calicatas es muy reducido, sin superar el 7.1%, lo que evidencia la carencia de fracciones gruesas que aporten resistencia estructural.

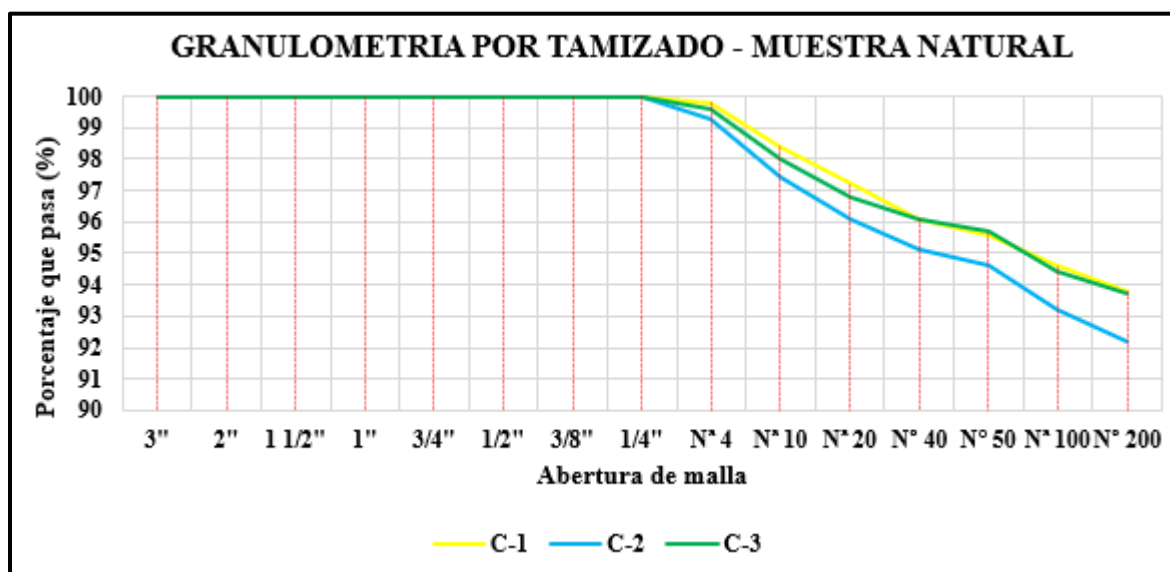


Ilustración 13: Curva de granulometría de las 3 calicatas

La curva granulométrica de las tres calicatas evidencia una marcada predominancia de material fino, ya que en todas ellas más del 92% corresponde a partículas menores a 0.075 mm. La calicata C-1 muestra una pendiente muy empinada en el rango de finos, lo que refleja un alto contenido de arcilla y limo. De manera similar, la C-3 presenta un comportamiento casi idéntico, con una curva igualmente pronunciada, confirmando su naturaleza arcillosa. En contraste, la C-2 exhibe una pendiente ligeramente menos inclinada, debido a un leve incremento de arena (7.1%) y grava (0.7%) en su composición, aunque sigue mostrando un dominio claro de fracciones finas. En conjunto, las tres curvas representan suelos de granulometría pobremente graduada, con escasa presencia de partículas gruesas y una fuerte concentración en fracciones arcillosas, lo cual anticipa problemas de baja capacidad portante y alta susceptibilidad a la humedad.

Ensayo de Límites de Atterberg

Con el propósito de evaluar la plasticidad del suelo natural presente en la ruta del caserío Granja Sasape, distrito de Túcume, se realizaron los ensayos de límites de Atterberg a las muestras extraídas de las calicatas C-1, C-2 y C-3. Estos ensayos permitieron determinar el LL, el LP y el IP de cada muestra, parámetros fundamentales para clasificar el tipo de suelo y predecir su comportamiento ante variaciones de humedad.

Calicata N°01: Vuelta 01 - Vuelta 02 - Vuelta 03

Tabla XIV: Resultado de Límite de Atterberg de la muestra natural C1

CONSISTENCIA FISICA DE LA MUESTRA			
CALICATAS	V1	V2	V3
Límite Líquido	45.55	39.21	43.17
Límite Plástico	21.86	16.89	20.85
Índice de Plasticidad	23.68	22.32	22.32

Los resultados muestran que las tres muestras presentan altos valores de plasticidad, característicos de suelos arcillosos. La muestra M1 alcanza el mayor índice de plasticidad (23.68%), lo que evidencia una mayor capacidad de deformación y sensibilidad ante la humedad, mientras que M2 y M3 registran valores similares (22.32%), reflejando una tendencia general de alta plasticidad. En conjunto, estos resultados confirman que el suelo presenta condiciones desfavorables para su uso directo como subrasante, debido a su baja resistencia y elevada deformabilidad.

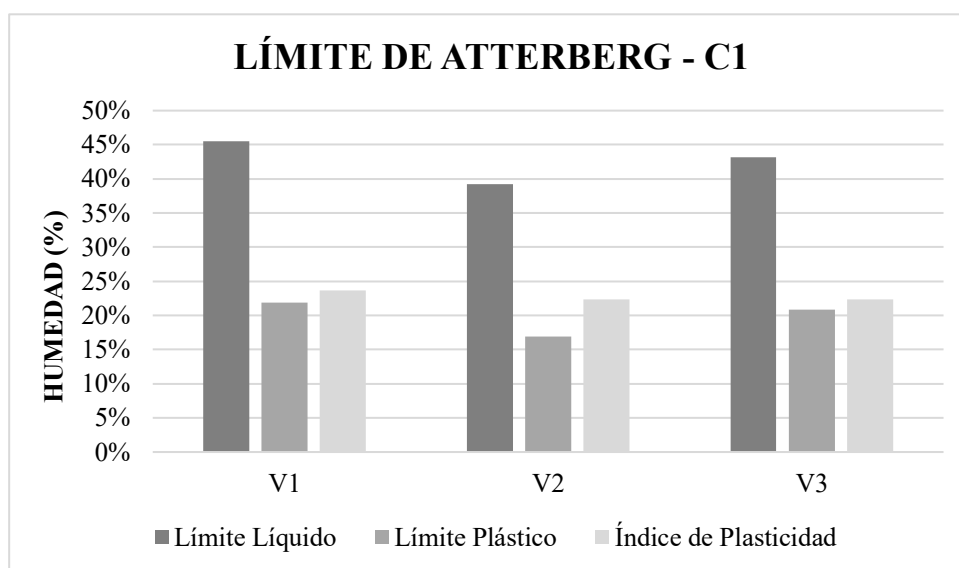


Ilustración 14: Gráfica de Límite de Atterberg de muestra natural C1

Calicata N°02: Vuelta 01 - Vuelta 02 - Vuelta 03

Tabla XV: Resultado de Límite de Atterberg de la muestra natural C2

CONSISTENCIA FISICA DE LA MUESTRA			
CALICATAS	V1	V2	V3
Límite Líquido	39.29	38.62	36.65
Límite Plástico	22.46	24	19.7
Índice de Plasticidad	16.82	14.62	16.95

Los resultados indican que las tres muestras presentan plasticidad media a alta, propia de suelos arcillosos de baja plasticidad (CL). La muestra M1 registra el índice de plasticidad más alto (16.95%), evidenciando una mayor capacidad de deformación; en cambio, M2 muestra el valor más bajo (14.62%).

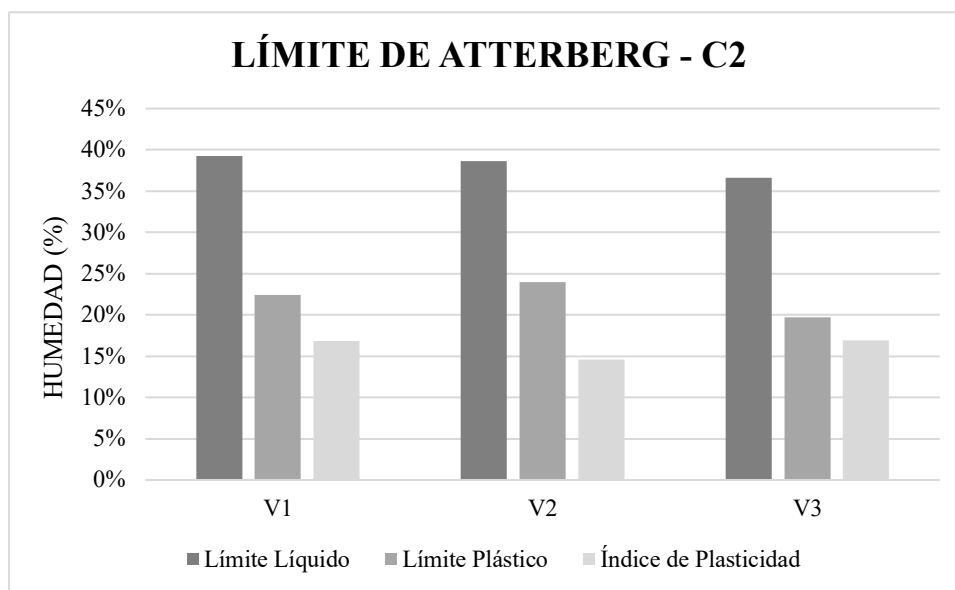


Ilustración 15: Gráfica de Límite de Atterberg de muestra natural C2

Calicata N°03: Vuelta 01 - Vuelta 02 - Vuelta 03

Tabla XVI: Resultado de Límite de Atterberg de la muestra natural C3

CONSISTENCIA FISICA DE LA MUESTRA			
CALICATAS	M1	M2	M3
Límite Líquido	39.49	37.28	39.64
Límite Plástico	20.77	18.47	20.57
Índice de Plasticidad	18.72	18.80	19.07

Los resultados obtenidos evidencian que las tres muestras presentan valores de plasticidad relativamente altos, propios de suelos arcillosos con presencia significativa de finos. La muestra M3 registra el índice de plasticidad más alto (19.07%), seguida de M2 (18.80%) y M1 (18.72%). En general, los valores indican que el suelo posee alta deformabilidad y sensibilidad a la

humedad, condiciones que pueden afectar su capacidad portante y su estabilidad cuando se utiliza como subrasante.

Clasificación de suelo por el sistema SUCS Y AASHTO

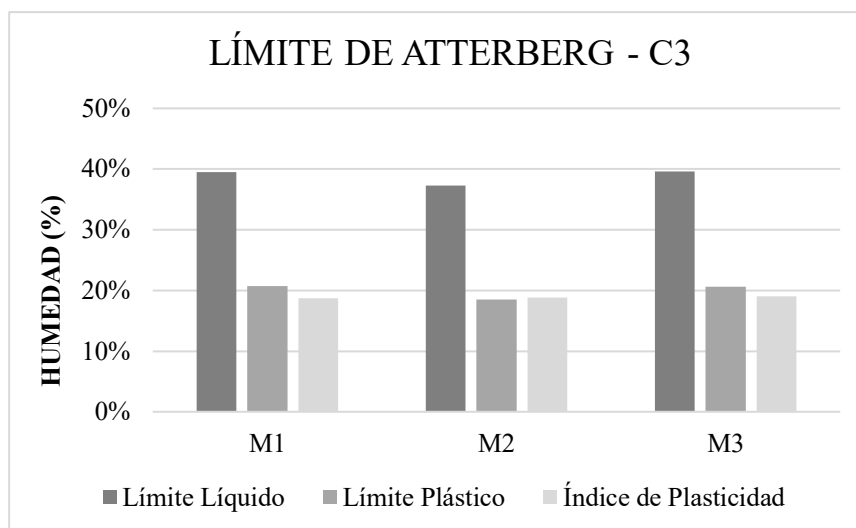


Ilustración 16: Gráfica de Límite de Atterberg de muestra natural C3

De acuerdo con los resultados anteriormente mencionados, se realizó la clasificación de cada una de las calitas extraídas, representadas en la Tabla XV

Tabla XVII: Clasificación de suelo de muestras naturales

Clasificación de las muestras extraídas			
Calicata	Profundidad	ASSHTO	SUCS
C-1	1.50 m	A-7-6 (15)	CL
		Malo	Arcilla de baja plasticidad
C-2	1.50 m	A-6 (11)	CL
		Malo	Arcilla de baja plasticidad
C-3	1.50 m	A-6 (12)	CL
		Malo	Arcilla de baja plasticidad

De acuerdo con los resultados de clasificación, las tres calicatas analizadas corresponden a suelos de baja calidad para subrasante, según los sistemas AASHTO y SUCS. La calicata C-1, a una profundidad de 1.50 m, fue clasificada como A-7-6 (15) en el sistema AASHTO y CL en el SUCS, lo que indica una arcilla inorgánica de baja plasticidad, considerada inadecuada para

soportar cargas de tránsito. Por su parte, las calicatas C-2 y C-3 fueron clasificadas como A-6 (11 y 12) bajo AASHTO, y también como CL en el SUCS, coincidiendo en su caracterización como arcillas de baja plasticidad. En todos los casos, la clasificación “Malo” en AASHTO refleja que estos suelos poseen baja capacidad portante, alta susceptibilidad a la humedad y tendencia a deformarse bajo carga, condiciones poco favorables para su uso directo como subrasante.

Ensayo de Proctor modificado

Para la muestra de suelo extraída de la calicata C-1, C-2, C-3, se realizó el ensayo Proctor modificado con el objetivo de determinar su densidad seca máxima y la correspondiente humedad óptima de compactación, parámetros fundamentales para evaluar el comportamiento del suelo bajo esfuerzos de carga.

El ensayo se ejecutó conforme a la normativa NTP 339.159 (ASTM D1557), utilizando tres repeticiones con diferentes contenidos de humedad para garantizar la fiabilidad de los resultados.

Calicata N°01: Vuelta 01 - Vuelta 02 - Vuelta 03

Tabla XVIII: Resultados de Proctor Modificado C-01

PROPIEDADES	Calicata 01		
	Vuelta 01	Vuelta 02	Vuelta 03
Densidad máxima seca (g/cm³)	1.946	1.899	1.949
Óptimo contenido de humedad (%)	12.916	12.052	12.60

Los resultados del ensayo Proctor Modificado para la calicata 01 muestran una densidad máxima seca promedio de 1.93 g/cm³ y un contenido óptimo de humedad promedio de 12.52%. Estos valores indican que el suelo requiere una cantidad moderada de humedad para alcanzar su máxima compactación, lo cual es típico de suelos arcillosos con contenido apreciable de finos. La ligera variación entre las tres vueltas evidencia una buena uniformidad en el comportamiento del material, confirmando que el suelo presenta una densidad media y una plasticidad que puede afectar su compactación en campo

Calicata N°02: Vuelta 01 - Vuelta 02 - Vuelta 03

Tabla XIX: Resultados de Proctor Modificado C-02

PROPIEDADES	Calicata 02		
	Vuelta 01	Vuelta 02	Vuelta 03
Densidad máxima seca (g/cm³)	1.955	1.943	1.895
Óptimo contenido de humedad (%)	11.613	11.416	12.462

Los resultados del ensayo Proctor Modificado correspondientes a la calicata 02 evidencian una densidad máxima seca promedio de 1.93 g/cm³ y un contenido óptimo de humedad cercano al 11.83%. Estos valores indican que el suelo alcanza su mejor grado de compactación con una cantidad moderada de agua

Calicata N°03: Muestra 01 - Muestra 02 - Muestra 03

Tabla XX: Resultados de Proctor Modificado C-03

PROPIEDADES	Calicata 03		
	Vuelta 01	Vuelta 02	Vuelta 03
Densidad máxima seca (g/cm³)	1.860	1.824	1.915
Óptimo contenido de humedad (%)	15.011	14.778	14.975

Los resultados obtenidos del ensayo Proctor Modificado para la calicata 03 indican una densidad máxima seca promedio de 1.87 g/cm³ y un contenido óptimo de humedad promedio de 14.92%. Estos datos muestran que el suelo necesita una cantidad relativamente alta de humedad para alcanzar su máxima compactación, lo cual es característico de suelos arcillosos con elevado contenido de finos y alta plasticidad.

Ensayo de CBR

Con el objetivo de evaluar la capacidad de soporte del suelo en estado natural, se realizaron los ensayos de California Bearing Ratio (CBR) a las muestras extraídas de las calicatas C-1, C-2 y C-3. Las pruebas se ejecutaron de acuerdo con la norma NTP 339.034 (ASTM D1883).

Se presentan los cálculos correspondientes a cada muestra obtenida de la calicata en relación con el ensayo CBR. Dicho ensayo considera dos niveles de penetración, de 0.1" y 0.2", los

cuales se analizan para porcentajes de compactación del 95% y 100% de la densidad máxima seca (MDS), respectivamente.

CALICATA N°01: Vuelta 01 - Vuelta 02 - Vuelta 03

Tabla XXI: Resultados de CBR – C1

CALIFORNIA BEARING RATIO – C1					
CALICATA	VUELTA	Penetración 0.1"		Penetración 0.2"	
		100%	95%	100%	95%
C-1	V-1	3%	2%	4%	3%
C-1	V-2	4%	4%	5%	5%
C-1	V-3	4%	4%	5%	4%

Los resultados obtenidos del ensayo CBR para la calicata C-1 muestran valores entre 2% y 5%, tanto a 0.1" como a 0.2" de penetración, evidenciando una baja capacidad portante del suelo natural. Se observa una ligera variación entre los grados de compactación (100% y 95%), lo que refleja sensibilidad del material a los cambios de densidad.

CALICATA N°02: Vuelta 01 - Vuelta 02 - Vuelta 03

Tabla XXII: Resultados de CBR – C2

CALIFORNIA BEARING RATIO – C2					
CALICATA	VUELTA	Penetración 0.1"		Penetración 0.2"	
		100%	95%	100%	95%
C-2	V-1	5%	4%	5%	4%
C-2	V-2	5%	4%	5%	4%
C-2	V-3	5%	3%	5%	4%

Los resultados obtenidos del ensayo CBR para la calicata C-2 presentan valores entre 3% y 5%, tanto para 0.1" como para 0.2" de penetración, lo que evidencia una baja resistencia al esfuerzo de penetración. Se aprecia una leve disminución del CBR al reducir la compactación de 100% a 95%, reflejando alta sensibilidad a la humedad y densidad del suelo. En conjunto, estos resultados confirman que el material posee una capacidad portante deficiente

CALICATA N°03: Vuelta 01 - Vuelta 02 - Vuelta 03

Tabla XXIII: Resultados de CBR – C3

CALIFORNIA BEARING RATIO – C3					
CALICATA	VUELTA	Penetración 0.1"		Penetración 0.2"	
		100%	95%	100%	95%
C-3	V-1	4%	3%	5%	3%
C-3	V-2	4%	3%	5%	3%
C-3	V-3	5%	4%	5%	4%

Los resultados obtenidos del ensayo CBR en la calicata C-3 registran valores que varían entre 3% y 5%, tanto para penetraciones de 0.1" como de 0.2". Este comportamiento refleja un suelo de baja resistencia estructural, incapaz de distribuir adecuadamente las cargas del tránsito

Definir el porcentaje óptimo de HDPE reciclado en diferentes dosificaciones (2.5%, 3%, 4%, 5% y 6%)

ENSAYOS DE MUESTRA PATRÓN + HDPE

Límite de Atterberg con HDPE

Con el objetivo de analizar cómo afecta la incorporación de HDPE reciclado al comportamiento plástico del suelo arcilloso, se realizaron ensayos de límites de Atterberg (límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad) en muestras sometidas a distintos porcentajes de HDPE. Estos ensayos permitieron analizar las variaciones en la plasticidad del suelo, información fundamental para determinar su idoneidad y estabilidad ante la mejora con material reciclado.

Calicata N°01: Vuelta 01 +2.5% - Vuelta 02 +2.5% - Vuelta 03 +2.5%

Tabla XXIV: Resultados de CI- Limite de Atterberg + 2.5% HDPE

Consistencia Física de la muestra	Calicata + 2.5%HDPE		
	Vuelta 01	Vuelta 02	Vuelta 03
Límite Líquido	14.22	13.21	16.34
Límite Plástico	5.52	4.45	8.67
Índice de Plasticidad	8.70	8.75	7.67

Los resultados obtenidos de los límites de consistencia para la calicata 01 con 2.5% de HDPE muestran una reducción significativa en los valores de plasticidad respecto al suelo natural. Los límites líquidos se mantienen entre 13.21% y 16.34%, mientras que los índices de plasticidad varían entre 7.67% y 8.75%, indicando una disminución del comportamiento plástico del suelo. Esta reducción evidencia que la incorporación del 2.5% de HDPE mejora ligeramente la estabilidad del material.

