



**UNIVERSIDAD RICARDO PALMA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

Economía circular del lodo bentonítico con cal de excavaciones, para el mejoramiento de subrasante, caso Línea 2 del Metro de Lima

**TESIS**

Para optar el título profesional de Ingeniero(a) Civil

**AUTORES**

Manrique Loayza, Franco Stéfano  
ORCID: 0000-0002-4945-7840

Solis Beltran, Lourdes Stephanie  
ORCID: 0000-0001-7827-6486

**ASESOR**

Sueldo Mesones, Jaime Pío  
ORCID: 0000-0003-3760-8370

**Lima, Perú**

**2022**

## **Metadatos Complementarios**

### **Datos del autor(es)**

Manrique Loayza, Franco Stéfano

DNI: 48159507

Solis Beltran, Lourdes Stephanie

DNI: 46349339

### **Datos de asesor**

Sueldo Mesones, Jaime Pío

DNI: 43703437

### **Datos del jurado**

JURADO 1

Fano Miranda, Gonzalo Ramcés

DNI: 09178719

ORCID: 0000-0002-4401-8654

JURADO 2

Estrada Mendoza, Miguel Luis

DNI: 10493289

ORCID: 0000-0002-8646-3852

JURADO 3

Donayre Córdova, Oscar Eduardo

DNI: 06162939

ORCID: 0000-0002-4778-3789

### **Datos de la investigación**

Campo del conocimiento OCDE: 2.01.01

Código del Programa: 732016

## **DEDICATORIA**

Esta tesis está dedica a mis padres, mi abuela Teresa, hermanos, pareja y mi hija Belén quienes me brindaron, su apoyo, paciencia, y dedicación durante este último año.

(Manrique Loayza, Franco Stéfano)

Esta tesis está dedicada a todos mis seres amados; quienes, en conjunto, han sido el soporte perfecto para nunca decaer y siempre mantenerme firme en cada etapa del proceso del desarrollo de esta tesis.

(Solis Beltrán, Lourdes Stephanie)

## **AGRADECIMIENTO**

Nuestro sincero agradecimiento a nuestra alma mater, por habernos brindado los conocimientos de esta maravillosa carrera; y a todas personas que de alguna manera nos apoyaron en el desarrollo de la tesis, entre ellos docentes y familiares.

Manrique Loayza, Franco Stéfano

Solis Beltran, Lourdes Stephanie

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	i
ABSTRACT.....	ii
INTRODUCCIÓN.....	iii
<b>CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>1</b>
1.1 Formulación y delimitación del problema.....	11
1.1.1 Problema general.....	11
1.1.2 Problemas específicos.....	11
1.2 Objetivo general y específico.....	11
1.2.1 Objetivo general.....	11
1.2.2 Objetivos específicos.....	11
1.3 Delimitaciones de la investigación.....	12
1.3.1 Delimitación temporal.....	12
1.3.2 Delimitación espacial.....	12
1.4 Justificación e importancia.....	13
1.4.1 Justificación.....	13
1.4.2 Importancia.....	15
<b>CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>16</b>
2.1 Antecedentes del estudio de investigación.....	16
2.1.1 Antecedentes nacionales.....	16
2.1.2 Antecedentes internacionales.....	18
2.1 Bases teóricas vinculadas a la variable o variable de estudio.....	20
2.1.1 Mejoramiento de subrasante.....	20
2.1.2 Economía circular del lodo bentonítico mezclado con cal.....	36
2.1.3 Definición de términos básicos.....	47
<b>CAPÍTULO III: SISTEMA HIPÓTESIS.....</b>	<b>49</b>
3.1 Hipótesis.....	49
3.1.1 Hipótesis principal.....	49
3.1.2 Hipótesis secundarias.....	49
3.2 Variables.....	49
3.2.1 Definición conceptual de las variables.....	49

3.2.2 Operacionalización de las Variables.....	53
<b>CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>55</b>
4.1 Tipo y nivel.....	55
4.1.1 Tipo de investigación.....	55
4.1.2 Nivel de investigación.....	55
4.2 Diseño de investigación.....	55
4.2.1 Tipo de diseño de investigación.....	55
4.2.2 Enfoque de investigación.....	56
4.2.3 Método de investigación.....	56
4.2.4 Población y muestra.....	57
4.3 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	57
4.3.1 Tipos de técnicas e instrumentos.....	58
4.3.2 Criterios de validez y confiabilidad de los instrumentos.....	58
4.3.3 Procedimientos para la recolección de datos.....	58
4.4 Técnicas para el procesamiento y análisis de la información.....	59
<b>CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>60</b>
5.1 Diagnóstico y situación actual: Línea 2 del Metro de Lima.....	60
5.1.1 Ubicación del proyecto.....	60
5.1.2 Proceso constructivo.....	65
5.1.3 Excavación con cuchara.....	76
5.1.4 Ensayos de laboratorio.....	81
5.2 Resultados de laboratorio.....	104
5.3 Cuadro resumen de resultados.....	119
5.4 Comparación de Resultados.....	119
5.4.1 Análisis e Interpretación de los Resultados.....	119
5.4.2 Contrastación de Hipótesis.....	120
5.4.3 Discusión.....	121
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>122</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y ANEXOS.....</b>	<b>124</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Rellenos sanitarios autorizados en Lima .....	5
Tabla 2. Clasificación de subrasante.....	21
Tabla 3. Tamices a utilizar para ensayo granulométrico .....	31
Tabla 4. Distribución de tamaños de apertura por tamices.....	32
Tabla 5. Comparativa de cal viva y cal apagada.....	43
Tabla 6. Variable independiente .....	50
Tabla 7. Variable dependiente .....	52
Tabla 8. Matriz de operacionalización de variables .....	54
Tabla 9. Trazo del proyecto .....	61
Tabla 10. Ubicación de estaciones.....	62
Tabla 11. Ubicación de estaciones.....	63
Tabla 12. Tabla de clasificación de gravas y arenas.....	92
Tabla 13. Cuadro resumen de condiciones para la clasificación de arenas y gravas.....	94