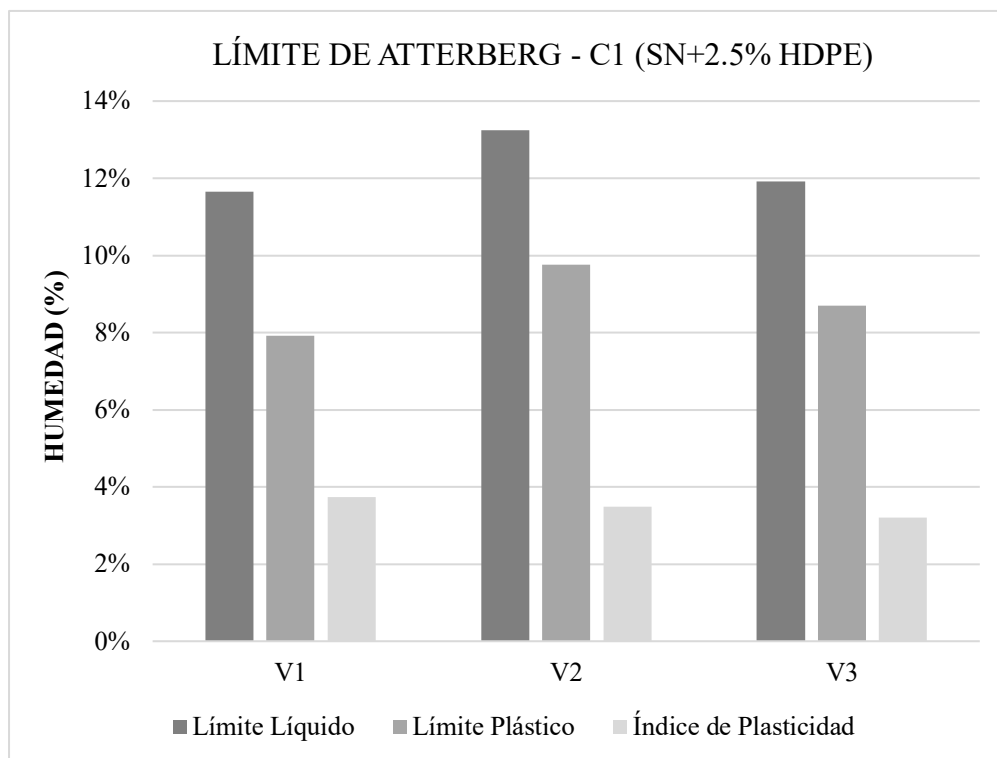


Ilustración 17: Gráfica de Límite de Atterberg – C1 (SN +2.5%HDPE)

Calicata N°01: Vuelta 01 +3% - Vuelta 02 +3% - Vuelta 03 +3%

Tabla XXV: Resultados de C1- Límite de Atterberg + 3% HDPE

Consistencia Física de la muestra	Calicata +3% HDPE		
	Vuelta 01	Vuelta 02	Vuelta 03
Límite Líquido	14.36	17.99	17.14
Límite Plástico	6.84	8.66	9.99
Índice de Plasticidad	7.52	9.33	7.15

Los resultados de los límites de consistencia para la calicata 01 con 3% de HDPE muestran una tendencia a la reducción de la plasticidad en comparación con el suelo natural. Los límites líquidos se encuentran entre 14.36% y 17.99%, mientras que los índices de plasticidad oscilan entre 7.15% y 9.33%, reflejando un comportamiento más estable y menos cohesivo.

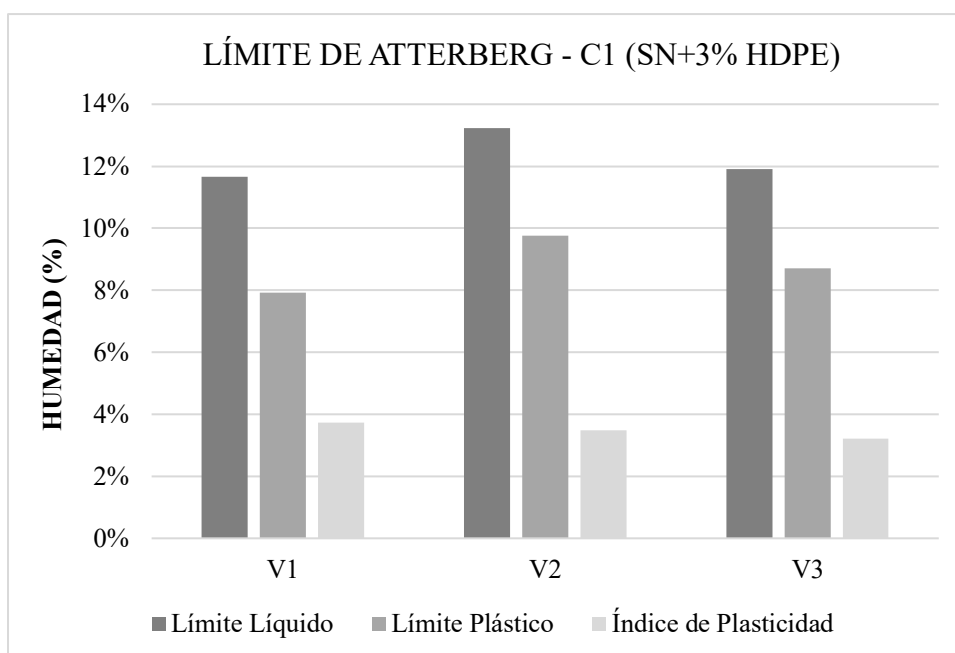


Ilustración 18: Gráfica de Límite de Atterberg – C1 (SN + 3%HDPE)

Calicata N°01: Vuelta 01 +4% - Vuelta 02 +4% - Vuelta 03 +4%

Tabla XXVI: Resultados de C1- Límite de Atterberg + 4% HDPE

Consistencia Física de la muestra	Calicata 4% HDPE		
	Vuelta 01	Vuelta 02	Vuelta 03
Límite Líquido	15.27	12.10	14.33
Límite Plástico	10.11	7.02	9.18
Índice de Plasticidad	5.15	5.08	5.15

Los resultados obtenidos de los límites de consistencia para la calicata 01 con 4% de HDPE evidencian una notable reducción en la plasticidad del suelo. Los límites líquidos varían entre 12.10% y 15.27%, mientras que los índices de plasticidad se mantienen en un rango estrecho de 5.08% a 5.15%, reflejando un comportamiento más rígido y menos sensible a la humedad

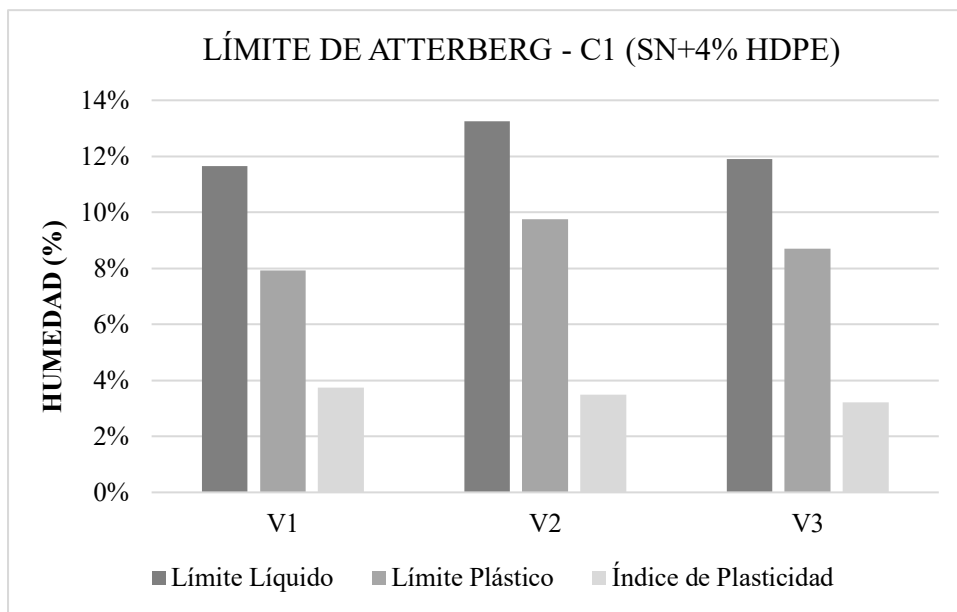


Ilustración 19: Gráfica de Límite de Atterberg – C1 (SN + 4%HDPE)

Calicata N°01: Vuelta 01 +5% - Vuelta 02 +5% - Vuelta 03 +5%

Tabla XXVII: Resultados de C1- Límite de Atterberg + 5% HDPE

Consistencia Física de la muestra	Calicata + 5% HDPE		
	Vuelta 01	Vuelta 02	Vuelta 03
Límite Líquido	11.66	13.24	11.91
Límite Plástico	7.92	9.76	8.70
Índice de Plasticidad	3.74	3.48	3.21

Los resultados de los límites de consistencia para la calicata 01 con 5% de HDPE muestran una disminución significativa en la plasticidad del suelo, evidenciada por índices de plasticidad muy bajos, entre 3.21% y 3.74%. Los límites líquidos se reducen a valores de 11.66% a 13.24%, lo que indica una menor retención de agua y una reducción en la cohesión del material

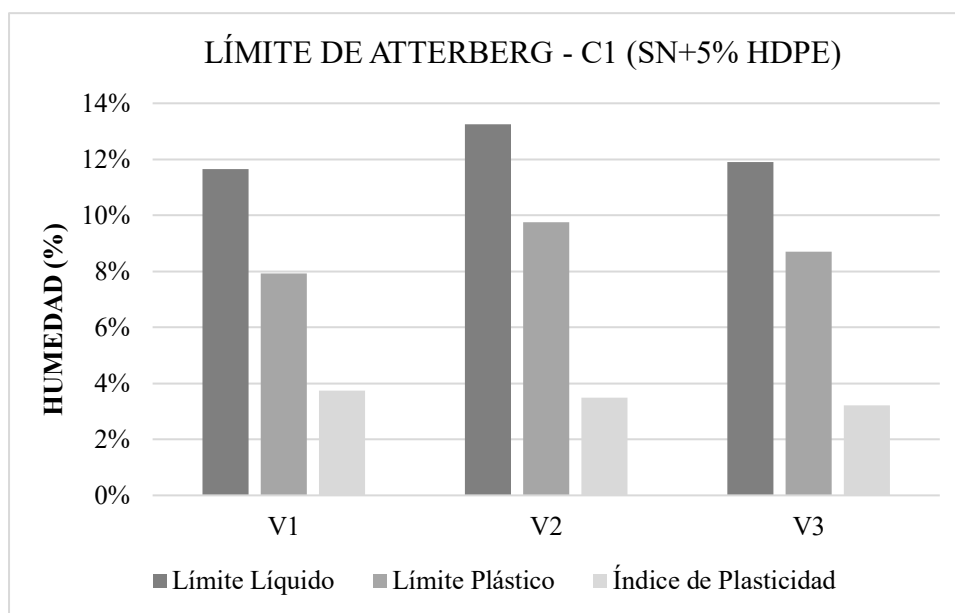


Ilustración 20: Gráfica de Límite de Atterberg – C1 (SN + 5%HDPE)

Calicata N°01: Vuelta 01 +6% - Vuelta 02 +6% - Vuelta 03 +6%

Tabla XXVIII: Resultados de C1- Limite de Atterberg + 6% HDPE

Consistencia Física de la muestra	Calicata + 6% HDPE		
	Vuelta 01	Vuelta 02	Vuelta 03
Límite Líquido	8.57	7.46	6.29
Límite Plástico	5.56	5.26	4.17
Índice de Plasticidad	3.01	2.20	2.12

En la calicata 01 con 6% de HDPE, se observa una disminución significativa en el límite líquido y en el índice de plasticidad, alcanzando los valores más bajos entre todas las dosificaciones. Esto indica que el suelo presenta una notable reducción en su plasticidad y en su capacidad de retener agua, reflejando una mejora en su estabilidad y resistencia ante variaciones de humedad.

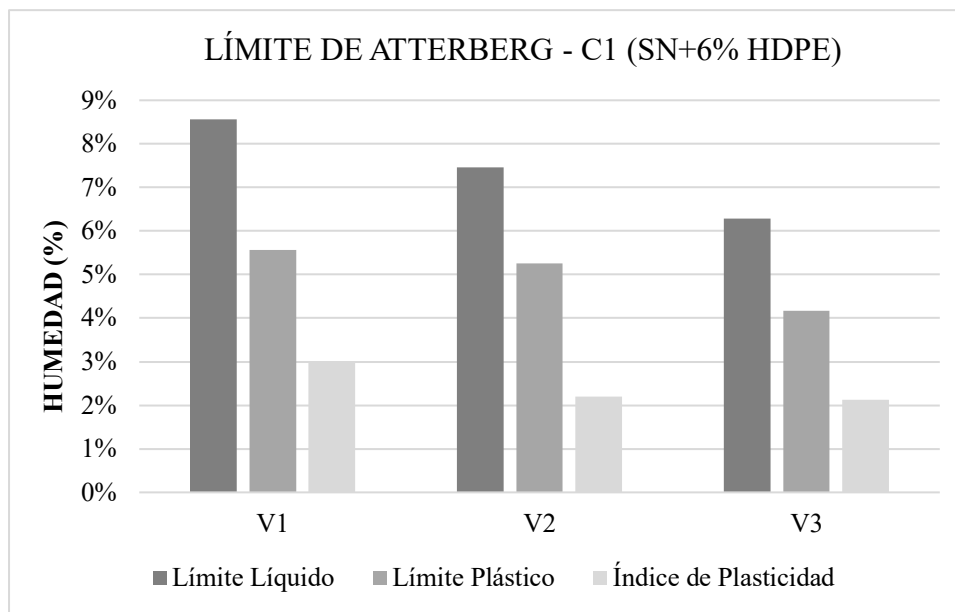


Ilustración 21: Gráfica de Límite de Atterberg – C1 (SN + 6%HDPE)

Calicata N°02: Vuelta 01 +2.5% - Vuelta 02 +2.5% - Vuelta 03 +2.5%

Tabla XXIX: Resultados de C2- Límite de Atterberg + 2.5% HDPE

Consistencia Física de la muestra	Calicata 02		
	Vuelta 01	Vuelta 02	Vuelta 03
Límite Líquido	14.97	15.18	15.16
Límite Plástico	5.69	6.36	5.70
Índice de Plasticidad	9.28	8.83	9.46

En la calicata 02 con 2.5% de HDPE, los resultados muestran una ligera disminución en los valores de límite líquido y plástico en comparación con el suelo natural, lo que evidencia una reducción moderada en la plasticidad. El índice de plasticidad mantiene valores cercanos entre las tres muestras, indicando un comportamiento más homogéneo y estable. En general, la incorporación del 2.5% de HDPE mejora parcialmente las características del suelo

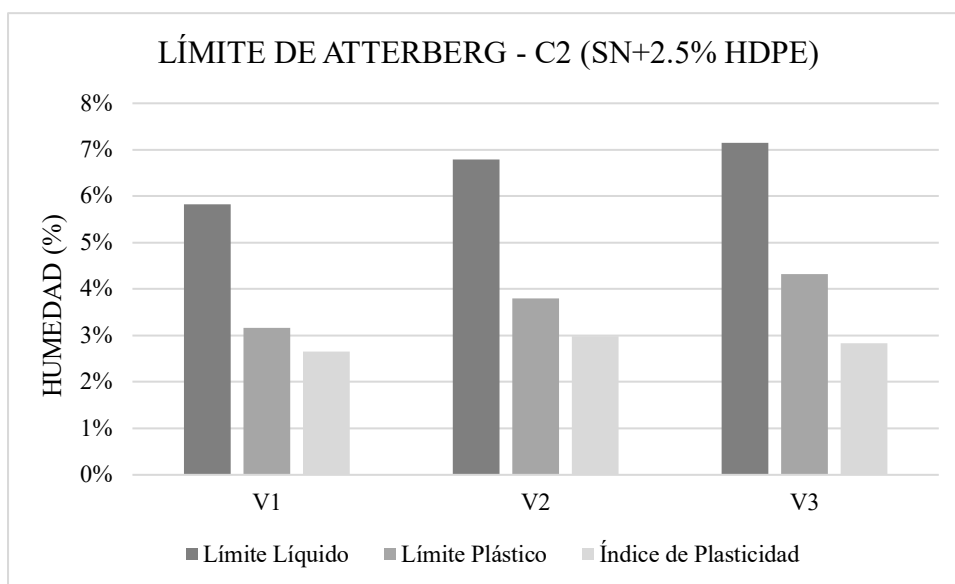


Ilustración 22: Gráfica de Límite de Atterberg – C2 (SN + 2.5%HDPE)

Calicata N°02: Vuelta 01 +3% - Vuelta 02 +3% - Vuelta 03 +3%

Tabla XXX: Resultados de C2- Limite de Atterberg + 3% HDPE

Consistencia Física de la muestra	Calicata 02		
	Vuelta 01	Vuelta 02	Vuelta 03
Límite Líquido	13.06	14.13	15.99
Límite Plástico	5.93	6.88	8.87
Índice de Plasticidad	7.13	7.25	7.12

En la calicata 02 con 3% de HDPE, los resultados reflejan una disminución más notoria en los límites de consistencia, con valores de índice de plasticidad uniformes y menores respecto al suelo sin aditivo. Esto sugiere una mejor cohesión y menor susceptibilidad a la expansión del material.

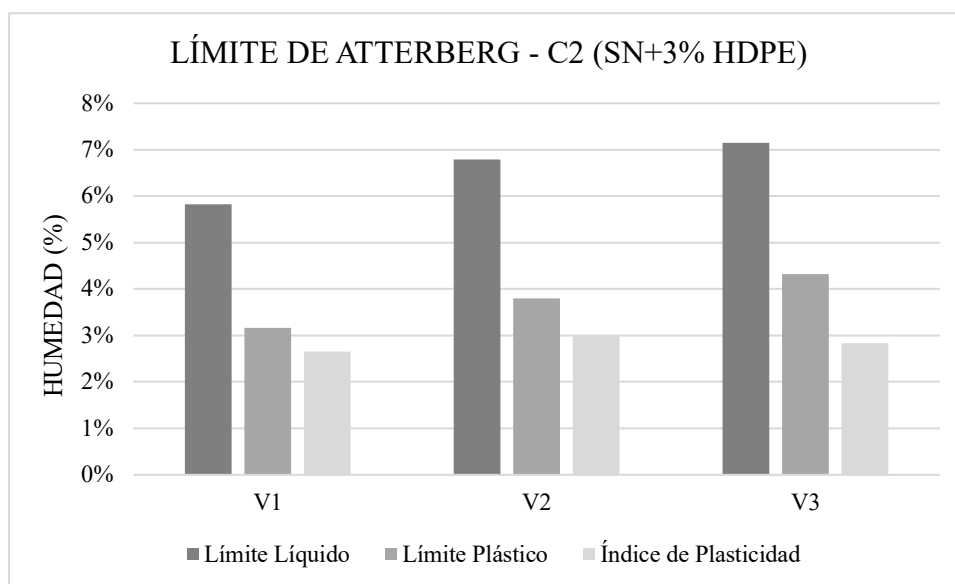


Ilustración 23: Gráfica de Límite de Atterberg – C2 (SN + 3%HDPE)

Calicata N°02: Vuelta 01 +4% - Vuelta 02 +4% - Vuelta 03 +4%

Tabla XXXI: Resultados de C2- Limite de Atterberg + 4% HDPE

Consistencia Física de la muestra	Calicata 02		
	Vuelta 01	Vuelta 02	Vuelta 03
Límite Líquido	12.66	13.37	12.38
Límite Plástico	7.61	8.12	6.87
Índice de Plasticidad	5.05	5.25	5.51

En la calicata 02 con 4% de HDPE, se aprecia una reducción continua en el límite líquido y en el índice de plasticidad, lo que indica una disminución de la capacidad de deformación y absorción de humedad del suelo. Los valores obtenidos reflejan un comportamiento más consistente y estable, con menor tendencia al agrietamiento o hinchamiento

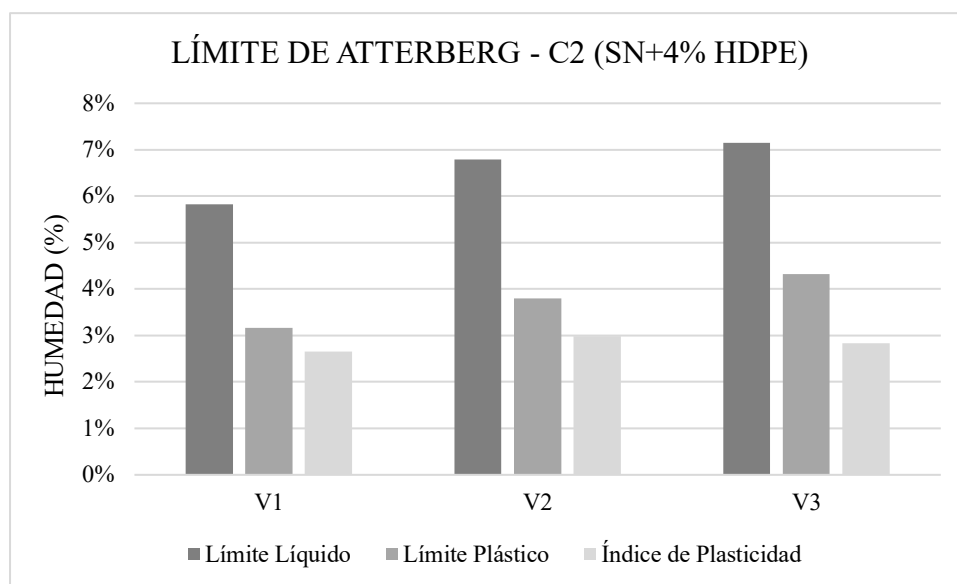


Ilustración 24: Gráfica de Límite de Atterberg – C2 (SN + 4%HDPE)