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1. Generación de residuos por persona .....	2
Figura N° 2. Residuos de la construcción en abandono .....	3
Figura N° 3. Recojo de residuos de la construcción .....	3
Figura N° 4. Botadero ilegal Coishco, Ancash .....	4
Figura N° 5. Mapa de rellenos sanitarios autorizados en el Perú .....	6
Figura N° 6. Impacto ambiental producido por el vertido de lodos .....	8
Figura N° 7. Invasión de lodo de perforación en zonas costeras de Atastecas .....	9
Figura N° 8. Inadecuado tratamiento de lodos de perforación .....	9
Figura N° 9. Fallas de depresión en pavimentos .....	10
Figura N° 10. Recorrido de la Línea 2 del Metro de Lima .....	12
Figura N° 11. Ubicación estaciones, tramo Línea 2 .....	13
Figura N° 12. Estabilización de suelos por combinación .....	22
Figura N° 13. Proceso de aireación de suelos landfarnig .....	22
Figura N° 14. Sustitución de suelos .....	23
Figura N° 15. Material de sustitución proveniente de un banco .....	23
Figura N° 16. Sustitución de suelos en Nicaragua .....	24
Figura N° 17. Suelo de arcilla floculada con cal .....	25
Figura N° 18. Aplicación de lechada de cal .....	25
Figura N° 19. Mejoramiento de caminos naturales con sistema con cal .....	26
Figura N° 20. Estabilización de suelos con cemento .....	27
Figura N° 21. Estabilización con cemento .....	27
Figura N° 22. Compactación de terreno con rodillo vibrador calle Atahualpa .....	28
Figura N° 23. Compactación de terreno con canguro compactador .....	28
Figura N° 24. Mejoramiento de suelos con geotextil .....	29
Figura N° 25. Juego de tamices .....	30
Figura N° 26. Ejemplo curva granulométrica .....	31
Figura N° 27. Características cualitativas de un suelo en función de su estado .....	32
Figura N° 28. Aparato manual para limite líquido .....	33
Figura N° 29. Muestras del suelo antes y después de la prueba .....	33
Figura N° 30. Ensayo de límite plástico .....	34
Figura N° 31. Compactación del espécimen para el ensayo de proctor modificado .....	35



Figura N° 32. Ensayo CBR adaptada del manual de ensayos de materiales .....	36
Figura N° 33. Clasificación general de lodos de perforación .....	36
Figura N° 34. Clasificación de los lodos de perforación de base acuosa .....	37
Figura N° 35. Acontecimientos en la evolución de la economía circular.....	44
Figura N° 36. Esquema de experimento y variables.....	55
Figura N° 37. Línea 2 del Metro de Lima.....	57
Figura N° 38. Distritos a intervenir por ejecución de obras .....	60
Figura N° 39. Ubicación de estaciones .....	64
Figura N° 40. Plan de desvío vehicular .....	64
Figura N° 41. Zona de intervención estación E-06 Oscar R. Benavides .....	65
Figura N° 42. Línea 2 del metro de Lima .....	66
Figura N° 43. Perforación de muros pantallas .....	67
Figura N° 44. Perforación de muros pantalla con lodo bentonítico.....	67
Figura N° 45. Perforaciones de muros pantalla .....	68
Figura N° 46. Armado de muro pantalla.....	68
Figura N° 47. Vaciado de concreto muro pantalla.....	69
Figura N° 48. Losa de vestíbulo y viga prefabricada .....	69
Figura N° 49. Losa de compresión .....	70
Figura N° 50. Losa vestíbulo y losa andén .....	70
Figura N° 51. Estación de metro de Lima línea 2.....	71
Figura N° 52. Tuneladora en losa del andén.....	72
Figura N° 53. Tuneladora Micaela para perforaciones húmedas.....	72
Figura N° 54. Faja transportadora inferior.....	73
Figura N° 55. Faja transportadora superficial.....	73
Figura N° 56. Armado de tuneladora.....	73
Figura N° 57. Planta de dovelas de concreto .....	74
Figura N° 58. Armado de dovelas de concreto .....	74
Figura N° 59. Dovelas de concreto prefabricadas .....	75
Figura N° 60. Tuneladora instalando dovelas de concreto .....	75
Figura N° 61. Instalación de dovelas de concreto .....	75
Figura N° 62. Excavación con cuchara.....	77
Figura N° 63. Planta típica de lodos .....	78
Figura N° 64. Planta de lodos de la línea 2 del Metro de Lima.....	78
Figura N° 65. Proceso de desarenado de lodo bentonítico .....	79