Calicata N°02: Vuelta 01 +5% - Vuelta 02 +5% - Vuelta 03 +5%

Tabla XXXII: Resultados de C2- Limite de Atterberg + 5% HDPE

Consistencia Física de la muestra	Calicata 02		
	Vuelta 01	Vuelta 02	Vuelta 03
Límite Líquido	11.28	13.41	10.93
Límite Plástico	7.61	10.00	7.56
Índice de Plasticidad	3.67	3.41	3.37

En la calicata 02 con 5% de HDPE, los resultados muestran una disminución marcada en el límite líquido y en el índice de plasticidad, alcanzando valores bajos que evidencian una reducción significativa en la plasticidad y compresibilidad del suelo. Esto indica que el material presenta una mayor rigidez y menor susceptibilidad a cambios volumétricos por humedad

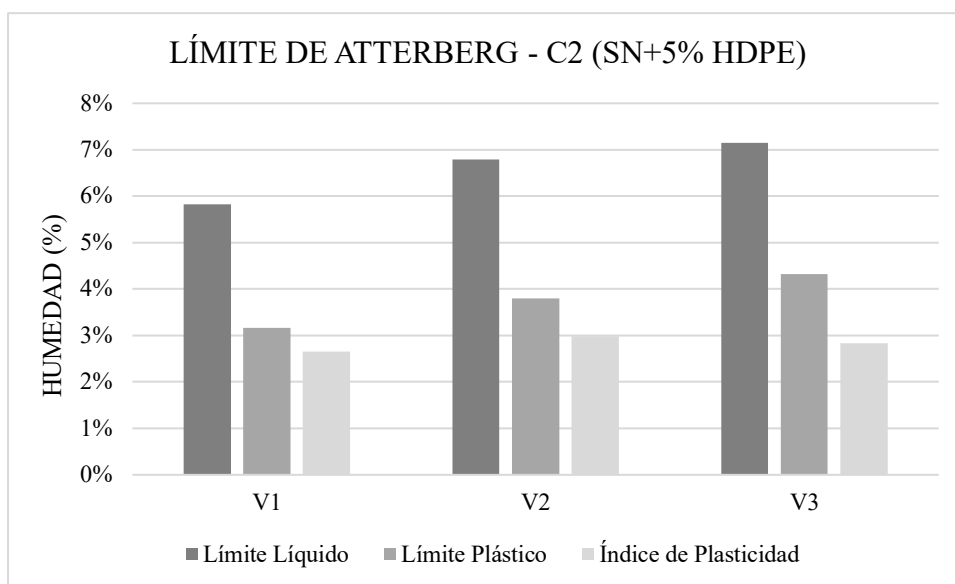


Ilustración 25: Gráfica de Límite de Atterberg – C2 (SN + 5%HDPE)

Calicata N°02: Vuelta 01 +6% - Vuelta 02 +6% - Vuelta 03 +6%

Tabla XXXIII: Resultados de C2- Límite de Atterberg + 6% HDPE

Consistencia Física de la muestra	Calicata 02		
	Vuelta 01	Vuelta 02	Vuelta 03
Límite Líquido	5.82	6.79	7.15
Límite Plástico	3.16	3.80	4.32
Índice de Plasticidad	2.66	2.99	2.83

En la calicata 02 con 6% de HDPE, se observa una reducción significativa en los valores de límite líquido y en el índice de plasticidad, alcanzando los niveles más bajos entre todas las dosificaciones. Esto refleja una disminución notable en la plasticidad y expansividad del suelo, lo que favorece su estabilidad y resistencia frente a la humedad.

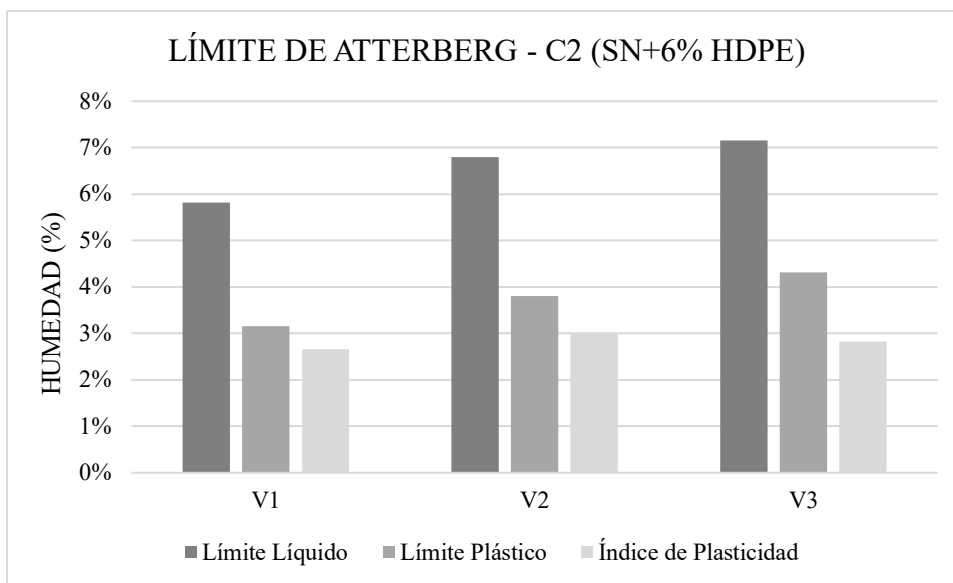


Ilustración 26: Gráfica de Límite de Atterberg – C2 (SN + 6%HDPE)

Calicata N°03: Vuelta 01 +2.5% - Vuelta 02 +2.5% - Vuelta 03 +2.5%

Tabla XXXIV: Resultados de C3- Limite de Atterberg + 2.5% HDPE

Consistencia Física de la muestra	Calicata 03		
	Vuelta 01	Vuelta 02	Vuelta 03
Límite Líquido	16.64	15.52	18.03
Límite Plástico	7.91	7.29	7.54
Índice de Plasticidad	8.74	8.23	10.50

En la calicata 03 con 2.5% de HDPE, se aprecia una disminución moderada en el límite líquido y el índice de plasticidad respecto al suelo natural, lo que indica una ligera mejora en la cohesión y comportamiento plástico del material. Estos valores reflejan que el HDPE comienza a reducir la capacidad de deformación y retención de agua del suelo, favoreciendo un comportamiento más estable y menos expansivo en comparación con la condición original.

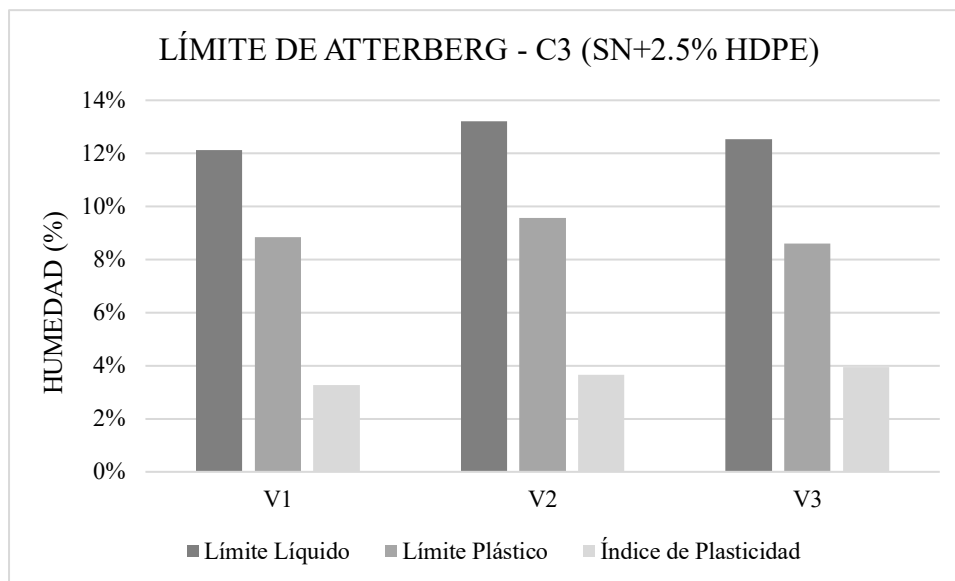


Ilustración 27: Gráfica de Límite de Atterberg – C2 (SN + 2.5%HDPE)

Calicata N°03: Vuelta 01 +3% - Vuelta 02 +3% - Vuelta 03 +3%

Tabla XXXV: Resultados de C3- Limite de Atterberg + 3% HDPE

Consistencia Física de la muestra	Calicata 03		
	Vuelta 01	Vuelta 02	Vuelta 03
Límite Líquido	14.94	14.41	13.47
Límite Plástico	7.55	6.32	5.91
Índice de Plasticidad	7.39	8.09	7.56

En la calicata 03 con 3% de HDPE, se observa una reducción continua en los límites líquido y plástico, lo que evidencia una menor plasticidad y capacidad de absorción de agua en el suelo. Esta variación sugiere que el HDPE actúa como agente estabilizador, disminuyendo la deformabilidad del material y mejorando su comportamiento estructural frente a cargas.

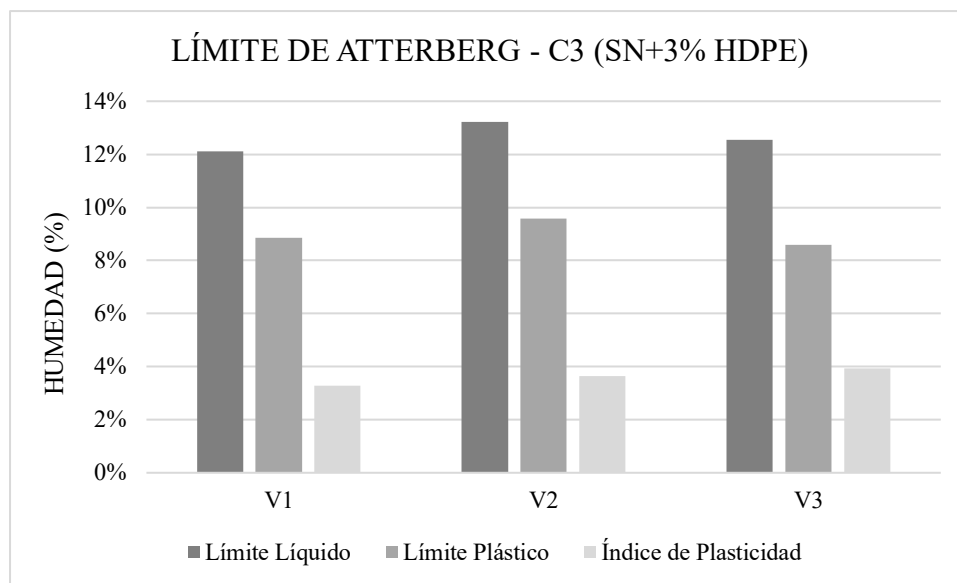


Ilustración 28: Gráfica de Limite de Atterberg – C2 (SN + 3%HDPE)

Calicata N°03: Vuelta 01 +4% - Vuelta 02 +4% - Vuelta 03 +4%

Tabla XXXVI: Resultados de C3- Limite de Atterberg + 4% HDPE

Consistencia Física de la muestra	Calicata 03		
	Vuelta 01	Vuelta 02	Vuelta 03
Límite Líquido	11.85	12.95	12.51
Límite Plástico	6.61	7.56	7.32
Índice de Plasticidad	5.24	5.39	5.19

En la calicata 03 con 4% de HDPE, se aprecia una disminución notable en el límite líquido y en el índice de plasticidad, lo que indica una mayor reducción en la plasticidad y en la capacidad de retener humedad. Este comportamiento sugiere que el HDPE mejora la estabilidad del suelo, reduciendo su tendencia a deformarse o expandirse, y generando un material más firme y adecuado para su uso en subrasantes viales.

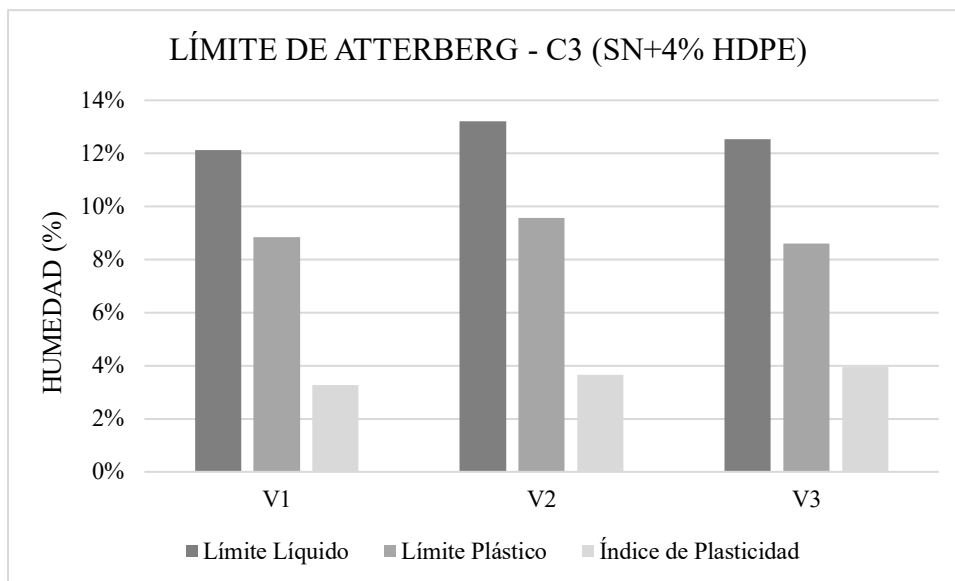


Ilustración 29: Gráfica de Límite de Atterberg – C2 (SN + 4%HDPE)

Calicata N°03: Vuelta 01 +5% - Vuelta 02 +5% - Vuelta 03 +5%

Tabla XXXVII: Resultados de C3- Límite de Atterberg + 5% HDPE

Consistencia Física de la muestra	Calicata 03		
	Vuelta 01	Vuelta 02	Vuelta 03
Límite Líquido	12.12	13.22	12.54
Límite Plástico	8.85	9.57	8.60
Índice de Plasticidad	3.27	3.65	3.94

En la calicata 03 con 5% de HDPE, se observa que el límite líquido y el índice de plasticidad se mantienen bajos, indicando una reducción en la plasticidad y una menor capacidad de retener humedad. Este comportamiento refleja que el HDPE contribuye a aumentar la estabilidad del suelo, disminuyendo su susceptibilidad a deformaciones.

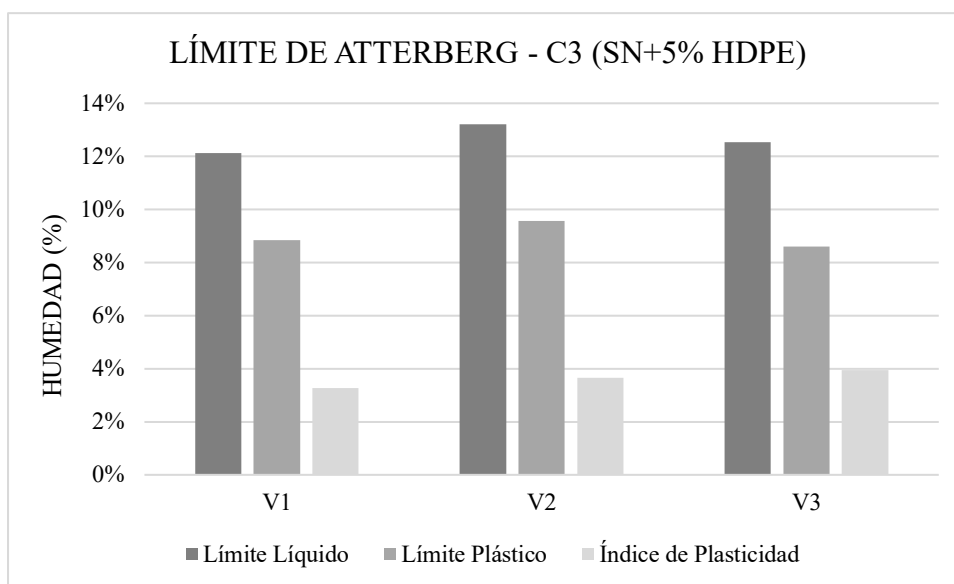


Ilustración 30: Gráfica de Límite de Atterberg – C2 (SN + 5%HDPE)

Calicata N°03: Vuelta 01 +6% - Vuelta 02 +6% - Vuelta 03 +6%

Tabla XXXVIII: Resultados de C3- Límite de Atterberg + 6% HDPE

Consistencia Física de la muestra	Calicata 03		
	Vuelta 01	Vuelta 02	Vuelta 03
Límite Líquido	6.39	6.17	5.01
Límite Plástico	3.74	3.20	2.73
Índice de Plasticidad	2.65	2.97	2.29

En la calicata 03 con 6% de HDPE, se evidencia una disminución considerable en el límite líquido y en el índice de plasticidad, lo que indica una reducción aún mayor de la plasticidad y de la capacidad del suelo para retener humedad. Este comportamiento sugiere que la incorporación del HDPE potencia la estabilidad del suelo, reduciendo significativamente su tendencia a deformarse o expandirse, y generando un material más firme y consistente.

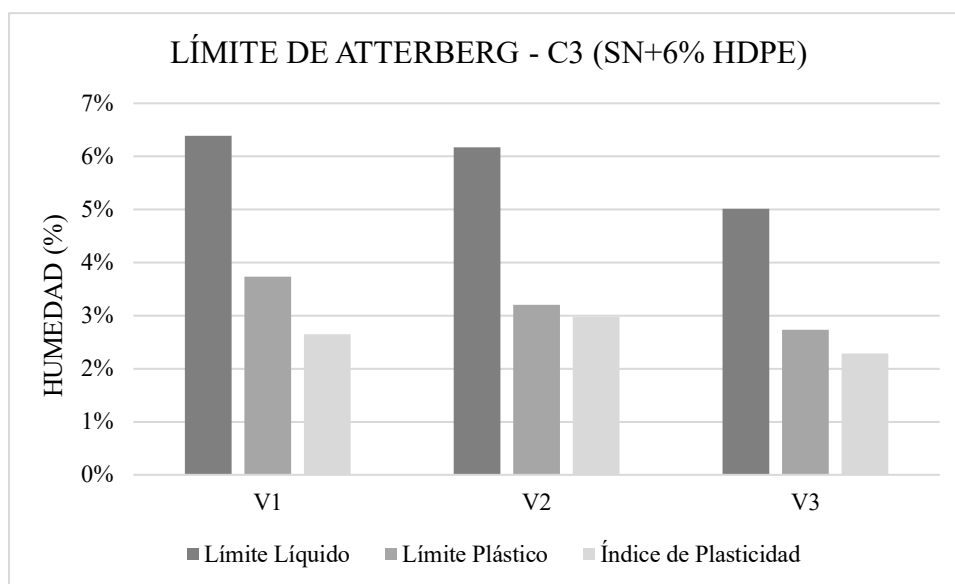


Ilustración 31: Gráfica de Límite de Atterberg – C2 (SN + 5%HDPE)

PROCTOR MODIFICADO CON HDPE

Calicata N°01: Vuelta 01 +2.5% - Vuelta 02+2.5% - Vuelta 03+2.5%

Tabla XXXIX: Resultados de Proctor Modificado C-01 +2.5% HDPE

PROPIEDADES	Calicata + 2.5% HDPE		
	Vuelta 01	Vuelta 02	Vuelta 03
Densidad máxima seca (g/cm³)	1.748	1.711	1.776
Óptimo contenido de humedad (%)	17.251	15.145	14.806

Los resultados de la TABLA XXXIX muestran una densidad máxima seca promedio de aproximadamente 1.745 g/cm³ y un contenido óptimo de humedad promedio de 15.73%. Estos valores indican que el suelo requiere una cantidad moderada de humedad para alcanzar su máxima compactación. La adición del HDPE contribuye a estabilizar el suelo, permitiendo una densidad adecuada sin necesidad de excesiva humedad.

Calicata N°01: Vuelta 01 +3% - Vuelta 02+3% - Vuelta 03+3%

Tabla XL: Resultados de Proctor Modificado C-01 +3% HDPE

PROPIEDADES	Calicata + 3% HDPE		
	Vuelta 01	Vuelta 02	Vuelta 03
Densidad máxima seca (g/cm ³)	1.678	1.678	1.766
Óptimo contenido de humedad (%)	17.840	17.889	15.152

Los resultados de la Tabla XL muestran una densidad máxima seca promedio de aproximadamente 1.707 g/cm³ y un contenido óptimo de humedad promedio de 16.96%. Estos valores reflejan que el suelo requiere una cantidad moderada de humedad para alcanzar su máxima compactación.

Calicata N°01: Vuelta 01 +4% - Vuelta 02+4% - Vuelta 03+4%

Tabla XLI: Resultados de Proctor Modificado C-01 +4% HDPE

PROPIEDADES	Calicata + 4% HDPE		
	Vuelta 01	Vuelta 02	Vuelta 03
Densidad máxima seca (g/cm ³)	1.683	1.700	1.688
Óptimo contenido de humedad (%)	18.268	18.291	19.817

Los resultados de la Tabla XLI muestran que la densidad máxima seca promedio es de aproximadamente 1.690 g/cm³, mientras que el contenido óptimo de humedad promedio alcanza 18.79%. Esto refleja que el suelo necesita un nivel de humedad relativamente alto para lograr su compactación máxima, lo que sugiere que el material tiene buena capacidad para acomodar el agua durante el proceso de compactación.

Calicata N°01: Vuelta 01 +5% - Vuelta 02+5% - Vuelta 03+5%

Tabla XLII: Resultados de Proctor Modificado C-01 +5% HDPE

PROPIEDADES	Calicata + 5% HDPE		
	Vuelta 01	Vuelta 02	Vuelta 03
Densidad máxima seca (g/cm ³)	1.701	1.737	1.758
Óptimo contenido de humedad (%)	14.943	18.084	19.255

Los resultados de la Tabla XLII muestran densidades máximas secas que oscilan entre 1.701 y 1.758 g/cm³ y contenidos óptimos de humedad entre 14.94% y 19.25%. Esta variabilidad indica que el suelo presenta una respuesta flexible frente a la humedad durante la compactación, pudiendo alcanzar una buena densidad en diferentes condiciones de humedad.

Calicata N°01: Vuelta 01 +6% - Vuelta 02+6% - Vuelta 03+6%

Tabla XLIII: Resultados de Proctor Modificado C-01 +6% HDPE

PROPIEDADES	Calicata + 6% HDPE		
	Vuelta 01	Vuelta 02	Vuelta 03
Densidad máxima seca (g/cm³)	1.696	1.714	1.788
Óptimo contenido de humedad (%)	17.265	18.777	15.653

Los resultados de la Tabla XLIII muestran densidades máximas secas comprendidas entre 1.696 y 1.788 g/cm³ y contenidos óptimos de humedad que varían de 15.65% a 18.78%. Estos valores indican que el suelo posee una buena capacidad de compactación bajo la influencia del HDPE, permitiendo alcanzar densidades elevadas sin requerir excesiva humedad.

Calicata N°02: Vuelta 01 +2.5% - Vuelta 02+2.5% - Vuelta 03+2.5%

Tabla XLIV: Resultados de Proctor Modificado C-02 +2.5% HDPE

PROPIEDADES	Calicata 02		
	Vuelta 01	Vuelta 02	Vuelta 03
Densidad máxima seca (g/cm³)	1.778	1.734	1.691
Óptimo contenido de humedad (%)	15.170	16.124	17.802

Los resultados de la Tabla XLIV muestran que en la primera vuelta presentó una densidad máxima seca de 1.778 g/cm³ y un contenido óptimo de humedad de 15.170%; en la vuelta 2 alcanzó una densidad máxima seca de 1.734 g/cm³ con un contenido óptimo de humedad de 16.124%; mientras que la vuelta 3 obtuvo una densidad máxima seca de 1.691 g/cm³ y un contenido óptimo de humedad de 17.802%.

Calicata N°02: Vuelta 01 +3% - Vuelta 02+3% - Vuelta 03+3%

Tabla XLV: Resultados de Proctor Modificado C-02 +3% HDPE

PROPIEDADES	Calicata 02		
	Vuelta 01	Vuelta 02	Vuelta 03
Densidad máxima seca (g/cm³)	1.745	1.759	1.729
Óptimo contenido de humedad (%)	15.377	15.951	15.986

Los resultados de la Tabla XLV muestran densidades máximas secas comprendidas entre 1.729 y 1.759 g/cm³, mientras que los contenidos óptimos de humedad se ubican entre 15.38% y 15.99%. Estos datos indican que el suelo alcanza su compactación máxima con un rango de humedad relativamente estrecho, lo que refleja un comportamiento consistente durante el proceso de compactación. La densidad lograda sugiere que el suelo tiene buena capacidad de consolidación bajo las condiciones del ensayo.

Calicata N°02: Vuelta 01 +4% - Vuelta 02+4% - Vuelta 03+4%

Tabla XLVI: Resultados de Proctor Modificado C-02 +4% HDPE

PROPIEDADES	Calicata 02		
	Vuelta 01	Vuelta 02	Vuelta 03
Densidad máxima seca (g/cm³)	1.766	1.689	1.769
Óptimo contenido de humedad (%)	15.708	18.643	15.774

Los resultados de la Tabla XLVI muestra densidades máximas secas de 1.766, 1.689 y 1.769 g/cm³ para las tres muestras analizadas. El contenido óptimo de humedad correspondiente es de 15.708%, 18.643% y 15.774%. Esto indica que la densidad máxima y el contenido de humedad presentan cierta variabilidad entre las muestras, reflejando diferencias en el comportamiento del suelo durante el proceso de compactación.

Calicata N°02: Vuelta 01 +5% - Vuelta 02+5% - Vuelta 03+5%

Tabla XLVII: Resultados de Proctor Modificado C-02 +5% HDPE

PROPIEDADES	Calicata 02		
	Vuelta 01	Vuelta 02	Vuelta 03

Densidad máxima seca (g/cm³)	1.765	1.714	1.719
Óptimo contenido de humedad (%)	16.068	17.629	17.904

Los resultados de la Tabla XLVII presentan densidades máximas secas de 1.765, 1.714 y 1.719 g/cm³ en las tres muestras analizadas. Los contenidos óptimos de humedad registrados son 16.068%, 17.629% y 17.904%. Los valores muestran una ligera variación tanto en la densidad como en la humedad, lo que evidencia pequeñas diferencias en el comportamiento del suelo durante la compactación.

Calicata N°02: Muestra 01 +6% - Muestra 02+6% - Muestra 03+6%

Tabla XLVIII: Resultados de Proctor Modificado C-02 +6% HDPE

PROPIEDADES	Calicata 02		
	Vuelta 01	Vuelta 02	Vuelta 03
Densidad máxima seca (g/cm³)	1.787	1.752	1.770
Óptimo contenido de humedad (%)	15.452	16.653	16.363

Los resultados de la Tabla XLVIII muestra densidades máximas secas de 1.787, 1.752 y 1.770 g/cm³, junto con contenidos óptimos de humedad de 15.452%, 16.653% y 16.363%. Estos resultados evidencian que el suelo logra alcanzar una compactación eficiente dentro de un rango de humedad relativamente estrecho. Los valores de densidad indican una buena respuesta del material frente al proceso de compactación, mostrando uniformidad y estabilidad en su comportamiento.

Calicata N°03: Vuelta 01 +2.5% - Vuelta 02+2.5% - Vuelta 03+2.5%

Tabla XLIX: Resultados de Proctor Modificado C-02 +2.5% HDPE

PROPIEDADES	Calicata 03		
	Vuelta 01	Vuelta 02	Vuelta 03
Densidad máxima seca (g/cm³)	1.713	1.703	1.739

Óptimo contenido de humedad (%)	16.794	18.369	18.751
--	--------	--------	--------

Los resultados de la Tabla XLIX presentan densidades máximas secas de 1.713, 1.703 y 1.739 g/cm³, mientras que los contenidos óptimos de humedad son 16.794%, 18.369% y 18.751%. Los resultados muestran una ligera variación en los valores de densidad y humedad, lo que indica un comportamiento relativamente estable del suelo durante el proceso de compactación

Calicata N°03: Vuelta 01 +3% - Vuelta 02+3% - Vuelta 03+3%

Tabla L: Resultados de Proctor Modificado C-02 +3% HDPE

PROPIEDADES	Calicata 03		
	Vuelta 01	Vuelta 02	Vuelta 03
Densidad máxima seca (g/cm3)	1.735	1.733	1.783
Óptimo contenido de humedad (%)	16.208	18.000	17.348

Los resultados de la Tabla XL registra densidades máximas secas de 1.735, 1.733 y 1.783 g/cm³, junto con contenidos óptimos de humedad de 16.208%, 18.000% y 17.348%. Estos resultados reflejan que el suelo alcanza una compactación eficiente dentro de un rango de humedad moderado, mostrando una respuesta homogénea ante la variación del contenido de agua. La proximidad de los valores de densidad indica una buena uniformidad del material, lo que sugiere que la mezcla con HDPE favorece una estructura más estable durante la compactación.

Calicata N°3: Vuelta 01 +4% - Vuelta 02+4% - Vuelta 03+4%

Tabla LI: Resultados de Proctor Modificado C-02 +4% HDPE

PROPIEDADES	Calicata 03		
	Vuelta 01	Vuelta 02	Vuelta 03
Densidad máxima seca (g/cm3)	1.713	1.734	1.705
Óptimo contenido de humedad (%)	16.443	16.376	17.742

En la Tabla LI, los resultados del ensayo Proctor mostraron valores de densidad máxima seca de 1.713 g/cm³, 1.734 g/cm³ y 1.705 g/cm³ en las tres repeticiones realizadas, evidenciando una ligera variación entre ellas. En cuanto al contenido óptimo de humedad, se obtuvo 16.443%, 16.376% y 17.742%, respectivamente. Estos resultados indican que, al incorporar el 4% de HDPE, el suelo alcanza una densidad relativamente estable y un contenido óptimo de humedad ligeramente superior en comparación con muestras sin aditivo, lo que sugiere una mejora moderada en la compactación del material.

Calicata N°03: Vuelta 01 +5% - Vuelta 02+5% - Vuelta 03+5%

Tabla LII: Resultados de Proctor Modificado C-02 +5% HDPE

PROPIEDADES	Calicata 03		
	Vuelta 01	Vuelta 02	Vuelta 03
Densidad máxima seca (g/cm³)	1.765	1.764	1.734
Óptimo contenido de humedad (%)	16.720	17.478	16.102

En la Tabla LII se evidencia que al incorporar un 5% de HDPE, los resultados del ensayo Proctor reflejaron densidades máximas secas de 1.765 g/cm³, 1.764 g/cm³ y 1.734 g/cm³ en las tres repeticiones efectuadas. Respecto al contenido óptimo de humedad, se obtuvieron valores de 16.720%, 17.478% y 16.102%, respectivamente. Estos resultados muestran que con la adición del 5% de HDPE el suelo alcanza una densidad máxima seca ligeramente superior respecto a las mezclas con menores porcentajes, lo que evidencia una mejor compactación y una adecuada interacción del polímero con el material arcilloso.

Calicata N°03: Vuelta 01 +6% - Vuelta 02+6% - Vuelta 03+6%

Tabla LIII: Resultados de Proctor Modificado C-02 +6% HDPE

PROPIEDADES	Calicata 03		
	Muestra 01	Muestra 02	Muestra 03
Densidad máxima seca (g/cm³)	1.827	1.717	1.747
Óptimo contenido de humedad (%)	13.047	16.645	16.860

En la Tabla LIII se evidencia que con una dosificación del 6% de HDPE, se registraron densidades máximas secas de 1.827 g/cm³, 1.717 g/cm³ y 1.747 g/cm³, mientras que los valores de contenido óptimo de humedad fueron de 13.047%, 16.645% y 16.860%, respectivamente. Estos resultados evidencian que al incrementar la proporción de HDPE hasta un 6%, el suelo alcanza un valor máximo de densidad seca notablemente superior (1.827 g/cm³), lo que indica una mejor compactación y una reducción significativa de la humedad necesaria para lograr dicha condición. Esto sugiere que el polímero, al ocupar los vacíos entre las partículas del suelo, favorece una estructura más densa y con menor susceptibilidad a la retención de agua, aspecto clave para mejorar la resistencia y el comportamiento del suelo bajo carga.

CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) + HDPE

Calicata N°01: Vuelta 01 +2.5% - Vuelta 02+2.5% - Vuelta 03+2.5%

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos a partir de en los ensayos CBR correspondientes a la calicata 01, evaluando el comportamiento del suelo natural con una dosificación del 2.5% de HDPE

Tabla LIV: Resultados de CBR – C1 + 2.5% HDPE

CBR + 2.5% HDPE						
CALICATA	VUELTA	HDPE	Penetración 0.1"		Penetración 0.2"	
			100% de la MDS	95% de la MDS	100% de la MDS	95% de la MDS
C-1	V-1	2.50%	6%	5%	6%	5%
	V2	2.50%	6%	5%	6%	5%
	V-3	2.50%	6%	5%	6%	6%

En la Tabla LIV muestran los resultados del CBR muestran valores entre 5% y 6% para ambas penetraciones, evidenciando una mejora leve en la capacidad portante respecto al suelo natural. Esta variación indica que la adición inicial de HDPE comienza a influir positivamente en la resistencia del suelo, aunque el incremento aún es moderado, lo que sugiere que este porcentaje representa una etapa inicial de estabilización sin alcanzar aún un comportamiento óptimo.

Calicata N°01: Vuelta 01 +3% - Vuelta 02+3% - Vuelta 03+3%

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos a partir de en los ensayos CBR correspondientes a la calicata 01, evaluando el comportamiento del suelo natural con una dosificación del 3% de HDPE

Tabla LV: Resultados de CBR – C1 + 3% HDPE

CBR + 3% HDPE						
CALICATA	VUELTA	HDPE	Penetración 0.1"		Penetración 0.2"	
			100% de la MDS	95% de la MDS	100% de la MDS	95% de la MDS
C-1	V-1	3%	6%	5%	7%	5%
	V2	3%	6%	5%	6%	6%
	V-3	3%	6%	6%	8%	7%

Interpretación del resultado

La muestra 1, con una dosificación del 3% de HDPE, presentó valores de CBR de 5% y 6% al 95% y 100% de la MDS respectivamente en la penetración de 0.1", mientras que en la penetración de 0.2" alcanzó 5% y 7% en los mismos niveles de compactación. Por su parte, la muestra 2, también con una dosificación del 3% de HDPE, obtuvo 5% y 6% al 95% y 100% de la MDS en la penetración de 0.1", y 6% y 6% en 0.2", evidenciando una ligera mejora respecto a la muestra anterior. Finalmente, la muestra 3, bajo las mismas condiciones de dosificación, alcanzó 6% y 7% al 95% y 100% de la MDS en la penetración de 0.1", y 7% y 8% en 0.2", mostrando un incremento progresivo en la resistencia del suelo tratado con HDPE, lo cual sugiere un comportamiento más estable y resistente frente a la carga aplicada en comparación con las muestras previas.

Calicata N°01: Muestra 01 +4% - Muestra 02+4% - Muestra 03+4%

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos a partir de los ensayos CBR correspondientes a la calicata 01, evaluando el comportamiento del suelo natural con una dosificación del 4% de HDPE

Tabla LVI: Resultados de CBR – C1 + 4% HDPE

CBR + 4% HDPE						
CALICATA	VUELTA	HDPE	Penetración 0.1"		Penetración 0.2"	
			100% de la MDS	95% de la MDS	100% de la MDS	95% de la MDS
C-1	V-1	4%	10%	9%	10%	9%
	V-2	4%	11%	10%	12%	11%
	V-3	4%	13%	11%	13%	11%

Interpretación del resultado

La muestra 1, con una dosificación del 4% de HDPE, presentó valores de CBR de 10% y 9% al 95% y 100% de la MDS respectivamente en penetración de 0.1", mientras que para 0.2" alcanzó 10% y 9%. La muestra 2 mostró resultados similares, con 10% al 95% y 11% al 100% de la MDS en 0.1", 12% y 11% en ambos niveles de compactación para 0.2". En cuanto a la muestra 3, se obtuvo un CBR de 13% y 11% en 0.1", 13% y de 11% en ambos niveles para 0.2".

Calicata N°01: Muestra 01 +5% - Muestra 02+5% - Muestra 03+5%

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos a partir de los ensayos CBR correspondientes a la calicata 01, evaluando el comportamiento del suelo natural con una dosificación del 5% de HDPE

Tabla LVII: Resultados de CBR – C1 + 5% HDPE

CBR + 5% HDPE						
CALICATA	VUELTA	HDPE	Penetración 0.1"		Penetración 0.2"	
			100% de la MDS	95% de la MDS	100% de la MDS	95% de la MDS
C-1	V-1	5%	14%	15%	15%	16%
	V-2	5%	13%	13%	15%	14%
	V-3	5%	15%	14%	17%	15%

Interpretación del resultado

La muestra 1, con

un 5% de HDPE, alcanzó valores de CBR de 14% y 15% al 95% y 100% de la MDS respectivamente en la penetración de 0.1", mientras que en la penetración de 0.2" se obtuvo 15% y 16%. La muestra 2 presentó 13% en 0.1", 15% y 14% en ambos niveles para 0.2". Finalmente, la muestra 3 reportó 15% y 14% en 0.1", 17% y 15% tanto al 95% como al 100% de la MDS en 0.2".

Calicata N°01: Muestra 01 +6% - Muestra 02+6% - Muestra 03+6%

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos a partir de los ensayos CBR correspondientes a la calicata 01, evaluando el comportamiento del suelo natural con una dosificación del 6% de HDPE

Tabla LVIII: Resultados de CBR – C1 + 6% HDPE

CBR + 6% HDPE						
CALICATA	VUELTA	HDPE	Penetración 0.1"		Penetración 0.2"	
			100% de la MDS	95% de la MDS	100% de la MDS	95% de la MDS
C-1	V-1	6%	21%	20%	20%	20%
	V-2	6%	22%	19%	24%	20%
	V-3	6%	21%	21%	20%	20%

Interpretación del resultado

La muestra 1, con una dosificación del 6% de HDPE, presentó valores de CBR de 20% y 21% al 95% y 100% de la MDS respectivamente en la penetración de 0.1", mientras que para la penetración de 0.2" alcanzó 20% en ambos niveles de compactación. En el caso de la muestra 2, bajo la misma dosificación del 6% de HDPE, se obtuvieron valores de 19% y 22% al 95% y 100% de la MDS en la penetración de 0.1", y 20% y 24% en 0.2", reflejando un incremento más notorio en la capacidad portante del suelo. Finalmente, la muestra 3 registró valores de 21% y 21% para la penetración de 0.1", y 20% y 20% para 0.2

Calicata N°02: Muestra 01 +2.5% - Muestra 02+2.5% - Muestra 03+2.5%

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos a partir de los ensayos CBR correspondientes a la calicata 02, evaluando el comportamiento del suelo natural con una dosificación del 2.5% de HDPE

Tabla LIX: Resultados de CBR – C2 + 2.5% HDPE

CBR						
CALICATA	MUESTRA	HDPE	Penetración 0.1"		Penetración 0.2"	
			100% de la MDS	95% de la MDS	100% de la MDS	95% de la MDS
C-2	M-1	2.50%	6%	5%	7%	6%
	M-2	2.50%	8%	5%	6%	5%
	M-3	2.50%	6%	4%	6%	5%

Interpretación del resultado

La muestra 1, con una dosificación del 2.5% de HDPE, presentó valores de CBR de 5% y 6% al 95% y 100% de la MDS respectivamente en la penetración de 0.1", mientras que en la penetración de 0.2" alcanzó 6% y 7%. Por su parte, la muestra 2, bajo la misma dosificación,

obtuvo 5% y 8% al 95% y 100% de la MDS en la penetración de 0.1", y 5% y 6% en 0.2", evidenciando una ligera variabilidad en los resultados.

Calicata N°02: Muestra 01 +3% - Muestra 02+3% - Muestra 03+3%

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos a partir de en los ensayos CBR correspondientes a la calicata 02, evaluando el comportamiento del suelo natural con una dosificación del 3% de HDPE

Tabla LX: Resultados de CBR – C2 + 3% HDPE

CBR						
CALICATA	MUESTRA	HDPE	Penetración 0.1"		Penetración 0.2"	
			100% de la MDS	95% de la MDS	100% de la MDS	95% de la MDS
C-2	M-1	3%	5%	5%	6%	6%
	M-2	3%	7%	7%	7%	7%
	M-3	3%	7%	7%	7%	7%

Interpretación del resultado

La muestra 1, con una dosificación del 3% de HDPE, presentó valores de CBR de 5% y 5% al 95% y 100% de la MDS respectivamente en la penetración de 0.1", mientras que en la penetración de 0.2" alcanzó 6% en ambos niveles de compactación. En el caso de la muestra 2, bajo la misma dosificación, se obtuvieron valores de 7% y 7% al 95% y 100% de la MDS tanto en 0.1" como en 0.2", mostrando una mejora más consistente. Finalmente, la muestra 3 registró resultados similares, con 7% y 7% para ambas penetraciones y niveles de compactación.

Calicata N°02: Muestra 01 +4% - Muestra 02+4% - Muestra 03+4%

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos a partir de en los ensayos CBR correspondientes a la calicata 02, evaluando el comportamiento del suelo natural con una dosificación del 4% de HDPE

Tabla LXI: Resultados de CBR – C2 + 4% HDPE

CBR						
CALICATA	MUESTRA	HDPE	Penetración 0.1"		Penetración 0.2"	
			100% de la MDS	95% de la MDS	100% de la MDS	95% de la MDS
C-2	M-1	4%	10%	8%	10%	9%

	M-2	4%	10%	9%	12%	11%
	M-3	4%	12%	10%	13%	11%

Interpretación del resultado

La muestra 1, con una dosificación del 4% de HDPE, presentó valores de CBR de 8% y 10% al 95% y 100% de la MDS respectivamente en la penetración de 0.1", mientras que en la penetración de 0.2" alcanzó 9% y 10%, mostrando un incremento notable respecto a las dosificaciones menores. En el caso de la muestra 2, con la misma proporción de aditivo, se obtuvieron valores de 9% y 10% al 95% y 100% de la MDS en la penetración de 0.1", y 11% y 12% en 0.2", reflejando una mejora progresiva en la capacidad portante. Finalmente, la muestra 3 alcanzó 10% y 12% en la penetración de 0.1", y 11% y 13% en 0.2", confirmando que el 4% de HDPE genera un aumento considerable en la resistencia al esfuerzo y en el índice CBR.