Figura N° 66. Parámetros de aceptación de lodos bentoníticos.....	80
Figura N° 67. Planta Birrak en Ventanilla.....	80
Figura N° 68. Proceso de Birrak.....	81
Figura N° 69. Ubicación planta Birrak.....	81
Figura N° 70. Proceso de tamizado.....	82
Figura N° 71. Suelo retenido en malla.....	83
Figura N° 72. Dos muestras para secado en horno.....	85
Figura N° 73. Ensayo de límite líquido.....	87
Figura N° 74. Muestra en copa casagrande.....	87
Figura N° 75. Golpes en la copa casagrande.....	88
Figura N° 76. Distribución de la muestra en recipiente.....	89
Figura N° 77. Diagrama de fluidez.....	90
Figura N° 78. Carta de plasticidad para suelo de partícula gruesa.....	94
Figura N° 79. Carta de plasticidad para suelos de partícula fina.....	96
Figura N° 80. Clasificación de suelos método AASHTO (material granular).....	96
Figura N° 81. Clasificación de suelos método AASHTO (material limo-arcilloso).....	97
Figura N° 82. Muestra de suelo de Lurín para ensayo de proctor modificado.....	97
Figura N° 83. Cuatro ensayos de proctor modificado de suelo de Lurín.....	98
Figura N° 84. Modelo grafico proctor modificado.....	99
Figura N° 85. Compactación de ensayo de CBR suelo de Lurín.....	100
Figura N° 86. Compactación CBR suelo de Lurín.....	100
Figura N° 87. Peso del suelo de Lurín con molde de CBR.....	101
Figura N° 88. Moldes con suelo de Lurín para 56, 25 y 12 golpes antes de saturar ....	101
Figura N° 89. Moldes con suelo de Lurín para 56,25 y 12 golpes en saturación.....	102
Figura N° 90. Retiro de molde con suelo de Lurín saturado.....	102
Figura N° 91. Molde con suelo de Lurín en ensayo de CBR.....	103
Figura N° 92. Ensayo CBR suelo de Lurín con 4% cal y 5% bentonita.....	103
Figura N° 93. Ensayo CBR suelo de Lurín con 4% cal.....	104
Figura N° 94. Resultado porcentaje de humedad suelo Lurín.....	104
Figura N° 95. Lavado de muestra y % de error granulometría por tamizado.....	105
Figura N° 96. Resultados porcentaje que pasa por tamices granulometría.....	105
Figura N° 97. Curva granulométrica suelo inestable.....	105
Figura N° 98. Coeficiente de uniformidad (Cu) y coeficiente de curvatura (Cc).....	106
Figura N° 99. Cuadro de cálculo de límite líquido.....	106

Figura N° 100. Diagrama de fluidez de suelo inestable .....	106
Figura N° 101. Cuadro de cálculo de limite plástico.....	107
Figura N° 102. Porcentaje retenido acumulado tamiz N° 200.....	107
Figura N° 103. Resultado carta de plasticidad en suelo de Lurín.....	108
Figura N° 104. Porcentaje que pasa por tamiz N° 200 .....	108
Figura N° 105. Clasificación AASHTO para finos .....	109
Figura N° 106. Resultados de laboratorio proctor modificado suelo de Lurín.....	110
Figura N° 107. Resultado de laboratorio CBR suelo de Lurín .....	111
Figura N° 108. Resultados de laboratorio gráficos CBR suelo de Lurín.....	112
Figura N° 109. Resultados de proctor suelo de Lurín + 4% cal + 5% lodo bentonítico .....	113
Figura N° 110. Resultado de laboratorio CBR suelo Lurín + 4% cal + 5% lodo bentonítico .....	114
Figura N° 111. Resultados gráfico CBR suelo Lurín + 4% cal + 5% lodo bentonítico	115
Figura N° 112. Resultados de laboratorio proctor suelo de Lurín + 4% cal.....	116
Figura N° 113. Resultado de laboratorio CBR suelo de Lurín + 4% cal.....	117
Figura N° 114. Resultados gráficos CBR suelo Lurín + 4% cal .....	118

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo aplicar la economía circular del Lodo bentonítico mezclado con cal para el mejoramiento de la subrasante en carreteras. El objetivo se logró realizando ensayos de laboratorio de suelo y de esa manera determinar el aumento de la resistencia para el mejoramiento de la subrasante en carreteras, a la muestra del lodo bentonítico proveniente de las excavaciones con cuchara, de las pantallas para la construcción de la línea 2 del metro de lima, mezclándolo con cal y suelo de Lurín, posteriormente se analizaron los resultados obtenidos para evaluar la viabilidad de la economía circular del lodo bentonítico, en el mejoramiento de las subrasantes.

Se describen todas las propiedades que presenta el suelo tomado del distrito de Lurín mezclado con cal y lodo bentonítico.

El ensayo que demostró la viabilidad de nuestro proyecto indico que el CBR del suelo de Lurín mejoro de 9.8% a 42.60% al ser mezclado con 4% de cal y 5% de Lodo bentonítico.

Finalmente se demuestra el mejoramiento de la resistencia del suelo cuando se mezcla con cal y lodo bentonítico, concluyendo que las hipótesis planteadas son afirmativas y la economía circular del lodo bentonítico es aplicable para el mejoramiento de la subrasante en carreteras.

**Palabras clave:** Economía circular, excavación, lodo bentonítico, CBR y subrasante.

## ABSTRACT

The present research aimed to apply the circular economy of bentonite sludge mixed with lime for the improvement of the subgrade on roads.

The objective was achieved by carrying out laboratory tests of soil and thus determine the increase of the bearing capacity for the improvement of the subgrade in roads, to the sample of bentonite sludge from the excavations with spoon, from the screens for the construction of line 2 of the Lima metro, mixing it with lime and soil from Lurín, Subsequently, the results obtained to evaluate the viability of the circular economy of bentonite sludge in the improvement of subgrades were analyzed.