Calicata N°02: Muestra 01 +5% - Muestra 02+5% - Muestra 03+5%

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos a partir de los ensayos CBR correspondientes a la calicata 02, evaluando el comportamiento del suelo natural con una dosificación del 5% de HDPE

Tabla LXII: Resultados de CBR – C2 + 5% HDPE

CBR						
CALICATA	MUESTRA	HDPE	Penetración 0.1"		Penetración 0.2"	
			100% de la MDS	95% de la MDS	100% de la MDS	95% de la MDS
C-2	M-1	5%	17%	16%	18%	17%
	M-2	5%	15%	14%	17%	16%
	M-3	5%	16%	15%	17%	16%

Interpretación del resultado

La muestra 1, con una dosificación del 5% de HDPE, presentó valores de CBR de 16% y 17% al 95% y 100% de la MDS respectivamente en la penetración de 0.1", mientras que en la penetración de 0.2" alcanzó 17% y 18%, evidenciando una mejora notable en la resistencia del suelo. En el caso de la muestra 2, con la misma proporción de aditivo, se obtuvieron valores de 14% y 15% al 95% y 100% de la MDS en la penetración de 0.1", y 16% y 17% en 0.2", lo que

demuestra un comportamiento estable y favorable frente a las cargas aplicadas. Finalmente, la muestra 3 registró 15% y 16% para la penetración de 0.1", y 16% y 17% para 0.2"

Calicata N°02: Muestra 01 +6% - Muestra 02+6% - Muestra 03+6%

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos a partir de en los ensayos CBR correspondientes a la calicata 02, evaluando el comportamiento del suelo natural con una dosificación del 6% de HDPE

Tabla LXIII: Resultados de CBR – C2 + 6% HDPE

CBR						
CALICATA	MUESTRA	HDPE	Penetración 0.1"		Penetración 0.2"	
			100% de la MDS	95% de la MDS	100% de la MDS	95% de la MDS
C-2	M-1	6%	20%	19%	21%	20%
	M-2	6%	21%	20%	23%	21%
	M-3	6%	22%	18%	22%	20%

Interpretación del resultado

La muestra 1, con una dosificación del 6% de HDPE, presentó valores de CBR de 19% y 20% al 95% y 100% de la MDS en la penetración de 0.1", y 20% y 21% en 0.2", mostrando una mejora notable en la capacidad portante. La muestra 2 alcanzó 20% y 21% al 95% y 100% de la MDS en 0.1", y 21% y 23% en 0.2", evidenciando un incremento más marcado en la resistencia. Finalmente, la muestra 3 obtuvo 18% y 22% para 0.1", y 20% y 22% para 0.2"

Calicata N°03: Muestra 01 +2.5% - Muestra 02+2.5% - Muestra 03+2.5%

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos a partir de en los ensayos CBR correspondientes a la calicata 03, evaluando el comportamiento del suelo natural con una dosificación del 2.5% de HDPE

Tabla LXIV: Resultados de CBR – C3 + 2.5% HDPE

CBR						
CALICATA	MUESTRA	HDPE	Penetración 0.1"		Penetración 0.2"	
			100% de la MDS	95% de la MDS	100% de la MDS	95% de la MDS
C-3	M-1	2.50%	6%	5%	6%	6%
	M-2	2.50%	6%	5%	7%	6%

	M-3	2.50%	6%	5%	7%	6%
--	-----	-------	----	----	----	----

Interpretación del resultado

La muestra 1, con una dosificación del 2.5% de HDPE, presentó valores de CBR de 5% y 6% al 95% y 100% de la MDS respectivamente en la penetración de 0.1", y 6% en ambos niveles de compactación para la penetración de 0.2". En el caso de la muestra 2, con la misma proporción de aditivo, se obtuvieron 5% y 6% al 95% y 100% de la MDS en 0.1", y 6% y 7% en 0.2", evidenciando un ligero aumento en la capacidad portante. Finalmente, la muestra 3 registró valores de 5% y 6% para la penetración de 0.1", y 6% y 7% en la penetración de 0.2".

Calicata N°03: Muestra 01 +3% - Muestra 02+3% - Muestra 03+3%

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos a partir de los ensayos CBR correspondientes a la calicata 03, evaluando el comportamiento del suelo natural con una dosificación del 3% de HDPE

Tabla LXV: Resultados de CBR – C3 + 3% HDPE

CBR						
CALICATA	MUESTRA	HDPE	Penetración 0.1"		Penetración 0.2"	
			100% de la MDS	95% de la MDS	100% de la MDS	95% de la MDS
C-3	M-1	3%	6%	5%	6%	6%
	M-2	3%	5%	5%	6%	6%
	M-3	3%	6%	6%	7%	7%

Interpretación del resultado

La muestra 1, con una dosificación del 3% de HDPE, presentó valores de CBR de 5% y 6% al 95% y 100% de la MDS respectivamente en la penetración de 0.1", y 6% en ambos niveles de compactación para la penetración de 0.2", evidenciando una respuesta estable del suelo. En la muestra 2, con la misma proporción de aditivo, se obtuvieron 5% y 5% al 95% y 100% de la MDS en 0.1", y 6% y 6% en 0.2", manteniendo valores uniformes en la resistencia. Finalmente, la muestra 3 alcanzó 6% y 6% para la penetración de 0.1", y 7% y 7% en 0.2"

Calicata N°03: Muestra 01 +4% - Muestra 02+4% - Muestra 03+4%

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos a partir de en los ensayos CBR correspondientes a la calicata 03, evaluando el comportamiento del suelo natural con una dosificación del 4% de HDPE

Tabla LXVI: Resultados de CBR – C3 + 4% HDPE

CBR						
CALICATA	MUESTRA	HDPE	Penetración 0.1"		Penetración 0.2"	
			100% de la MDS	95% de la MDS	100% de la MDS	95% de la MDS
C-3	M-1	4%	10%	9%	11%	10%
	M-2	4%	11%	10%	12%	12%
	M-3	4%	12%	11%	14%	13%

Interpretación del resultado

La muestra 1, con una dosificación del 4% de HDPE, presentó valores de CBR de 9% y 10% al 95% y 100% de la MDS respectivamente en la penetración de 0.1", y 10% y 11% en la penetración de 0.2", mostrando un incremento notorio respecto a las dosificaciones menores. La muestra 2, bajo las mismas condiciones, alcanzó 10% y 11% al 95% y 100% de la MDS en 0.1", y 12% en ambos niveles de compactación para 0.2", evidenciando una mejora sostenida en la capacidad portante del suelo. Finalmente, la muestra 3 registró 11% y 12% para la penetración de 0.1", y 13% y 14% en 0.2".

Calicata N°03: Muestra 01 +5% - Muestra 02+5% - Muestra 03+5%

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos a partir de en los ensayos CBR correspondientes a la calicata 03, evaluando el comportamiento del suelo natural con una dosificación del 5% de HDPE

Tabla LXVII: Resultados de CBR – C3 + 5% HDPE

CBR						
CALICATA	MUESTRA	HDPE	Penetración 0.1"		Penetración 0.2"	
			100% de la MDS	95% de la MDS	100% de la MDS	95% de la MDS
C-3	M-1	5%	17%	16%	18%	16%
	M-2	5%	16%	14%	17%	16%
	M-3	5%	15%	14%	17%	16%

Interpretación del resultado

La muestra 1, con una dosificación del 5% de HDPE, presentó valores de CBR de 16% y 17% al 95% y 100% de la MDS respectivamente en la penetración de 0.1", y 16% y 18% en la penetración de 0.2", reflejando una mejora considerable en la resistencia del suelo. En la muestra 2, bajo la misma dosificación, se obtuvieron valores de 14% y 16% al 95% y 100% de la MDS en 0.1", y 16% y 17% en 0.2", evidenciando una respuesta homogénea y favorable frente a las cargas aplicadas. Finalmente, la muestra 3 alcanzó 14% y 15% en la penetración de 0.1", y 16% y 17% en 0.2".

Calicata N°03: Muestra 01 +6% - Muestra 02+6% - Muestra 03+6%

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos a partir de los ensayos CBR correspondientes a la calicata 03, evaluando el comportamiento del suelo natural con una dosificación del 6% de HDPE

Tabla LXVIII: Resultados de CBR – C3 + 6% HDPE

CBR						
CALICATA	MUESTRA	HDPE	Penetración 0.1"		Penetración 0.2"	
			100% de la MDS	95% de la MDS	100% de la MDS	95% de la MDS
C-3	M-1	6%	21%	21%	23%	22%
	M-2	6%	20%	18%	22%	20%
	M-3	6%	20%	19%	22%	20%

Interpretación del resultado

La muestra 1, con una dosificación del 6% de HDPE, presentó valores de CBR de 21% y 21% al 95% y 100% de la MDS respectivamente en la penetración de 0.1", mientras que en la penetración de 0.2" alcanzó 22% y 23%, evidenciando una notable mejora en la capacidad portante del suelo. En el caso de la muestra 2, bajo la misma dosificación, se obtuvieron 18% y 20% al 95% y 100% de la MDS en 0.1", y 20% y 22% en 0.2", mostrando un incremento progresivo y sostenido en la resistencia. Finalmente, la muestra 3 registró 19% y 20% para la penetración de 0.1", y 20% y 22% en 0.2".

EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

1. RESUMEN EJECUTIVO

En la actualidad, la incorporación de criterios ambientales en proyectos de ingeniería civil se ha vuelto indispensable, especialmente debido al creciente número de impactos negativos asociados a actividades constructivas. En el caso de esta investigación, centrada en la mejora de subrasantes mediante la adición de HDPE reciclado en la ruta Granja Sasape, distrito de Túcume, se reconoce la importancia de integrar la variable ambiental desde las primeras etapas del estudio. [43]

Considerando que toda intervención sobre el suelo puede generar efectos sobre el entorno natural, ya sea durante la fase de laboratorio o en una futura ejecución en campo, se identificó la necesidad de evaluar los impactos ambientales derivados del uso de materiales no tradicionales, como el HDPE reciclado. El objetivo fue reconocer tanto los efectos positivos como los negativos de esta incorporación, con miras a proponer medidas que potencien los beneficios ambientales y mitiguen los posibles riesgos.[44]

La recolección de información para esta evaluación se basó en el análisis de las actividades involucradas en la preparación y aplicación del HDPE, así como su comportamiento dentro del suelo. Para la valoración de los impactos ambientales, se utilizó la Matriz de Leopold, que permitió clasificar y jerarquizar cada impacto de acuerdo con su magnitud y significancia.[44]

Finalmente, se plantearon propuestas de mejora ambiental, enfocadas en reducir los efectos adversos y fomentar una aplicación más sostenible del HDPE en subrasantes, demostrando que su uso puede ser compatible con los principios del desarrollo sostenible y la economía circular.[43]

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

- Evaluar el impacto ambiental generado por la incorporación de polietileno de alta densidad (HDPE) reciclado en suelos arcillosos utilizados en la conformación de subrasantes, considerando sus efectos sobre el entorno físico, biótico y social.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar y clasificar los impactos ambientales, tanto positivos como negativos, generados por la mejora de la subrasante mediante la adición de HDPE reciclado durante la ejecución del proyecto.
- Establecer la línea base ambiental de la zona de intervención (Granja Sasape, distrito de Túcume), considerando los componentes físicos, biológicos y socioeconómicos del entorno.
- Formular medidas de prevención, mitigación y compensación orientadas a reducir los impactos ambientales negativos y potenciar los beneficios derivados del uso de plástico reciclado como material alternativo en la subrasante.

3. CONTRIBUCIÓN DEL PROYECTO AL ENTORNO LOCAL Y AMBIENTAL

La implementación de este proyecto busca generar un impacto positivo en el distrito de Túcume mediante el aprovechamiento del HDPE reciclado, un residuo común en la zona, para mejorar las condiciones físico-mecánicas de los suelos arcillosos utilizados en subrasantes. Esta alternativa técnica no solo representa un avance en la ingeniería vial, sino que también promueve el reaprovechamiento local de residuos plásticos, evitando su acumulación y disminuyendo la dependencia de centros de reciclaje externos a la región.[45]

El uso de HDPE como aditivo en suelos permite que el material reciclado sea transformado dentro de la misma localidad donde se genera, lo cual contribuye a dinamizar la economía local, generando oportunidades laborales para personas vinculadas al acopio, selección y procesamiento del plástico. Asimismo, se fomenta una cultura de responsabilidad ambiental, al dar un nuevo uso a un residuo que habitualmente representa un problema para la gestión urbana.[46]

De este modo, se espera que este estudio no solo mejore el rendimiento de las subrasantes en proyectos viales, sino que también sirva como modelo replicable que combine criterios de sostenibilidad, reciclaje y eficiencia técnica. Como parte del proceso, se incluirá una evaluación ambiental integral, que permita valorar los efectos directos e indirectos de la incorporación del HDPE al suelo, asegurando que su uso sea ambientalmente viable y compatible con el entorno natural y social del área de intervención.[47]

4. MARCO LEGAL

- **Ley N° 26786, Ley de Evaluación de impacto ambiental**

Los Ministerios tienen la obligación de informar al Consejo Nacional del Ambiente (CONAM) sobre las actividades de su sector que, debido a su riesgo ambiental, puedan superar los niveles tolerables de contaminación o deterioro ambiental. Esta ley no modifica las competencias de las autoridades ambientales sectoriales. Las actividades planificadas no requieren necesariamente una coordinación directa con el CONAM; sin embargo, la autoridad ambiental competente deberá notificar al CONAM en caso de que la situación lo amerite. [49]

- **Ley N°27446, Ley del Sistema de Evaluación de Impacto ambiental**

A través de esta ley se creó el SEIA, único sistema encargado de coordinar la identificación, prevención, supervisión, control y corrección anticipada de los impactos ambientales negativos derivados de las actividades humanas, especialmente los proyectos de inversión. Aunque esta norma se encuentra vigente, establece que las regulaciones sectoriales continuarán aplicándose mientras no contravengan lo dispuesto en ella. Según lo indicado, el EIA debe incluir una descripción de la acción propuesta, antecedentes del área de influencia, la identificación y caracterización de los impactos a lo largo de todo el proyecto, así como la estrategia de manejo ambiental y los planes de seguimiento, vigilancia y control. Además, las entidades autorizadas para elaborar el EIA deben estar registradas ante las autoridades competentes, siendo el titular del proyecto responsable del pago de sus servicios. [50]

- **Ley N°28611, Ley General del Ambiente**

Esta ley define las disposiciones para la conservación, protección, mejora y restauración del medio ambiente y de los recursos naturales que lo componen, garantizando su aprovechamiento de manera racional y sostenible. [30]

- **Ley N° 26842, Ley General de Salud**

Esta ley establece los derechos, deberes y responsabilidades relacionados con la salud individual, así como las obligaciones y restricciones necesarias para proteger la salud de otras personas. Reconoce la preservación de la salud como un elemento esencial para el desarrollo humano y como un componente fundamental para garantizar el bienestar tanto individual como colectivo. [51]

- **Ley N°27867, Ley orgánica de Gobiernos Regionales.**

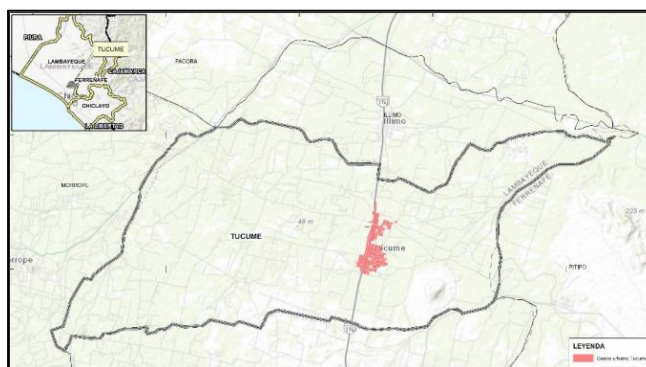
Esta ley orgánica regula la estructura, organización, competencias y funciones de los gobiernos regionales. Asimismo, establece que el Gobierno Regional debe operar de manera democrática, descentralizada y desconcentrada, en concordancia con la Constitución y la Ley de Bases de la Descentralización. [52]

5. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DEL PROYECTO

UBICACIÓN DEL PROYECTO

- El proyecto se lleva a cabo en el distrito de Túcume, perteneciente a la provincia y región de Lambayeque. La intervención se centra específicamente en el caserío Granja Sasape, situado aproximadamente a 6 minutos del centro del distrito.
- Localidad : Granja Sasape
- Distrito : Túcume
- Provincia : Lambayeque
- Región : Lambayeque.

Figura 43: Mapa del distrito de Túcume



6. Área de Influencia del Proyecto

La implementación de este proyecto implica una intervención técnica que no solo mejora las características del suelo, sino que también genera impactos tanto ambientales como sociales en su entorno. Por ello, es necesario delimitar el área de influencia, entendida como el espacio geográfico donde se pueden percibir los efectos derivados del mejoramiento de subrasantes mediante la incorporación de HDPE reciclado. Esta delimitación no se basa únicamente en criterios físicos, sino que también toma en cuenta factores ecológicos, urbanos y sociales que podrían verse alterados, directa o indirectamente, como consecuencia del proyecto.[30]

En ese sentido, el área de influencia se divide en dos niveles:

- **Área de influencia directa:** corresponde al lugar donde se desarrollan las actividades principales del estudio, específicamente en el caserío Granja Sasape, ubicado en el distrito de Túcume. En esta zona se realizaron las calicatas y se recolectaron las muestras de suelo que serán estabilizadas con HDPE reciclado, generando efectos inmediatos sobre el terreno y sus condiciones físico-mecánicas.[49]
- **Área de influencia indirecta:** comprende aquellos sectores del distrito de Túcume y áreas vecinas que presentan suelos con características similares a las de la zona de estudio, y que podrían verse beneficiadas en el futuro si se replican las técnicas desarrolladas. Además, este ámbito considera también los efectos secundarios derivados de la valorización del reciclaje de plásticos, el fortalecimiento de prácticas sostenibles y la concientización ambiental que el proyecto podría fomentar a nivel local.[30]

Esta clasificación permite identificar con claridad el alcance espacial de los posibles impactos, facilitando la planificación de medidas de mitigación y el monitoreo de resultados.

7. LÍNEA BASE AMBIENTAL

7.1. LÍNEA BASE FÍSICA

• SUELO

El área del proyecto, ubicada en el caserío Granja Sasape del distrito de Túcume, presenta una superficie predominantemente plana, con ligeras ondulaciones naturales. Este tipo de topografía es común en la zona costera de Lambayeque, lo que facilita el desarrollo de actividades agrícolas y de infraestructura vial. Los suelos en esta área son principalmente arcillosos con características de baja plasticidad, según los ensayos de laboratorio realizados como parte del presente estudio. Estas condiciones los hacen aptos para evaluar técnicas de mejoramiento mediante la incorporación de HDPE reciclado.[27]

• HIDROLOGÍA

La hidrología del caserío Granja Sasape está influenciada por la cuenca del río La Leche, una de las principales fuentes hídricas en la región de Lambayeque. Esta cuenca atraviesa los distritos de Túcume, Íllimo y Pacora, y forma parte de un

sistema de drenaje intermitente que puede activarse durante temporadas de lluvias intensas, especialmente cuando se presentan fenómenos climáticos como El Niño. Aunque la presencia de cuerpos de agua permanente es limitada en la zona de intervención, se considera importante monitorear el escurrimiento superficial para evitar procesos erosivos.[31]

- **GEOLOGÍA**

Desde el punto de vista geológico, el área del proyecto se encuentra dentro de la región conocida como Desierto del Pacífico, correspondiente a la Costa Árida peruana. El suelo presenta características de origen sedimentario, compuesto por depósitos aluviales y eólicos, con presencia de materiales sueltos como arenas finas, limos y arcillas. Según estudios geológicos regionales, se trata de suelos tipo Regosol desértico, conformados por capas poco consolidadas que, en épocas pasadas, formaron parte del lecho marino de aguas poco profundas.[30]

- **TEMPERATURA**

La T° en el distrito de Túcume varía debido a la influencia de fenómenos climáticos, especialmente El Niño. En los meses de invierno, la T° mínima promedio puede descender hasta los 15 °C y la máxima alcanza los 18 °C, mientras que en verano las temperaturas se elevan, registrando mínimas de 22 °C y máximas que pueden superar los 36 °C. Estas condiciones climáticas deben ser consideradas en la planificación de actividades de campo y procesos de compactación de suelos, dado que la humedad y temperatura influyen directamente en el rendimiento del mejoramiento con HDPE.[33]

- **ALTITUD**

El caserío Granja Sasape se sitúa a una altitud aproximada de 28 metros sobre el nivel del mar, similar al promedio del distrito de Túcume. Esta baja altitud y su cercanía al mar influyen en el tipo de suelo y en el régimen de precipitaciones, así como en la escasa presencia de vegetación nativa.[49]

- **PRECIPITACIONES**

La zona presenta un régimen de lluvias irregular y estacional, concentrado principalmente en los meses de verano (enero a marzo). Las precipitaciones anuales promedio en Túcume oscilan entre 100 y 250 mm, siendo mayores en años con eventos de El Niño. Este nivel de lluvias no representa un riesgo constante de

inundación, pero puede ocasionar problemas de erosión superficial si no se gestionan adecuadamente las pendientes y la estabilidad del suelo mejorado.[50]

7.2 LÍNEA BASE BIOLÓGICA

- **Flora:** La zona de Granja Sasape forma parte del ecosistema del bosque seco ecuatorial, característico de la costa norte de Perú. En este entorno predominan especies adaptadas a condiciones semidesérticas, tales como:
 - Algarrobo (*Prosopis pallida*): Árbol resistente a la sequía, utilizado tradicionalmente para sombra y leña

Figura 44: Algarrobo



- Palo santo (*Bursera graveolens*) y hualtaco: Especies nativas de gran valor ecológico.

Figura 45: Palo Santo



- Overo (*Cordia lutea*) y zapote (*Capparis angulata*): Arbustos que proporcionan alimento y refugio para aves e insectos.

Figura 46: Zapote



- **Fauna:** El área se encuentra dentro de la ecorregión del bosque seco, hogar de especies adaptadas a suelos áridos y condiciones calurosas:
 - *Gallus gallus domesticus* (*gallina doméstica*): ampliamente criada para carne y huevos, común en granjas y patios familiares.
 - *Anas platyrhynchos domesticus* (*pato doméstico*, también conocido como pato criollo o Muscovy duck): frecuente en patios de corral y áreas con presencia de agua, criado para consumo alimenticio
 - *Columbina picui* (*torcaza*, chilala o paloma picuí): pequeña paloma terrestre, presente en áreas abiertas y cultivos.
 - *Columba livia domesticus* (*paloma doméstica*, común en aeróvoros de viviendas).
 - *Ara macao*, *Amazona aestiva* u otras especies de *loros* silvestres o semi-silvestres: frecuentes en zonas cercanas a árboles frutales y parches de vegetación.
 - Alacranes (escorpiones): invertebrados típicos del clima árido costero.
 - *Cathartes aura* (*gallinazo*): buitre carroñero habitual en espacios rurales.

7.3. LÍNEA DE BASE SOCIOECONÓMICA

- **Vivienda**

En el caserío Granja Sasape, las viviendas se caracterizan por su tipología rural, generalmente construidas con materiales mixtos, como adobe, ladrillo cocido, calamina y en algunos casos concreto simple. Estas edificaciones son de tipo

unifamiliar y responden a las necesidades básicas de las familias que habitan en la zona. La mayoría de las casas se encuentra en condiciones básicas de habitabilidad, con acceso limitado a servicios de agua potable, desagüe y electricidad.

- **Uso Comercial**

El uso comercial en Granja Sasape es limitado pero funcional. Existen pequeñas bodegas familiares, puestos informales y tiendas de abarrotes que abastecen a la población local con productos de primera necesidad. También se observa actividad comercial relacionada con la agricultura, como la venta de productos del campo, así como pequeños talleres de reparación de herramientas o maquinaria agrícola. Estos establecimientos permiten a la comunidad mantenerse autoabastecida, aunque con oferta restringida.

- **Uso Industrial**

No se reportan edificaciones ni instalaciones industriales dentro del caserío Granja Sasape ni en sus inmediaciones. La zona conserva un carácter predominantemente agrícola y rural, por lo que la presencia de actividad industrial es inexistente. La ausencia de industrias favorece la conservación del entorno natural, aunque limita el desarrollo económico diversificado de la población.

8. IDENTIFICACION Y EVALUACION DE PASIVOS AMBIENTALES

Dentro del marco del presente estudio, la identificación y análisis de pasivos ambientales constituye una acción clave para determinar posibles efectos adversos que podrían derivarse de intervenciones previas o actuales sobre el suelo natural del caserío Granja Sasape, en el distrito de Túcume. Estos pasivos hacen referencia a alteraciones ambientales como contaminación del suelo, manejo inadecuado de residuos plásticos, perturbaciones en la capa vegetal o alteraciones físicas del entorno por actividades constructivas o agrícolas.

Este proceso busca reconocer con claridad las fuentes que pudieron haber contribuido al deterioro ambiental en el área de estudio. Se toma en cuenta tanto las acciones humanas pasadas (por ejemplo, el abandono de residuos sólidos) como las actuales (como el movimiento de tierras o la acumulación de desechos plásticos no valorizados). El objetivo es determinar el nivel de afectación que estas acciones representan para el ecosistema local.

Evaluar la magnitud e importancia de dichos pasivos permite identificar con mayor precisión la urgencia y el tipo de medidas correctivas o preventivas que deben implementarse. En el contexto de este proyecto, la incorporación de HDPE reciclado como material de mejora del suelo puede considerarse una estrategia de valorización que contribuye a mitigar un pasivo ambiental existente: el exceso de residuos plásticos mal-gestionados.

Esta evaluación resulta indispensable para asegurar una gestión ambiental responsable, donde se priorice la sostenibilidad del entorno y se reduzcan los impactos negativos a mediano y largo plazo. Asimismo, fortalece el compromiso del proyecto con el desarrollo rural sostenible, al promover prácticas constructivas más limpias y alineadas con los principios de economía circular y protección del medio ambiente.

9. Identificación y Evaluación de Impactos Ambientales

Dentro del presente estudio, se llevó a cabo un proceso de análisis que facilita identificar la relación entre las actividades del proyecto y los diferentes componentes del entorno natural y social del caserío Granja Sasape. Esta evaluación ha permitido detectar los posibles impactos ambientales que podrían generarse a raíz de la ejecución del mejoramiento de la subrasante mediante la incorporación de HDPE reciclado.

Este análisis resulta fundamental, pues permite sustentar la elaboración del plan de manejo ambiental, el cual tiene como finalidad aplicar medidas destinadas a prevenir, minimizar o compensar los posibles impactos negativos que puedan surgir durante la ejecución del proyecto. Al mismo tiempo, busca potenciar aquellos efectos favorables que aporten a la conservación del entorno y al desarrollo sostenible de la actividad.

Para realizar la caracterización y valoración de los impactos ambientales, se ha utilizado la herramienta metodológica de la matriz de Leopold, una técnica que permite cruzar las acciones del proyecto (como el trazo, excavación, adición de humedad, mezclado con HDPE, compactación, entre otros) con los componentes del ambiente susceptibles a ser alterados (como el suelo, agua, aire, flora, fauna, calidad visual, y aspectos sociales o económicos). Cada celda en la matriz ha sido evaluado de acuerdo con el tipo de impacto ya sea positivo o negativo y su magnitud e importancia. Esto ha permitido establecer qué factores ambientales presentan mayor grado de alteración y qué actividades del proyecto tienen el mayor nivel de incidencia en el entorno.

Finalmente, se han sumado los puntajes individuales por cada componente y actividad, permitiendo identificar los factores más sensibles o afectados y las acciones más críticas del proyecto. Estos resultados han sido claves para priorizar medidas dentro del plan de

manejo ambiental, asegurando que se aborden de forma específica los aspectos que podrían comprometer el equilibrio ambiental local durante la ejecución del proyecto en Granja Sasape.

10. ANALISIS DE LA MATRIZ DE IDENTIFICACION Y EVALUACION DE IMPACTOS AMBIENTALES

Tabla LXIX: Matriz de Leopold de obtención de HDPE

COMPONENTE AMBIENTAL	ACCIONES DEL PROYECTO		Obtención del HDPE						IMPACTO TOTAL		
			Recolección de Plástico HDPE		Trituración de HDPE		Almacenamiento del producto				
	FACTORES AMBIENTALES		M	I	M	I	M	I	Magnitud	Importancia	Ponderado
Factores Físico - Químicos	Suelo	Morfología del terreno	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Contaminación del suelo	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Agua	Agua subterránea	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Agua potable	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Aire	Partículas en suspensión	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Emisión de gases y humo	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Nivel de ruido	0	0	-2	2	0	0	-2	2	-4
	Procesos	Erosión	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Condiciones Biológicas	Flora	Diversidad	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Fauna	Diversidad de especies	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Factores Culturales	Usos del Suelo	Naturaleza y espacios abiertos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Pastos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Estética	Calidad visual	0	0	0	0	-2	1	-2	1	-2
	Nivel Sociocultural	Calidad de vida de la población	6	5	0	0	-2	2	4	7	26
		Salud y seguridad	1	2	-1	2	0	0	0	4	0
		Empleo temporal	5	3	3	4	2	2	10	9	31
	Actividades	Eliminación de residuos	8	6	5	5	0	0	13	11	73
		Beneficios económicos	-1	4	0	3	0	0	-1	7	-4
		Reciclaje	8	8	8	8	3	4	19	20	140
IMPACTO TOTAL		MAGNITUD E IMPORTANCIA	27	28	13	24	1	9	Suma de fila		260
		PONDERADO	155		95		10		Suma de columnas		260

Tabla LXX: Matriz de Leopold de conformación de subrasante con HDPE

COMPONENTE AMBIENTAL			ACCIONES DEL PROYECTO	Conformación de subrasante con HDPE									
				Trazo y Replanteo		Excavación y Nivelación		Mezclado de la subrasante mejorada		Adición del Contenido de Humedad		Perfilado y Compactación	
				M	I	M	I	M	I	M	I	M	I
Factores Físico - Químicos	Suelo	Morfología del terreno	-4	6	-6	8	-7	7	0	0	-2	3	
		Contaminación del suelo	-2	3	0	0	-3	5	0	0	0	0	
	Agua	Agua subterránea	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		Agua potable	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Aire	Partículas en suspensión	-5	6	-1	2	-3	4	5	3	-3	3	
		Emisión de gases y humo	-3	4	-3	4	-3	3	-3	1	-2	4	
		Nivel de ruido	-3	5	-1	3	-2	3	-2	4	-1	1	
	Procesos	Erosión	-6	4	-4	1	-1	1	0	0	0	0	
Condiciones Biológicas	Flora	Diversidad	-3	2	-3	3	-3	2	0	0	0	0	
	Fauna	Diversidad de especies	-2	3	-2	1	-2	4	0	0	0	0	
Factores Culturales	Usos del Suelo	Naturaleza y espacios abiertos	-3	1	-2	2	0	0	0	0	0	0	
		Pastos	-2	3	-1	2	0	0	0	0	0	0	
	Estética	Calidad visual	-1	2	-3	1	-2	2	0	0	0	0	
	Nivel Sociocultural	Calidad de vida de la población	0	0	0	0	3	4	0	0	0	0	
		Salud y seguridad	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		Empleo temporal	6	3	6	4	6	5	3	4	2	4	
	Actividades	Eliminación de residuos	0	0	0	0	6	8	0	0	0	0	
		Beneficios económicos	0	0	0	0	7	5	0	0	0	0	
		Reciclaje	0	0	0	0	6	4	0	0	0	0	
IMPACTO TOTAL		MAGNITUD E IMPORTANCIA	-28	42	-20	31	2	57	3	12	-6	15	
		PONDERADO	-116		-65		39		16		-16		

IMPACTO TOTAL		
Magnitud	Importancia	Ponderado
-19	24	-127
-5	8	-21
0	0	0
0	0	0
-7	18	-38
-14	16	-44
-9	16	-33
-11	6	-29
-9	7	-21
-6	8	-16
-5	3	-7
-3	5	-8
-6	5	-9
3	4	12
0	0	0
23	20	92
6	8	48
7	5	35
6	4	24
Suma de fila		-142
Suma de columnas		-142

11. PLAN DE MANEJO AMBIENTAL

El PMA constituye una etapa clave dentro de la Evaluación de Impacto Ambiental, ya que es el instrumento que garantiza que las acciones del proyecto no ocasionen impactos negativos significativos sobre el entorno. Este plan tiene como objetivo definir y organizar un conjunto de medidas preventivas, correctivas, de mitigación y compensación que deberán aplicarse durante la ejecución y operación del proyecto de mejoramiento de subrasantes mediante el uso de HDPE.

El propósito del PMA es asegurar la conservación de los recursos naturales y la protección de la salud y el bienestar de todas las personas que intervienen, de forma directa o indirecta, en la ejecución del proyecto. Considerando que las actividades incluyen el manejo de suelos arcillosos y la incorporación de plásticos reciclados, se han identificado diversos riesgos ambientales y ocupacionales que deben ser controlados adecuadamente para evitar posibles afectaciones.

Entre las acciones prioritarias se encuentran:

- Protección del entorno físico: Se deben tomar medidas para evitar la degradación del suelo, como el uso racional de áreas de acopio, el control de polvo generado por el movimiento de tierras y el mantenimiento adecuado del material plástico HDPE.
- Preservación de la salud ocupacional: Se debe asegurar que todos los trabajadores cuenten con los Equipos de Protección Personal (EPP) adecuados: cascos, guantes, botas de seguridad, mascarillas y ropa de trabajo que los proteja de la exposición al polvo o manipulación directa de materiales.
- Capacitación ambiental y en seguridad: Se recomienda implementar jornadas de formación dirigidas a los trabajadores y colaboradores, enfocadas en el manejo responsable de residuos, prácticas sostenibles, seguridad personal y prevención de enfermedades ocupacionales.
- Responsabilidad social y formalización: Es fundamental promover buenas prácticas laborales y fomentar la formalización de los procesos, para asegurar el cumplimiento normativo y reducir los riesgos tanto ambientales como para la salud de los trabajadores.

12. PLAN DE COMPENSACIÓN AMBIENTAL

- El Plan de Compensación Ambiental se concibe como un mecanismo complementario al PMA, orientado a equilibrar los efectos negativos residuales del proyecto mediante acciones que generen beneficios ambientales tangibles. Estas medidas tienen un carácter correctivo y simbólico, y buscan aportar positivamente al entorno natural y social del caserío Granja Sasape.

A continuación, se detallan las propuestas según componentes específicos:

SUELO

- Reforestación y protección de áreas intervenidas mediante la plantación de especies nativas o resistentes a la zona.
- Aprovechamiento responsable del material excavado, redirigiéndolo a otros proyectos o usos alternativos, evitando el desperdicio de tierra y reduciendo el deterioro del entorno.

AGUA

- Elaboración de un plan básico de manejo de aguas subterráneas para asegurar que las actividades del proyecto no afecten el equilibrio hídrico de la zona.
- Monitoreo de niveles freáticos en coordinación con autoridades locales, para garantizar una extracción sostenible.

SOCIOECONÓMICO

- Promoción del empleo temporal local mediante la inclusión de mano de obra del propio caserío durante las fases del proyecto.
- Fomento de actividades económicas complementarias (comercio de alimentos, transporte, reciclaje) que generen ingresos para las familias cercanas.

SALUD Y SEGURIDAD OCUPACIONAL

- Aplicación de controles médicos preventivos, especialmente respiratorios, para trabajadores expuestos a polvo o manipulación de HDPE.
- Distribución y exigencia del uso obligatorio de Equipos de Protección Personal (EPPs) adecuados, tales como:

- Para la cabeza: cascos y cortavientos para evitar golpes y exposición solar.
- Para el cuerpo: uniformes resistentes al clima y al contacto con suelo húmedo.
- Para los pies: botas de jebe o plástico para evitar infecciones o accidentes por contacto con suelos blandos o húmedos.
- Para las manos: guantes de trabajo para evitar lesiones durante el manipuleo de herramientas y suelos.

Este conjunto de medidas, diseñado específicamente para el contexto rural y socioambiental del distrito de Túcume, garantiza un equilibrio entre el desarrollo del proyecto y la sostenibilidad ambiental, reforzando el compromiso con una ingeniería civil responsable, eficiente y alineada con los principios del desarrollo sostenible.

Evaluar la variación económica de la incorporación de HDPE reciclado a los suelos arcillosos de subrasantes, a partir de los resultados obtenidos en ensayos de laboratorio

Para el análisis de la variación económica consistirá en realizar un análisis detallado de la variación económica generada por la incorporación de HDPE reciclado en los suelos arcillosos de la subrasante. Para ello, se tomará como referencia el Análisis de Precios Unitarios, con el fin de obtener una evaluación económica detallada y comparable entre las distintas alternativas de estabilización.

En primer lugar, se realizará un análisis de costos considerando la incorporación de los porcentajes óptimos de HDPE reciclado 4%, 5% y 6%, seleccionados en función de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, los cuales cumplen con los valores mínimos exigidos de CBR establecidos por la normativa para el uso de suelos en subrasantes. Este análisis permitirá estimar el costo total del mejoramiento del suelo con cada una de estas dosificaciones, contemplando los materiales, el proceso de mezcla, el transporte y la mano de obra requerida.

Ilustración 32: Análisis de precios de SN +4% HDPE

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
PARTIDA: Suelo natural + 4% HDPE					
Rendimiento: m3/día	MO: 2500 m3/día	EQ: 2500 m3/día	Costo unitario directo por m3:		S/ 124.74
Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	PU	Parcial S/.
Mano de Obra					
Capataz	hh	1.00	0.0032	35.00	0.11
Operario	hh	4.00	0.0128	29.00	0.37
Peón	hh	2.00	0.0064	26.00	0.17
					0.65
Materiales					
Polietileno de alta densidad reciclado	kg		74.800	1.60	119.68
Agua	m ³		0.160	15.00	2.40
					122.08
Equipos					
Herramientas Manuales	%MO		3.00%	0.65	0.02
Rodillo liso Vibr. Autop 70-100 HP 7-9 TN	hm	0.50	0.0016	140.00	0.22
Motoniveladora 140 HP	hm	0.50	0.0016	280.00	0.45
Camion volquete de 15 m3	hm	0.50	0.0016	180.00	0.29
Camion cisterna 4x2 (AGUA) 145-165 HP	hm	1.00	0.0032	260.00	0.83
Excavadoras Sobre Ruedas M315D2	hm	0.35	0.0011	180.00	0.20
					2.01

Fuente: Elaboración propia

Según la Ilustración 32, el costo total para la ejecución de 1 metro cúbico de subrasante, con polietileno de alta densidad, con una adición del 4%, será de 124.74 soles.

Ilustración 33: Análisis de precios de SN + 5% HDPE

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
PARTIDA: Suelo natural + 5% HDPE					
Rendimiento: m3/día	MO: 2500 m3/día	EQ: 2500 m3/día	Costo unitario directo por m3:		S/ 154.66
Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	PU	Parcial S/.
Mano de Obra					
Capataz	hh	1.00	0.0032	35.00	0.11
Operario	hh	4.00	0.0128	29.00	0.37
Peón	hh	2.00	0.0064	26.00	0.17
					0.65
Materiales					
Polietileno de alta densidad reciclado	kg		93.500	1.60	149.60
Agua	m ³		0.160	15.00	2.40
					152.00
Equipos					
Herramientas Manuales	%MO		3.00%	0.65	0.02
Rodillo liso Vibr. Autop 70-100 HP 7-9 TN	hm	0.50	0.0016	140.00	0.22
Motoniveladora 140 HP	hm	0.50	0.0016	280.00	0.45
Camion volquete de 15 m3	hm	0.50	0.0016	180.00	0.29
Camion cisterna 4x2 (AGUA) 145-165 HP	hm	1.00	0.0032	260.00	0.83
Excavadoras Sobre Ruedas M315D2	hm	0.35	0.0011	180.00	0.20
					2.01

Fuente: Elaboración propia

Según la Ilustración 33, el costo total para la ejecución de 1 metro cúbico de subrasante, con polietileno de alta densidad, con una adición del 5%, será de 154.66 soles.

Ilustración 34: Análisis de precios de SN + 6% HDPE

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
PARTIDA: Suelo natural + 6% HDPE					
Rendimiento: m3/día	MO: 2500 m3/día	EQ: 2500 m3/día		Costo unitario directo por m3:	S/ 184.58
Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	PU	Parcial S/.
Mano de Obra					
Capataz	hh	1.00	0.0032	35.00	0.11
Operario	hh	4.00	0.0128	29.00	0.37
Peón	hh	2.00	0.0064	26.00	0.17
					0.65
Materiales					
Polietileno de alta densidad reciclado	kg		112.200	1.60	179.52
Agua	m ³		0.160	15.00	2.40
					181.92
Equipos					
Herramientas Manuales	%MO		3.00%	0.65	0.02
Rodillo liso Vibr. Autop 70-100 HP 7-9 TN	hm	0.50	0.0016	140.00	0.22
Motoniveladora 140 HP	hm	0.50	0.0016	280.00	0.45
Camion volquete de 15 m3	hm	0.50	0.0016	180.00	0.29
Camion cisterna 4x2 (AGUA) 145-165 HP	hm	1.00	0.0032	260.00	0.83
Excavadoras Sobre Ruedas M315D2	hm	0.35	0.0011	180.00	0.20
					2.01

Fuente: Elaboración propia

Según la Ilustración 34, el costo total para la ejecución de 1 metro cúbico de subrasante, con polietileno de alta densidad, con una adición del 6%, será de 184.58 soles.

Comparación económica con alternativa convencional (suelo-cemento)

Con la finalidad de contextualizar económicamente los resultados obtenidos con la incorporación de HDPE, se realizó una comparación referencial con la técnica tradicional de estabilización con suelo-cemento.

Es importante precisar que el presente estudio no desarrolla experimentalmente el suelo-cemento, sino que emplea datos de investigaciones previas únicamente como base comparativa económica, con el objetivo de contrastar costos y analizar la viabilidad del uso de HDPE como alternativa de mejoramiento de subrasantes.