All the properties of the soil taken from the district of Lurín mixed with lime and bentonite mud are described.

The test that demonstrated the viability of our project indicated that the bearing capacity of the Lurín soil improved from 9.8% to 42.60% when mixed with 4% cal and 5% bentonite sludge.

Finally, the improvement of soil resistance when mixed with lime and bentonite sludge is demonstrated, concluding that the hypotheses raised are affirmative and the circular economy of bentonite sludge is applicable for the improvement of the subgrade in roads.

**Keywords:** Circular economy, excavation, bentonite mud, bearing and subgrade capacity.

# INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la contaminación generada por residuos de la construcción de infraestructuras, genera un impacto en el medio ambiente en el que habitamos, debido a que no existe aún en su totalidad botaderos formales y no contamos con una gestión adecuada o necesaria para poder darle tratamiento a dichos residuos. La importancia de la investigación está en la economía circular del lodo bentónico mezclado con cal para el mejoramiento de subrasantes en carreteras, ya que, la información resultante de esta investigación, dará resultados que confirman que el residuo del lodo bentónico, usado en las perforaciones puede ser reutilizado y de esta manera mitigamos la contaminación del medio ambiente ya que muchas veces su paradero final son botaderos informales. De esta manera, la presente investigación se enfoca en demostrar la viabilidad de la economía circular del lodo bentónico mezclado con cal para el mejoramiento de subrasantes. El objetivo será alcanzado mediante ensayos de mecánica de suelos realizados a un suelo de Lurín mezclado con cal y lodo bentónico.

El primer capítulo describe el planteamiento del problema donde definimos la realidad problemática y se plantean los objetivos. El segundo capítulo, marco teórico, consiste en describir los antecedentes de la investigación, de esa forma obtener mayor información sobre la economía circular del lodo bentónico para el mejoramiento de la subrasante. En el tercer capítulo, planteamos las hipótesis, la principal y las secundarias, también definimos conceptualmente las variables y la Operalización de las variables.

En el cuarto capítulo se describe la metodología aplicada, materiales e instrumentos a utilizar para la realización de la investigación. Se determina el tipo, nivel, diseño, enfoque y método de la investigación junto con el caso de estudio.

En el quinto capítulo se describen todos los ensayos de mecánica de suelos realizados y se analizan los resultados obtenidos.

Finalmente, se les da respuesta a los objetivos e hipótesis planteadas al inicio de la investigación.

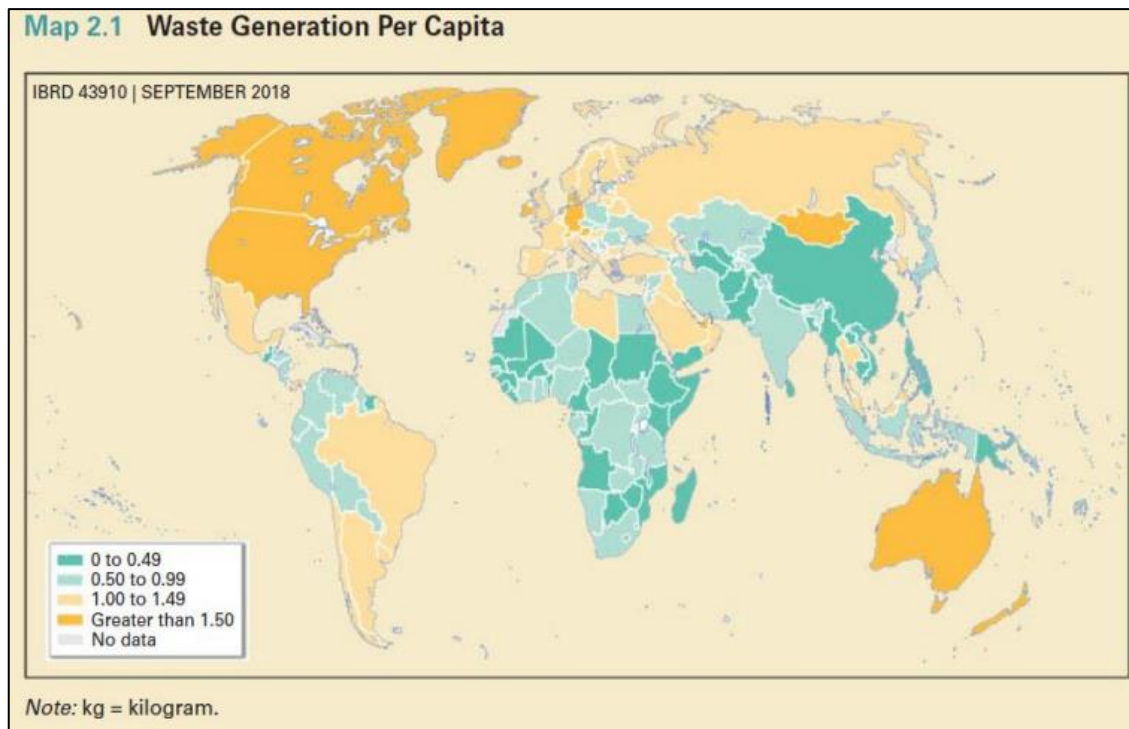
## **CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La contaminación en el mundo está llegando a niveles nunca antes vistos y esto se está visualizando en un futuro al 2050 donde se estima que los desechos a nivel mundial crecerán un 70% con respecto a los niveles actuales (Banco Mundial, 2018).