El mejoramiento de suelos mediante la técnica de suelo-cemento consiste en la mezcla del suelo natural con un porcentaje de cemento Portland y agua, con el fin de incrementar su resistencia y capacidad portante.

Este procedimiento incluye etapas como escarificado, mezclado, humectación, compactación y curado. Generalmente, los porcentajes de cemento utilizados oscilan entre 4% y 10%, dependiendo de las características del suelo.

Para fines de esta investigación, los valores de costos y desempeño han sido tomados de estudios previos, utilizándose únicamente como referencia comparativa frente al uso de HDPE.

Seguidamente se procederá a contrastar los resultados obtenidos con el método propuesto frente al uso de estabilizantes convencionales como el cemento Portland tipo I, a fin de determinar cuál de las opciones representa una solución más económica y eficiente para el mejoramiento de la subrasante.

Ilustración 35: Análisis de precios de SN + Cemento portland tipo I

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
PARTIDA: Suelo natural + Cemento tipo I					
Rendimiento: m3/día	MO: 2500 m3/día	EQ: 2500 m3/día		Costo unitario directo por m3:	S/ 159.90
Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de Obra					
Capataz	hh	1.00	0.0032	35.00	0.11
Operario	hh	4.00	0.0128	29.00	0.37
Peón	hh	2.00	0.0064	26.00	0.17
					0.65
Materiales					
Cemento tipo I	kg		112.200	1.38	154.84
Agua	m ³		0.160	15.00	2.40
					157.24
Equipos					
Herramientas Manuales	%MO		3.00%	0.65	0.02
Rodillo liso Vibr. Autop 70-100 HP 7-9 TN	hm	0.50	0.0016	140.00	0.22
Motoniveladora 140 HP	hm	0.50	0.0016	280.00	0.45
Camion volquete de 15 m3	hm	0.50	0.0016	180.00	0.29
Camion cisterna 4x2 (AGUA) 145-165 HP	hm	1.00	0.0032	260.00	0.83
Excavadoras Sobre Ruedas M315D2	hm	0.35	0.0011	180.00	0.20
					2.01

Fuente: Elaboración propia

Según la Ilustración 35, el costo total para la ejecución de 1 metro cúbico de subrasante, con cemento portland tipo I, será de 159.90 soles.

Finalmente, se comprobó el costo unitario obtenido para cada uno de los porcentajes evaluados de HDPE (4%, 5% y 6%), determinándose que el porcentaje óptimo y más beneficioso corresponde al 4%, ya que ofrece un equilibrio adecuado entre resistencia y economía. Al realizar la comparación con el análisis de costos del método tradicional de estabilización mediante la adición de cemento Portland a la subrasante, se evidencia que el uso de HDPE reciclado al 4% resulta significativamente más económico. Esto demuestra que, además de mejorar las propiedades físico-mecánicas del suelo, el empleo de HDPE representa una alternativa técnica viable y sostenible que reduce los costos de estabilización

CUADRO COMPARATIVO				
Alternativa	% adición	Costo	Desventajas	Ventajas
SUELO +HDPE	4%	124.74	Mezcla no totalmente homogénea; requiere control en la distribución del HDPE	Mejora la capacidad portante (CBR); aumenta la flexibilidad del suelo; reduce la deformación permanente; bajo impacto ambiental al usar material reciclado
SUELO +HDPE	5%	154.66	Incremento del costo; puede dificultar la compactación si no se controla adecuadamente	Mayor incremento del CBR; mejor resistencia a la deformación; buen equilibrio entre costo y desempeño
SUELO +HDPE	6%	184.58	Costo elevado; posible pérdida de trabajabilidad; dificultad en la mezcla y compactación	Alta resistencia mecánica; mayor durabilidad; mejora significativa del comportamiento del suelo
SUELO + CEMENTO	8%	159.9	Comportamiento rígido (fisuración); mayor impacto ambiental; requiere curado; menor flexibilidad	Alta resistencia inicial; incremento significativo del CBR; técnica convencional ampliamente validada

Fuente: Elaboración propia

Discusiones

De acuerdo con el primer objetivo específico el cual es realizar un conteo y análisis de la demanda vehicular en la ruta para establecer datos de carga. Teniendo como resultado que el conteo vehicular efectuado en la ruta Granja Sasape, distrito de Túcume, permitió identificar una demanda promedio diaria de tránsito (IMDA) de 453 vehículos. Este resultado se obtuvo mediante el método de conteo manual durante siete días consecutivos, considerando ambos sentidos de circulación y aplicando los lineamientos establecidos por el Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos (MTC). Según los criterios del MTC, para intervalos de tránsito entre 401 y 2000 vehículos/día, corresponde la ejecución de 3 calicatas, lo cual justifica la cantidad de puntos de muestreo seleccionados para la caracterización geotécnica del suelo y los ensayos posteriores con HDPE. Este resultado con la metodología adoptada por Mukhtar Abukhattala y Mamadou Fall (2021) [16], quienes, en su estudio sobre la *“caracterización geotécnica de residuos plásticos en aplicaciones de subrasante de pavimentos”*, nos menciona que dicha investigación realizó un conteo vehicular teniendo en si 265 vehículos/día, donde los autores ejecutaron 2 calicatas en zonas representativas de Ottawa-Gatineau (Canadá) para obtener muestras de suelo destinadas a ensayos de laboratorio, siguiendo normas ASTM y AASHTO. Ambos trabajos coinciden en la importancia de la representatividad del muestreo, ya que la cantidad y ubicación de calicatas. Sin embargo, la diferencia clave es que en el presente estudio sí se realizó un conteo vehicular real, lo que proporciona una base más precisa para definir las condiciones de diseño y la magnitud de las solicitaciones esperadas sobre la subrasante. De acuerdo con el Manual de Carreteras – Pavimentos [27], el tránsito medio diario (IMDA) es la base para estimar los ejes equivalentes acumulados (EEA) y el número de repeticiones de carga durante la vida útil del proyecto. El valor obtenido de 453 vehículos/día ubica la vía en una categoría de tránsito medio-bajo, lo cual respalda la viabilidad técnica del uso de HDPE reciclado para optimizar la subrasante, reduciendo la necesidad de capas estructurales más costosas y mejorando la sostenibilidad del diseño. De este modo, según el MTC [27], el conteo vehicular constituye una etapa esencial dentro del diseño y evaluación de pavimentos, ya que permite determinar la magnitud de las cargas equivalentes repetidas que actuarán sobre la estructura del pavimento a lo largo de su vida útil. Asimismo, proporciona una base cuantitativa para definir el tipo de refuerzo y la calidad de los materiales requeridos en cada capa estructural, en particular la subrasante, que soporta directamente los esfuerzos transmitidos por el tránsito.

Continuando con el segundo objetivo que es determinar las propiedades físico-mecánicas del suelo de la ruta para su caracterización inicial nos dio como resultados de laboratorio del suelo natural indicaron un límite líquido de 45.55%, límite plástico de 21.86% e índice de plasticidad de 23.68%, clasificando el material como una arcilla de plasticidad alta (CH) según el SUCS, y como tipo A-7-6 según la AASHTO. En el ensayo Proctor Modificado, se obtuvo una densidad seca máxima de 1.74 g/cm^3 y un contenido óptimo de humedad de 16.8%, mientras que el CBR del suelo natural fue de 4.3%, valor inferior al mínimo requerido (6%) para considerarse apto como subrasante. Estos resultados coinciden con los reportados por Guevara Idrogo (2023) [23], quien evaluó suelos arcillosos en Cajamarca obteniendo valores de CBR de 3%, lo que también los clasificaba como no aptos para subrasantes, donde reportaron suelos con índice de plasticidad alto de $IP=26.2\%$, $LL=45.3\%$ y $LP=19.1$, confirmando la baja capacidad portante de arcillas cohesivas sin tratamiento. Adicionalmente, en el estudio citado los materiales fueron clasificados como arcilla de alta plasticidad (CH) según el SUCS y como tipo A-7-6 conforme a la AASHTO. Asimismo, el autor indicó que la densidad seca máxima alcanzó un valor promedio de 1.70 g/cm^3 , con un contenido óptimo de humedad de 17.5%. Los resultados iniciales del suelo de Túcume reflejan un comportamiento similar al observado en otras regiones del Perú, confirmando la necesidad de incorporar aditivos estabilizantes como el HDPE reciclado para reducir la plasticidad, mejorar la densidad y aumentar la capacidad portante del suelo. De esta manera, la caracterización inicial no solo diagnostica el estado del material, sino que fundamenta técnicamente las etapas posteriores de mejora mediante polímeros reciclados, contribuyendo al desarrollo de alternativas sostenibles para la estabilización de suelos arcillosos en proyectos viales. Según Nelson [53], los suelos arcillosos con alto índice de plasticidad exhiben elevada compresibilidad y baja resistencia al esfuerzo cortante, características que reducen su desempeño como subrasante. Este comportamiento ha sido ampliamente documentado en la mecánica de suelos, donde se establece que las arcillas expansivas presentan limitaciones estructurales que requieren procesos de estabilización o incorporación de materiales modificadores para mejorar su comportamiento bajo cargas repetitivas.

Seguidamente el tercer objetivo nos habla de definir el porcentaje óptimo de HDPE reciclado en diferentes dosificaciones (2.5%, 3%, 4%, 5% y 6%). Donde los resultados de los ensayos realizados mostraron que la incorporación de HDPE modificó significativamente las

propiedades del suelo.

Se observó una reducción progresiva del índice de plasticidad, pasando de 23.68% (suelo natural) a 8.74% con 4% de HDPE, y una disminución del contenido óptimo de humedad de 16.8% a 14.6%. Con un CBR máximo de 10% alcanzado con 4% de HDPE, superando el valor normativo mínimo de 6% para subrasantes. Sin embargo, los resultados coinciden con lo reportado por Banerji et al. (2024) [18], quienes al añadir polietileno de alta densidad en proporciones de 1%, 3% y 5% obtuvieron un incremento del CBR de 4.1% a 9.2%, con la adición de 5% del aditivo. Adicionalmente, reportaron una reducción progresiva de la humedad óptima desde 17.6% (suelo natural) hasta 15.1% con 5% de polietileno de alta densidad, con una caída del índice de plasticidad desde 26.2% hasta 17.8%, lo que evidencia la mejora en la rigidez y la reducción de la susceptibilidad al hinchamiento de las arcillas tratadas. El HDPE reciclado actúa como un material estabilizante no tradicional que mejora la estructura del suelo mediante interacción física, disminuyendo la cohesividad excesiva típica de las arcillas y aumentando su capacidad portante. Este aporte refuerza la viabilidad del uso de residuos plásticos como alternativa ecoeficiente dentro del diseño y mejoramiento de subrasantes en pavimentos flexibles. Según Tabassum y Bheemasetti [54], la incorporación de polímeros como el HDPE incrementa la rigidez del suelo al formar una red de refuerzo interna que redistribuye las cargas aplicadas y reduce los efectos de la humedad sobre la estructura arcillosa. Esto permite que los suelos cohesivos presenten mejores condiciones de estabilidad y desempeño mecánico cuando son sometidos a cargas repetitivas de tránsito vehicular.

De acuerdo con el cuarto objetivo que es cuantificar las variaciones en las propiedades del suelo arcilloso con HDPE mediante ensayos CBR, nos dio como resultado que el índice CBR aumentó de 4.3% (suelo natural) a 10% (suelo con 4% de HDPE), representando una mejora en la capacidad portante. Estos resultados evidencian que la adición de HDPE mejora el comportamiento mecánico del suelo, volviéndolo más resistente ante cargas repetitivas. Relacionándola con antecedentes mi antecedente nos dice que los hallazgos de Cueva y Álvarez (2023) [21], quienes reportaron incrementos del CBR de 4.7% a 11% al adicionar 4% de plástico molido reciclado en suelos arcillosos de Lurín. Por lo tanto, la mejora observada en el valor del CBR (de 4.3 % a 10 % con 4 % de HDPE) confirma que la incorporación de polímero reciclado actúa de forma efectiva como elemento de refuerzo en la matriz arcillosa de la subrasante. En concreto, el HDPE genera un entramado interno que reduce la deformabilidad, mejora la transmisión de cargas y disminuye la deformación plástica del suelo bajo carga repetida. Esto permite que la capa de subrasante

adquiera mayor rigidez y capacidad portante, lo cual es clave para el comportamiento del pavimento. Para sustentar esta mejora, se puede citar el estudio de Haider et al. (2023) [55], en el que se observa que la inclusión de polímeros reciclados mejora significativamente el CBR de suelos finos, reduciendo la susceptibilidad al hinchamiento y mejorando la rigidez del suelo. Además, los autores destacan que los polímeros actúan como refuerzo físico dentro de la matriz del suelo, limitando el movimiento relativo de las partículas y aumentando la estabilidad bajo cargas repetitivas. Esto contribuye a una distribución más uniforme de las tensiones y a la reducción de deformaciones plásticas, fortaleciendo la subrasante frente al tránsito vehicular.

Seguidamente en el quinto objetivo que es sobre evaluación del impacto ambiental de la incorporación de HDPE en los suelos arcillosos utilizados en subrasantes para mejorar sus propiedades físico-mecánicas, nos dio como resultado obtenido en dicha evaluación indicaron que la obtención del HDPE reciclado generó un impacto positivo de 260, debido a que se trata de un material reutilizado, lo cual contribuye a la reducción de residuos plásticos y promueve prácticas de reciclaje dentro de la construcción vial. Por otro lado, la conformación de la subrasante con HDPE mostró un impacto negativo de -142, asociado principalmente al consumo energético durante el proceso de mezclado y compactación del material. Sin embargo, al considerar la suma total de ambos impactos, se obtiene un balance positivo de 118, lo que evidencia que la incorporación de HDPE reciclado en suelos arcillosos representa un aporte ambiental favorable y sostenible para la optimización de subrasantes. Este resultado es consistente con los hallazgos de Shelema Amena (2022) [14], quien reportó que la incorporación de residuos plásticos en suelos expansivos no solo mejoró las propiedades mecánicas, sino que también contribuyó a la mitigación de la contaminación ambiental, realizando una matriz de Leopold donde obtuvo impactos positivos de 184 en términos de reducción de desechos plásticos. De manera demostró que la adición de residuos plásticos en pavimentos flexibles representa una alternativa sostenible, al reducir la cantidad de betún necesario y disminuir la disposición inadecuada de plásticos, evidenciando un doble beneficio tanto estructural como ambiental. Desde un enfoque técnico, la reutilización de HDPE reciclado en la subrasante contribuye a reducir la presión sobre vertederos y la extracción de recursos naturales, promoviendo la sostenibilidad en la ingeniería vial. Además, la incorporación de este polímero disminuye la susceptibilidad al deterioro por humedad del suelo, favoreciendo la durabilidad de la subrasante. Estudios recientes, como los de Attom et al. (2025) [56], destacan que los polímeros reciclados actúan como refuerzo físico dentro de la matriz del suelo,

reduciendo la deformabilidad y aumentando la estabilidad bajo cargas repetitivas, lo cual respalda la viabilidad ambiental y técnica de su utilización en pavimentos flexibles.

Finalmente el sexto objetivo trata sobre evaluar la variación económica de la incorporación de HDPE reciclado a los suelos arcillosos de subrasantes, donde obtuvimos como resultados del análisis económico que, al evaluar los costos unitarios de las diferentes dosificaciones de HDPE (4%, 5% y 6%), el porcentaje óptimo y más beneficioso corresponde al 4%, con un costo unitario de 124.74, ya que proporciona un equilibrio adecuado entre la mejora en las propiedades físico-mecánicas y la eficiencia económica. La incorporación de HDPE no solo optimiza la capacidad portante del suelo, sino que también permite reducir gastos asociados a la construcción de subrasantes más gruesas o al uso excesivo de materiales convencionales. Estos hallazgos son comparables a los reportados por Palomino y Trujillo (2022) [20], quienes evidenciaron que la incorporación de PET triturado en bajas proporciones mejora la capacidad portante del suelo y permite optimizar los costos en el diseño de subrasantes, confirmando que el uso de residuos plásticos representa una alternativa económicamente viable y sostenible en proyectos viales. Desde el punto de vista técnico, la utilización de HDPE reciclado actúa como estabilizante que mejora la rigidez del suelo y aumenta su resistencia a cargas repetidas. Este efecto reduce la probabilidad de deformaciones plásticas y asentamientos diferenciales, lo que se traduce en menores costos de mantenimiento y mayor durabilidad de la infraestructura. Según Quispe y Sañac (2019) [57], la incorporación de PET triturado en suelos arcillosos incrementó el valor del CBR de 3.4% a 7.8%, representando un aumento del 129%, y redujo la expansión del suelo de 1.1% a 0.6%, pasando de una subrasante insuficiente a una subrasante regular. Esta mejora en las propiedades físico-mecánicas se traduce directamente en beneficios económicos, ya que permite disminuir el espesor requerido de la subrasante y de las capas superiores del pavimento, optimizando el uso de materiales convencionales y reduciendo los costos asociados a la construcción y mantenimiento.

Conclusiones

Respecto al conteo vehicular realizado en la ruta Granja Sasape – distrito de Túcume permitió identificar un Índice Medio Diario Anual (IMDA) de 453 vehículos, lo que clasifica la vía dentro del rango de tránsito medio-bajo según el Manual de Carreteras del MTC. Este resultado justificó la ejecución de tres calicatas representativas, garantizando la obtención de muestras confiables para la caracterización del suelo y la posterior incorporación del aditivo HDPE.

En cuanto al suelo natural del tramo de estudio fue clasificado como arcilla de alta plasticidad (CH) según el sistema SUCS y A-7-6 de acuerdo con la AASHTO, evidenciando un límite plástico 21.86%, límite líquido de 45.55%, índice de plasticidad de 23.68%, densidad seca máxima de 1.74 g/cm³, humedad óptima de 16.8% y un CBR de 4.3%, valores que lo califican como no apto para subrasante sin tratamiento.

Sobre la incorporación de HDPE reciclado en proporciones de 2.5%, 3%, 4%, 5% y 6% permitió determinar que el 4% es la dosificación óptima, alcanzando los mejores resultados físico-mecánicos. En comparación con el suelo natural, el CBR aumento de 3% a 10% donde estos resultados confirman que el HDPE actúa como un refuerzo físico, mejorando la estructura interna del suelo, incrementando su compactibilidad y estabilidad frente a cargas cíclicas.

Referente al ensayo CBR mostró un aumento de 3% (suelo natural) a 10% con 4% de HDPE, lo que representa una mejora en la capacidad portante. Este valor supera el mínimo exigido por el MTC (6%), demostrando la eficacia del HDPE reciclado al 4% como estabilizador para suelos arcillosos de baja resistencia.

La obtención de HDPE reciclado generó un impacto positivo de 260 al reutilizar residuos plásticos, promoviendo prácticas sostenibles. Por otro lado, la conformación de la subrasante presentó un impacto negativo de -142 por el consumo energético durante la mezcla y compactación, evidenciando que, a pesar del gasto energético, el aporte ambiental del HDPE es favorable.

El análisis económico mostró que la dosificación óptima es 4% de HDPE, con un costo unitario de 124.74, equilibrando la mejora en propiedades físico-mecánicas y eficiencia económica. Esta proporción optimiza la subrasante, reduce espesores adicionales y representa la alternativa más viable para la ruta Granja Sasape.

Recomendaciones

Se recomienda replicar este tipo de investigaciones en otras zonas geográficas del país, especialmente en regiones con suelos arcillosos de alta plasticidad o condiciones climáticas extremas, con el fin de validar la aplicabilidad del HDPE reciclado en distintos contextos geotécnicos y establecer parámetros de diseño más amplios.

Se recomienda que las instituciones públicas y entidades viales promuevan el uso de materiales reciclados en obras de infraestructura, incentivando la economía circular y reduciendo la acumulación de desechos plásticos, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental y al cumplimiento de políticas nacionales de desarrollo sostenible

Se recomienda continuar realizando investigaciones relacionadas con la estabilización de suelos arcillosos mediante la incorporación de polietileno de alta densidad, dado que en la presente investigación se obtuvieron resultados favorables en el incremento del CBR, alcanzando valores que permiten clasificar el suelo como apto para su uso en subrasantes de pavimentos flexibles.

Este tipo de adición del HDPE puede solo ser realizado en suelos donde no se haya encontrado nivel freático dentro de la altura de trabajo de la estructura del pavimento para que la mezcla trabaje de la manera óptima.

Referencias bibliográficas

- [1] M. Millones-Chapo, S. P. Muñoz-Pamoz, and C. D. Villanueva-Meza, "La Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar como Aditivo Estabilizador en Suelos Arcillosos con Fines de Pavimentación: Una Revisión Literaria," *Ingeniería y competitividad*, vol. 25, 2023, [Online]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-30332023000100023&nrm=iso
- [2] J. Fernández Chávez, "Influencia del cemento en la resistencia del suelo de la subrasante de la Calle Isaac Newton, Jaén," Cajamarca, Perú, 2022. [Online]. Available: <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/6580>
- [3] L. Hmar, F. Lalbiakmawia, and R. Ramhmachhuani, *Hydrogeological Effects on Premature Failure of Flexible Pavement in Hilly Area Along State Highway-I in Mizoram, India*, vol. 53. 2022. doi: 10.1007/s40098-022-00651-x.
- [4] A. Al-Taie, E. Yaghoubi, P. L. P. Wasantha, R. Van Staden, M. Guerrieri, and S. Fragomeni, "Mechanical and physical properties and cyclic swell-shrink behaviour of expansive clay improved by recycled glass," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 24, no. 1, p. 2204436, Dec. 2023, doi: 10.1080/10298436.2023.2204436.
- [5] S. H. Carpenter, *Soil and Base Stabilization and Associated Drainage*. Washington, D.C.: Federal Highway Administration (FHWA), 1992.
- [6] J. K. Talledo Saavedra and J. A. Sánchez Díaz, "Mejoramiento de los suelos arcillosos en subrasante mediante el uso de fibras de caucho reciclado en las vías de la Habilitación Urbana Cholo Lindo, Reque, Chiclayo," Lambayeque, Perú, 2023. [Online]. Available: <https://repositorio.unprg.edu.pe/>
- [7] P. Fernandez Montes, "Influencia del plástico PET reciclado en la estabilización de suelos arcillosos del distrito La Encantada, provincia de Morropón – Piura," Piura, Perú, 2022. [Online]. Available: <https://repositorio.uap.edu.pe/>
- [8] B. H. Barboza, "Estudio exploratorio de estabilización de una subrasante de suelo arcilloso con cal viva (ejemplo en Iquitos)," Iquitos, Perú, 2021. [Online]. Available: <https://repositorio.ucp.edu.pe/>
- [9] G. Vásquez Silva, "Mejoramiento de subrasante arcillosa incorporando ceniza de gallinaza con adición de cemento Portland tipo I en Urbanización La Primavera en Chiclayo," Chiclayo, Perú, 2023. [Online]. Available: https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/USAT_db88720e4393e6a583427c9fdec85200
- [10] F. J. García, "Evaluación técnica de estabilización de subrasantes arcillosas: fundamentos y aplicaciones," Lima, Perú, 2021. [Online]. Available: <https://placeholder.universidad/referencia/garcia2021>
- [11] L. M. Ramírez, "Impacto social de la mejora de vías rurales en comunidades andinas: un estudio de caso," Lima, Perú, 2020. [Online]. Available: <https://placeholder.universidad/referencia/ramirez2020>
- [12] A. ; V. Torres C., "Gestión y reincorporación de residuos plásticos en obras civiles: tendencias y retos," *Revista de Ingeniería Ambiental (Placeholder)*, 2022, [Online]. Available: <https://placeholder.journal/referencia/torres2022>

- [13] M. E. López, “Análisis costo-beneficio de técnicas de estabilización de subrasantes en zonas rurales,” Instituto de Investigación en Economía y Desarrollo (Placeholder), Lima, Perú, 2019. [Online]. Available: <https://placeholder.informe/referencia/lopez2019>
- [14] S. Amena, “Utilizing solid plastic wastes in subgrade pavement layers to reduce plastic environmental pollution,” *Clean Eng Technol*, vol. 7, p. 100438, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100438>.
- [15] “Behavior of Flexible Pavements by the Addition of Plastic Waste,” *International Journal of Innovative Research in Engineering & Management*, vol. 9, no. 4, pp. 132–134, Aug. 2022, [Online]. Available: <https://acspublisher.com/journals/index.php/ijirem/article/view/10871>
- [16] M. Abukhettala and M. Fall, “Geotechnical characterization of plastic waste materials in pavement subgrade applications,” *Transportation Geotechnics*, vol. 27, p. 100472, 2021.
- [17] M. M. Khazaal and Q. S. M. Shafiqu, “Enhancement of Gypseous Soil Engineering Properties Through High-Density Polyethylene Polymer Addition: A Comprehensive Experimental Assessment,” *Environmental & Earth Sciences Research Journal*, vol. 10, no. 3, 2023.
- [18] A. K. Banerji, Md. H. Alam, C. Das, and S. Roy, “Effect of Adding Waste High-Density Polyethylene Flakes on the Subgrade Soil Behavior and Characterization for Pavement Applications,” in *Recent Developments in Structural Engineering, Volume I*, M. D. Goel, R. Kumar, and S. S. Gadve, Eds., Singapore: Springer Nature Singapore, 2024, pp. 361–369.
- [19] M. J. Cano Nieto and Y. S. Olmedo Lara, “Experimental study of high plasticity clays reinforced with mixtures of plastic waste and lime in flexible pavement subgrades,” 2024.
- [20] A. P. Trujillo Vidal and R. E. Palomino Miranda, “Mejoramiento de las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso a nivel de subrasante mediante el uso de PET chancado y triturado en la carretera Yurimaguas-Munichis, Loreto,” 2024.
- [21] J. W. Cueva Vilchez and L. A. Alvarez Vizarreta, “Propuesta para la estabilización de la subrasante en suelos arcillosos con el uso de plástico molido reciclado para carreteras en la zona de Lurín-Lima,” 2024.
- [22] A. P. Castro Alvarez and T. J. Cruzado Carranza, “Influencia de la adición de fibras de polímeros reciclados en la capacidad de soporte de la subrasante, para el diseño del pavimento flexible, Alto Trujillo-barrio I, 2021,” 2021.
- [23] J. P. Guevara Idrogo, “Utilización de bolsas de polietileno para el mejoramiento de suelo a nivel de la subrasante en el Caserío de Santa Bárbara, distrito de Los Baños del Inca, Cajamarca 2022,” 2024.
- [24] K. Y. P. F. CELI, “Estabilización de suelos granulares de subrasante con finos de tereftalato de polietileno (PET), polipropileno (PP) y polietileno (PE),” 2023.
- [25] F. E. Turpo Huanca, “Efectos del tereftalato de polietileno reciclado en las propiedades de suelos finos para su uso en subrasantes,” 2023.
- [26] C. y S. Ministerio de Vivienda, “Norma Técnica E.050: Suelos y Cimentaciones,” Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018. [Online]. Available: https://cdn-web.construccion.org/normas/rne2012/rne2006/files/titulo3/02_E/2018_E050_RM-406-2018-VIVIENDA.pdf
- [27] M. COMUNICACIONES, “SUELOS GEOLOGIA, GEOTECNIA Y PAVIMENTOS SECCION SUELOS Y PAVIMENTOS RD N 10-2014-MTC/14,” *de MANUAL DE CARRETERAS, LIMA*, p. 11, 2014.

- [28] I. N. de C. (INACAL), “NTP 339.134:1999 - Suelos. Método para la clasificación de suelos con fines de ingeniería (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos - SUCS),” Instituto Nacional de Calidad (INACAL), 1999. [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/534515932/416-NTP-370-001>
- [29] M. de T. y C. del Perú, “Manual de Ensayo de Materiales,” Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, 2016. [Online]. Available: https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf
- [30] C. de la R. del Perú, “Ley General del Ambiente – Ley N.º 28611,” Congreso de la República del Perú, 2005. [Online]. Available: <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/27932-ley-n-28611-ley-general-del-ambiente>
- [31] C. Crespo Villalaz, “Mecánica de suelos y cimentaciones,” 2004.
- [32] E. Juárez Badillo and A. Rico Rodríguez, “Mecánica de suelos fundamentos de la mecánica de suelos,” 2005.
- [33] M. E. Briones Alva and N. U. Irigoien Gonzales, “Zonificación mediante el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) y la capacidad portante del suelo, para viviendas unifamiliares en la expansión urbana del anexo Lucmacucho Alto-sector Lucmacucho, distrito de Cajamarca,” 2015.
- [34] R. Jara Anyappoma, “Efecto de la cal como estabilizante de una subrasante de suelo arcilloso,” 2014.
- [35] A. A. C. Macías, J. P. M. Alcívar, and E. T. Piusseaut, “Mejoramiento de subrasante mediante la estabilización con cemento en obras viales del cantón Portoviejo,” *Dominio de las Ciencias*, vol. 9, no. Esp, 2023.
- [36] J. Nadal, “El suelo estabilizado, material de construcción,” *Informes de la Construcción*, vol. 14, no. 136, pp. 77–84, 1961.
- [37] D. C. Flores Ortega and H. P. Zea Arias, “Plástico reciclado en la estabilización de suelos cohesivos para mejorar la subrasante de una vía multicarril, Juliaca 2021,” 2021.
- [38] A. Montejó Fonseca, “Ingeniería de pavimentos. Universidad Católica de Colombia Bogotá,” 2006.
- [39] P. A. Rodríguez-Bruceta, Á. T. Pérez-Rodríguez, and J. C. Velázquez-Infante, “Propuesta de un procedimiento para el reciclado del polietileno de alta densidad,” *Revista cubana de química*, vol. 27, no. 1, pp. 32–54, 2015.
- [40] D. Garraín Cordero, R. Vidal, V. Franco García, and P. Martínez Sebastiá, “Análisis del ciclo de vida del reciclado del polietileno de alta densidad,” 2008.
- [41] G. E. Gómez Uribe and J. A. Zabala Mendez, “Láminas de Polietileno de Alta Densidad Reciclado,” 2023.
- [42] P. A. Rodríguez-Bruceta, Á. T. Pérez-Rodríguez, and J. C. Velázquez-Infante, “Propuesta de un procedimiento para el reciclado del polietileno de alta densidad,” *Revista cubana de química*, vol. 27, no. 1, pp. 32–54, 2015.
- [43] F. Montero-Vega, C. Molina, B. Pillco, L. Sarduy Pereira, and K. Diéguez-Santana, “Evaluación del impacto ambiental de la construcción de una planta de tratamiento de aguas

- residuales. Caso río Pindo Chico, Puyo, Pastaza, Ecuador,” *Ciencia, Ambiente y Clima*, vol. 3, pp. 23–39, Jul. 2020, doi: 10.22206/cac.2020.v3i1.pp23-39.
- [44] J. L. Sanchez Manrique and G. Campos Cisneros, “Evaluación de impacto ambiental utilizando el método de la matriz Leopold, debido a las obras de prevención de daños por desbordes e inundaciones que se realizarán en el distrito de Ancón km 51 Panamericana Norte,” 2023, *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)*. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10757/670488>
- [45] J. Smith and M. García, “Evaluación de Impacto Ambiental en Proyectos de Construcción,” *Journal of Environmental Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 45–56, 2023, doi: 10.1016/j.jenveng.2023.03.002.
- [46] D. Martínez and L. Vega, “Evaluación de Impacto Ambiental Utilizando el Método de Leopold,” *Journal of Civil and Environmental Engineering*, vol. 10, no. 4, pp. 210–223, 2023, doi: 10.1016/j.jcenveg.2023.08.009.
- [47] C. López and A. Torres, “Aplicación de la Matriz de Leopold en la Evaluación Ambiental,” *Environ Impact Assess Rev*, vol. 48, no. 2, pp. 123–135, 2022, doi: 10.1016/j.eiar.2022.05.007.
- [48] C. P. Del Perú, “Constitución política del Perú,” *Lima, Perú*, 1993.
- [49] C. B. Ibarburo, “Ley del Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental,” *Lumen*, vol. 2, no. 1, pp. 45–50, 2001.
- [50] E. L. Valentin Leon, “Ejecución de obras públicas y el desarrollo sostenible según ley n° 27446 en el gobierno regional de Pasco, 2020,” 2021.
- [51] L. G. de Salud, “LEY N° 26842,” *Diario Oficial El Peruano (20 de julio de 1997)*, 2006.
- [52] J. Hardy, “LEY ORGÁNICA DE GOBIERNOS REGIONALES, LEY N° 27867”.
- [53] J. D. Nelson and D. J. Miller, *Expansive Soils: Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering*, no. 9780471511861. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1992.
- [54] T. Tabassum and T. V Bheemasetti, “Investigative studies on recycled high-density polyethylene and polypropylene pellets for stabilization of soils rich in kaolinite,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2022, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004318.
- [55] A. B. Haider, A. Iravanian, M. H. Selman, and A. Ekinici, “Using Waste PET Shreds for Soil Stabilization: Efficiency and Durability Assessment,” *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, vol. 9, no. 4, p. 48, 2023, doi: 10.1007/s40891-023-00473-8.
- [56] M. Attom *et al.*, “Soil Improvement Using Plastic Waste–Cement Mixture to Control Swelling and Compressibility of Clay Soils,” *Buildings*, vol. 15, no. 8, 2025, doi: 10.3390/buildings15081387.
- [57] E. Quispe Serrano and M. Sañac Vilca, “Influencia de la incorporación de plástico reciclado triturado–PET en el mejoramiento del suelo a nivel de sub rasante en la prolongación de la Av. Micaela Bastidas, Tamburco-Abancay, 2018,” 2019.

Anexos**CONFORMIDAD DEL ASESOR****CONFORMIDAD DE ASESOR DE PROYECTO DE TESIS**

Chiclayo, 30 de octubre del 2025.

Señores

**DOCENTE DE LA ASIGNATURA DE TRABAJO DE INVESTIACIÓN
DOCENTE COORDINADOR DE TESIS
Escuela Profesional de Ingeniería Civil Ambiental-USAT**

Presente.

Le expreso mi saludo y en mi condición de asesor doy mi **CONFORMIDAD** al trabajo de investigación titulado: **“OPTIMIZACIÓN DE LA SUBRASANTE MEDIANTE LA INCORPORACIÓN DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD EN LA RUTA GRANJA SASAPE, TÚCUME”** presentado por el estudiante **CHAPOÑAN VIDAURRE, RICHARD JOEL** de la Escuela Profesional de **Ingeniería Civil**, de esta manera se cumple con uno de los requisitos para su pase a sustentación del proyecto de acuerdo al art.15 de reglamento de elaboración y sustentación de la tesis para optar el título profesional.

Atentamente.



Ing. López Carranza, Atilio
Docente Asesor

VALIDACIÓN DE ENSAYOS DE LABORATORIO USAT

Link del drive de ensayos de laboratorio firmados por el responsable de laboratorio:

https://drive.google.com/drive/folders/1CkSt3Fv8kLc9G8tBu8QYMutLA0MFjWv7?usp=drive_link



UNIVERSIDAD CATOLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

- LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES, SUELOS Y PAVIENTOS
- CONCRETO Y ASFALTO

INFORME N°	LEM USAT 028-2025-II
FECHA:	30 de Octubre 2025

VALIDACIÓN DE ENSAYOS DE LABORATORIO

ESTUDIANTE: Chapoñan Vidaurre, Richard Joel

TITULO DE LA TESIS: Optimización de la subrasante mediante la incorporación de polietileno de alta densidad en la ruta Granja Sasape, Túcume

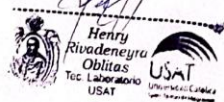
El que suscribe, responsable del laboratorio de Ingeniería Civil, verifica y da conformidad que los siguientes ensayos de laboratorio realizados por el indicado estudiante se han efectuado en las instalaciones de la USAT, asimismo valida los ensayos realizados fuera de nuestras instalaciones siempre que no se puedan realizar en esta universidad:

- Contenido de humedad
- Análisis granulométrico
- Ensayo de Límites de Atterberg
- Ensayo de Proctor modificado
- Ensayo de CBR

Se alcanza al interesado para los fines pertinentes.

Observación: Adjunto

Henry Rivadeneyra Oblitas
Responsable de Lab Ing. Civil



TÉCNICO DE LABORATORIO

Permiso para la realización de calicatas



MUNICIPALIDAD DISTRITAL DE
TÚCUME



GERENCIA DE DESARROLLO
TERRITORIAL E INFRAESTRUCTURA

"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

**EL GERENTE DE DESARROLLO TERRITORIAL E INFRAESTRUCTURA DE LA
MUNICIPALIDAD DISTRITAL DE TUCUME**

OTORGA:

AUTORIZACION

Mediante la presente, se **AUTORIZA** al Estudiante de la carrera profesional Ingeniería Civil de la Universidad Santo Toribio de Mogrovejo- Richard Joel Chapoñan Vidaurre identificado con DNI N° 75679536, la **toma de muestra de terreno de 4 calicatas en la carretera Granja Sasape – Los Bances** del Distrito de Tucume.

Atentamente,

Túcume, 27 de Marzo del 2025



MUNICIPALIDAD DISTRITAL DE TUCUME
Ing. Carlota C. Santamaría Mondragon
GERENTE DE DESARROLLO TERRITORIAL E INFRAESTRUCTURA (R)
C.I.P. 60003



Figura 47: Ensayo de contenido de humedad



Figura 48: Ensayo de Limite de Atterberg de muestra patrón



Figura 49: Limite de atterberg de muestra patrón

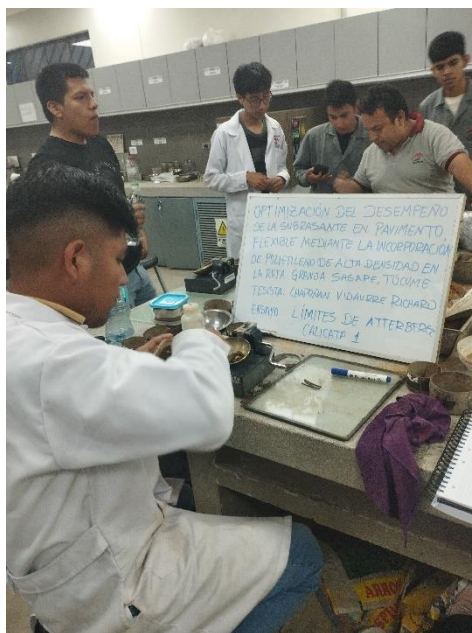


Figura 50: Ensayo de Proctor modificado de muestra patrón



Figura 51: Ensayo de proctor modificado

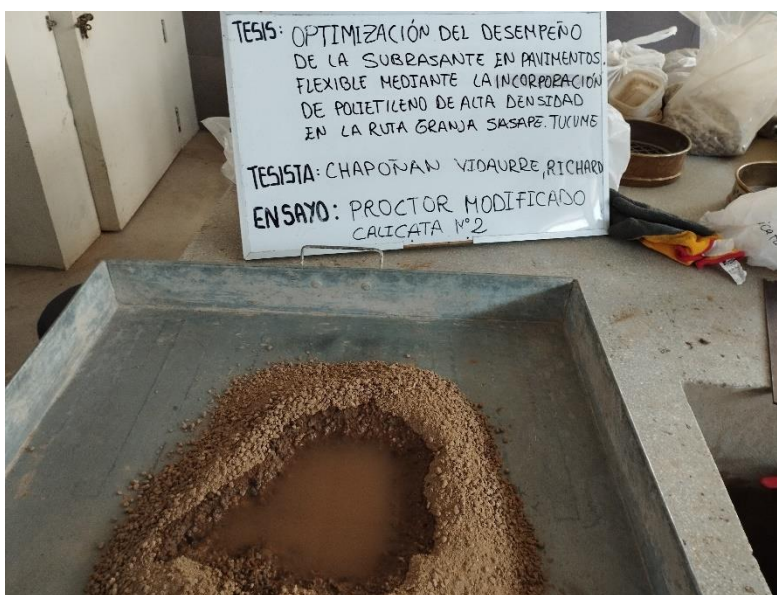


Figura 52: Ensayo de CBR – Muestra patrón



Figura 53: Ensayo de CBR – Muestra patrón



Figura 54: Ensayo de CBR – Muestra patrón



Figura 55: Ensayo de CBR – Muestra patrón



Figura 56: Ensayo de CBR – Muestra patrón



Figura 59: Ensayo de Limite de atterberg – Muestra patrón + HDPE

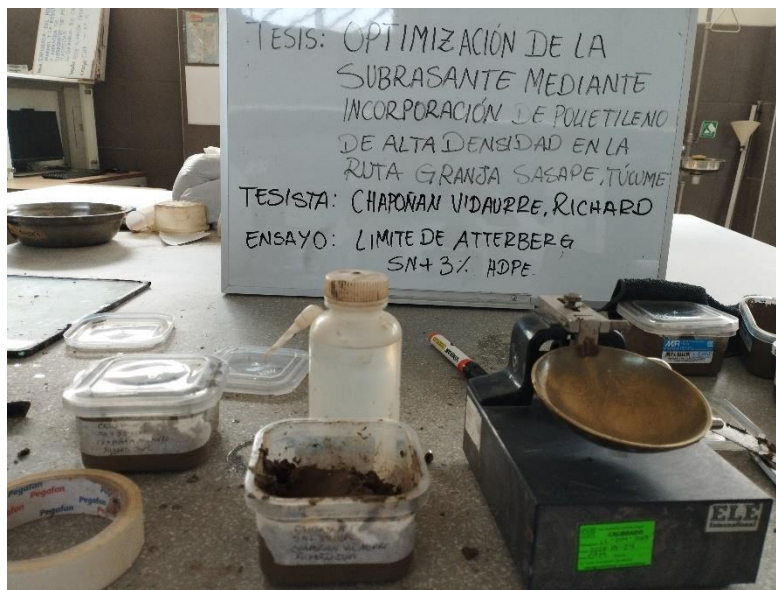


Figura 60: Ensayo de Límite de atterberg – Muestra patrón + HDPE



Figura 61: Proctor + HDPE



Figura 62: Proctor + HDPE



Figura 63: CBR + HDPE



Figura 64: CBR + HDPE



Figura 65: Maquina trituradora



Figura 66: Maquina trituradora