Los países de ingresos altos recuperan más de un tercio mediante el reciclado, los países de ingresos bajos solo recuperan un 4% de los desechos, se estima que el tratamiento y la gestión de los residuos sólidos en el 2016 generaban 1600 millones de toneladas de dióxido de carbono que representan un aproximado del 5% de las emisiones en todo el mundo (Banco Mundial, 2018).

Según (Tuck, 2018) “La mala gestión de los desechos está perjudicando la salud humana y los entornos locales, agravando al mismo tiempo los desafíos que plantea el cambio climático”, “Desafortunadamente, los más pobres de la sociedad suelen ser los más perjudicados por la mala gestión de los desechos. Pero las cosas no tienen por qué ser así. Los recursos que tenemos deben usarse y reutilizarse continuamente, de manera que no terminen en los vertederos”.

En la gestión de los residuos se deben involucrar todos como sociedad en su conjunto. Deberíamos gestionar eficazmente y adecuadamente de los residuos porque es crucial para el logro del desarrollo sostenible, sin gestionar los residuos, su vertido en botaderos ilegales o su quema es perjudicial para la salud, contamina el medio ambiente, tiene impacto negativo en el clima y perjudica el desarrollo socio económico de las naciones que limita su desarrollo, en la figura 1 podemos observar la generación de residuos por persona por kilogramo día (Banco Mundial, 2018).



*Figura N° 1:* Generación de residuos por persona.  
Fuente: Tomado de What a Waste 2.0 Banco Mundial (2018).

Ante el crecimiento acelerado de la población, se ha generado la necesidad de otorgarles nuevos espacios, ya sea para sus viviendas, centros de esparcimiento, transporte, etc. Lo cual ha impulsado al rubro de la construcción como una de las principales actividades económicas para el desarrollo sostenible de las ciudades (Olivares & De la Cruz, 2020). Actualmente la industria de la construcción es responsable de muchos de los impactos ambientales negativos que se generan en el mundo, ya sea por el consumo excesivo de materia prima o por la generación masiva de residuos (Suarez, Andrés, Mahecha, & Calderón, 2018).

Según (Suarez S. , Betancourt, Molina, & Mahecha, 2019), se producen alrededor de 6,5 mil millones de toneladas de residuos, los cuales 2,6 a 3 mil millones corresponden a residuos inertes provenientes de la construcción, con alto nivel de valorización y aprovechamiento, y en su mayoría estos son eliminados en vertederos sin ningún tipo de reutilización.

Según (Bezzolo & Angelo, 2020) la mala disposición final de los residuos sólidos llega afectar en su mayoría casos el paisajismo de la zona, debido al abandono no autorizado, generando un alto riesgo de contaminación de aguas subterráneas y superficiales, lo cual pone en riesgo la salud de la población.





*Figura N° 2:* Residuos de la construcción en abandono.  
Fuente: Tomado de Bezzolo & Angelo.



*Figura N° 3:* Recojo de residuos de la construcción.  
Fuente: Tomado de La Republica, 2021.



*Figura N° 4.* Botadero ilegal Coishco, Ancash.  
Fuente: Tomado de Andina, 2022.

De acuerdo a (Olivares & De la Cruz, 2020), solo se cuenta con cuatro (04) zonas autorizadas para ser destinadas como Rellenos Sanitarios, los cuales se encuentran en los distritos de Lurín, Carabayllo, Ventanilla y San Antonio como se observa en la Tabla N° 1, ante este déficit muchas empresas dedicadas en la construcción prefieren usar de botaderos no autorizadas, ya sea por la cercanía de su obra o por motivos de poco desconocimiento.

Tabla N° 1  
 Rellenos sanitarios autorizados en Lima.

Denominación de la infraestructura	Ente Administrador	Ubicación de Infraestructura			Distritos Beneficiarios
		Departamento	Provincia	Distrito	
Relleno Sanitario "El Zapallal"	Innova Ambiental S.A Carabaylo, Lima	Lima	Lima	Carabaylo	Ancon, Barranco, Breña, Carabaylo, Lima Cercado, Magdalena, Puente Piedra, San Luis, San Martín de Porres, Santa Rosa, Santa Rosa de Quives
Relleno Sanitario "Portillo Grande"	Innova Ambiental S.A Lurin, Lima	Lima	Lima	Lurin	Lima Cercado, Lurin, Miraflores, Punta Hermosa, Punta Negra, San Bartolo, San Borja, San Juan de Miraflores, Santa María del Mar, Villa El Salvador, Villa María del Triunfo, Santo Domingo de Olleros
Relleno Sanitario Huaycoloro	Petramas S.A.C Huarochiri, Lima	Lima	Huarochiri	San Antonio	Ate, Chaclacayo, Chorrillos, Cenequilla, El Agustino, Jesús María, La Molina, La Victoria, Los Olivos, Lurigancho, Pachacamac, Pucusana, Rimac, San Isidro, San Juan de Lurigancho, San Luis, San Miguel, Santa Anita, Santiago de Surco, Surquillo, Villa El Salvador, Matucana, Ricardo Palma, Santa Eulalia, San Mateo de Otaz, Surco
Petramas S.A.C Ventanilla, Callao (Botadero controlado el Modelo)	Petramas S.A.C Ventanilla, Callao	Callao	Callao	Ventanilla	Comas, El Agustino, Independencia, Jesús María, Lince, Los Olivos, Pueblo Libre, San Isidro, San Martín de Porres, San Miguel, Santa Anita, Santa Rosa, Bellavista, Callao, Carmen de la Legua, La Punta, La Perla, Mi Perú, Ventanilla

Fuente: Elaborado por Olivares & De la Cruz (2020).

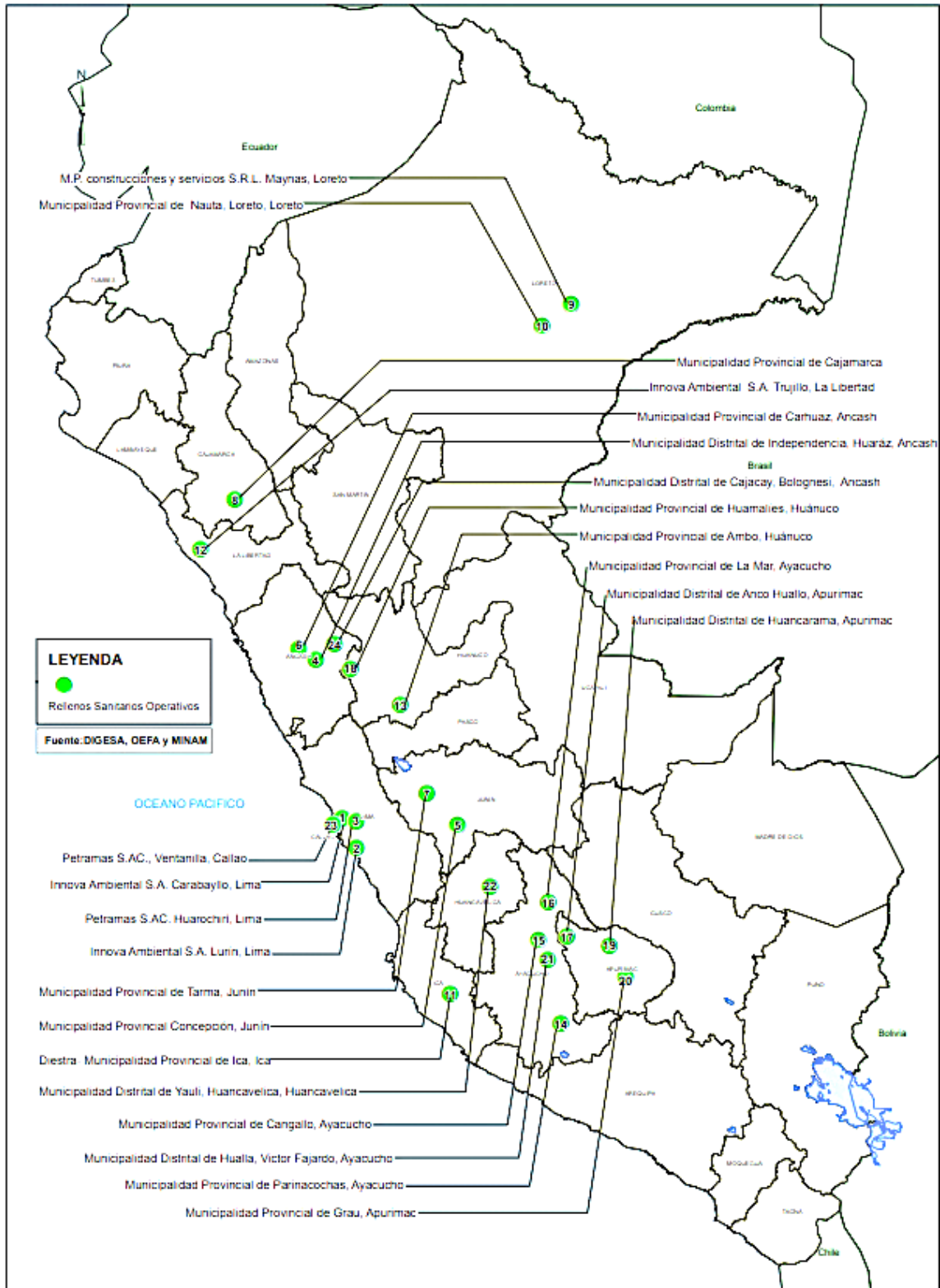


Figura N° 5: Mapa de rellenos sanitarios autorizados en el Perú.  
Fuente: DIGESA, OEFA y Ministerio del Ambiente (2016).

Ante el crecimiento de las ciudades, uno de los principales problemas que se viene dando es el aumento del parque automotriz, dando la gran necesidad de implementar

nuevos sistemas de transporte utilización maquinarias como las tuneladoras (TBM) como fuente principal para la excavación de proyectos de gran envergadura como Túneles ferroviarios (Instituto Didactia, 2018).

Los residuos sólidos derivados de procesos constructivos como perforaciones vienen siendo mucho más rápido su generación que su misma gestión; a su vez se suma la poca cantidad de vertederos concertados, lo caro que cuesta el transporte y el aumento de la contaminación de los suelos y lechos freáticos. Reducir a la mínima cantidad posible estos vertederos sería lo más óptimo para la conservación del medio ambiente (Quesada, 2012).

El principal problema ambiental en el uso de estas maquinarias viene en la dificultad de separar los finos de los lodos de transporte para su reutilización, el gran espacio requerido en la zona de trabajo para implementar plantas de separación y la eliminación de grandes cantidades de regaza generadas por la excavación (González Pascual, 2017). Por estas razones se ve necesaria la reutilización y de esta manera se minimizarían gastos de materiales originales que se encuentran directamente en la traza de los proyectos. Todo lo antes mencionado nos conduce a la necesidad de realizar un estudio de las propiedades de los materiales a reutilizar para así poder tener alternativas de tratamientos con el objetivo de lograr que su uso sea una solución siendo fiable en toda la vida útil de la obra (Quesada, 2012).

La economía circular es un gran aporte para mejorar el impacto ambiental negativo generado por el gran movimiento del rubro de la construcción, ayuda a reducir la explotación de grandes fuentes de materia prima y recursos materiales. Contribuye al uso de materiales de mayor longevidad fomentando nuevos mercados y aumentando nuevos empleos (Pontificia Universidad Católica del Perú, 2019).

Ante esta problemática, países como Alemania, España y Bélgica se han vuelto pioneros en el tratamiento y aprovechamiento de los residuos provenientes de la construcción, los cuales consiste en la separación de la fuente, tratamientos específicos y su aprovechamiento circular en el mismo rubro, el cual ayuda en la reducción del material residual (Pacheco Bustos, Fuentes Pumarejo, Sánchez Cotte, & Rondón Quintana, 2017).

Un ejemplo de aprovechamiento circular es la reutilización de tierras mezcladas con cal para mejorar sus propiedades de estabilidad en la construcción de carreteras y terraplenes lo cual nos da la posibilidad de emplear los lodos procedentes de tuneladora como una opción viable para sustituir las tierras con baja estabilidad. Las

estabilizaciones y tratamientos de suelos permiten corregir los problemas geotécnicos que pueda tener el uso de este tipo de lodos, permitiendo no sólo su reutilización sino, principalmente, su valorización. De esta manera se mejora la resistencia permitiendo su empleo en capas más exigentes de mayores prestaciones. Los resultados obtenidos demuestran que los lodos pueden tener otro tipo de gestión, evitando así dos impactos medioambientales destacados: el provocado por la acumulación irresponsable de los lodos y el producido por la explotación indiscriminada de otro tipo de yacimientos (Quesada, 2012).



*Figura N° 6:* Impacto ambiental producido por el vertido de lodos.

Fuente: Tesis Doctoral “Optimización y análisis del comportamiento de materiales tratados con cal en carreteras: aplicación a lodos de tuneladora y mezclas bituminosas” (2012).



*Figura N° 7:* Invasión de lodo de perforación en zonas costeras de Atastecas.  
Fuente: Elaborado por Diario Independiente Tribuna, 2019.



*Figura N° 8:* Inadecuado tratamiento de lodos de perforación.  
Fuente: Tomada por Mongobay, 2017.

Actualmente en el Perú se viene ejecutando la obra Línea 2 del Metro de Lima, un proyecto de gran envergadura, el cual consiste en un corredor férreo subterráneo de 35

Km de longitud donde se tiene destinado el uso de 7 096 520.79 Kg de bentonita para la composición de lodo bentonítico usado principalmente en las maquinarias de excavación masiva (Environmental Resources Management, 2015).

Según (Environmental Resources Management, 2015), en la Obra del Metro 2 de Lima se estima eliminar todo el volumen de material excedente de la excavación de los túneles, pozos de ventilación y estaciones. Estos volúmenes serán eliminados en 02 sectores Costa Verde y Cieneguilla, los cuales cuentan con la capacidad necesaria para atender su demanda. Si bien se tiene pensado una adecuada eliminación, no se ha propuesto darle un segundo uso, lo cual podría ser muy beneficioso ya que podría ayudar mucho para el mejoramiento de suelos destinados para carreteras o para construcción de terraplenes.

El Perú es uno de los países a nivel mundial donde se presenta la mayor cantidad de problemas en relación al transporte, radica en las vías pavimentadas en mal estado y muchos accesos que no se encuentran pavimentados, dando lugar a accidentes de tránsito y problemas de congestión vehicular. La condición crítica de las vías pavimentadas presenta fallas ya sea por mal alcantarillado, tiempo de vida útil superado, Alto tránsito vehicular, factores climáticos, deficiente mantenimiento o por utilizar materiales de menor calidad (Linares Siesquén, 2021).

Según (Santa Cruz Marín, 2019) en la selva peruana los suelos en su gran mayoría son inestables generando asentamientos, grietas y variaciones volumétricas en la construcción de carreteras. Por tal motivo se necesita el mejoramiento de la Subrasante, la cual se realiza mediante corte y eliminación del suelo inestable, remplazado por material con mayor estabilidad y que cumpla con los parámetros necesarios.



*Figura N° 9:* Fallas de depresión en pavimentos.  
Fuente: Zevallos Gamarra, 2017.



## 1.1 Formulación y delimitación del problema

### 1.1.1 Problema general:

¿En qué medida la economía circular del Lodo Bentonítico proveniente de la Excavación de la Línea 2 del Metro de Lima mezclado con Cal incide para la mejora de Subrasante?

### 1.1.2 Problemas específicos:

- a) ¿En qué medida la clasificación según SUCS y AASHTO de una muestra de suelo tomada del Distrito de Lurín incidirá en la determinación de un suelo apto para subrasante?
- b) ¿En qué medida la Determinación de la densidad seca máxima, porcentaje óptimo de humedad y CBR de una muestra de suelo de Lurín incidirá en la clasificación de subrasante?
- c) ¿En qué medida la Determinación de la densidad seca máxima, porcentaje óptimo de humedad y CBR de una muestra de suelo de Lurín mezclado con 4% de Cal y 5% de Lodo Bentonítico incidirá en la clasificación de subrasante?
- d) ¿En qué medida la Determinación de la densidad seca máxima, porcentaje óptimo de humedad y CBR de una muestra de suelo de Lurín mezclado con 4% de Cal incidirá en la clasificación de subrasante?

## 1.2 Objetivo general y específico

### 1.2.1 Objetivo general

Proponer la economía circular del lodo bentonítico con cal proveniente de las excavaciones, para el mejoramiento de la Subrasante, caso Línea 2 del Metro de Lima.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- a) Realizar la clasificación SUCS y AASHTO de una muestra de suelo tomada del Distrito de Lurín.
- b) Determinar la densidad seca máxima, porcentaje óptimo de humedad y CBR de una muestra de suelo tomada del Distrito de Lurín.

- c) Determinar la densidad seca máxima, porcentaje óptimo de humedad y CBR del suelo de Lurín mezclado con 4% de Cal y 5% de Lodo Bentonítico procedente de las excavaciones de la obra Línea 2 del Metro de Lima.
- d) Determinar la densidad seca máxima, porcentaje óptimo de humedad y CBR del suelo de Lurín mezclado con 4% de Cal.

### 1.3 Delimitaciones de la investigación

#### 1.3.1 Delimitación temporal

La presente investigación está comprendida entre el mes de mayo del 2022 hasta noviembre del 2022 (Fecha de la investigación).

#### 1.3.2 Delimitación espacial

El Proyecto se ubica políticamente en 07 distritos de la provincia de Lima y en 3 distritos de la provincia del Callao, en el departamento de Lima (Metro de Lima Línea 2, 2015). Ver Figura 10.



Figura N° 10: Recorrido de la línea 2 del Metro de Lima.  
 Fuente: Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2016.

Nuestro proyecto de investigación abarcará solo la Etapa 2 de la Construcción de la Línea 2 del Metro de Lima, lo cual solo abarcará de la progresiva

0+317.50 hasta la 11+349.44 de la Línea 2 y la progresiva 0+317.60. Ver Figura 11

Id	Estación	Progresiva	Distancia (m)	Cercanía a	Metodología de construcción
1	Puerto del Callao	0+317.50	1 625.83	Ovalo Garibaldi	Cut&cover
2	Buenos Aires	1+943.33	1 121.05	Av. Buenos Aires	Cut&cover
3	Juan Pablo II	3+064.38	972.50	Av. Santa Rosa	Cut&cover
4	Insurgentes	4+036.88	891.90	Av. Los Insurgentes	Cut&cover
5	Carmen de la Legua L2	4+928.78	948.13	Av. Elmer Faucett	Cut&cover
6	Oscar Benavides	5+876.91	1 073.61	Ca. Ricardo Palma	Cut&cover
7	San Marcos	6+950.52	875.62	Av. Universitaria	Cut&cover
8	Elio	7+826.14	873.18	Av. Santa Bernardita	Cut&cover
9	La Alborada	8+699.32	928.41	Av. La Alborada	Cut&cover
10	Tingo María	9+549.80	813.66	Av. Tingo María	Caverna
11	Parque Murillo	10+441.39	908.05	Av. Bolivia	Cut&cover
12	Plaza Bolognesi	11+349.44	705.32	Pz. Bolognesi	Cut&cover

Figura N° 11: Ubicación estaciones, tramo línea 2.  
Fuente: Consorcio Geodata-ESAN-Serconsult 2017.

## 1.4 Justificación e importancia

### 1.4.1 Justificación

El presente estudio responde a la necesidad de conocer la gestión y disposición final del lodo Bentonítico que se utiliza en las perforaciones de la nueva construcción del Metro de Lima línea 2 y su reutilización en el mejoramiento de la subrasante ayudara a mejorar la resistencia e incrementara la vida útil de las carreteras del interior del país, contribuyendo ello a un mejor desarrollo como sociedad. Los Residuos de construcción y Demolición pueden reciclarse y ser aprovechadas como en diversos materiales sostenibles (Ciclo, 2019).

- a) Justificación teórica: El aumento de construcciones en el mundo ha generado un mayor consumo de recursos naturales y ha incrementado el volumen de Residuos de Construcción y Demolición (RCD), generando daños ambientales que afectan el desarrollo sostenible de las ciudades (Vargas E., 2020).

Se ha establecido que la mayoría de carreteras en Perú tienen problemas de diseño. Eso quiere decir que, en la red vial nacional, algunas vías

asfaltadas soportan una carga de vehículos elevada. (Empresas, Economía y Sociedad en el Perú, 2022).

La economía circular del lodo bentonítico mitigaría la problemática del estado actual de las carreteras en el país contribuyendo al desarrollo como sociedad.

- b) Justificación práctica: La presente investigación contribuirá a reutilizar el lodo bentonítico proveniente de la excavación de la obra del Metro 2 de lima, dándole un segundo uso mezclándolo con cal para mejoramiento de subrasantes de futuras obras de carreteras dando un gran impacto positivo al medio ambiente.
- c) Justificación institucional: Esta investigación puede proporcionar en las instituciones estatales o privadas, criterios para la inclusión de métodos alternativos para el uso de material residual de obras de excavación para la elaboración de expedientes de obras viales a fin de mejorar costos, evitar explotaciones de canteras y proporcionar suelos mejorados para un mejor desempeño de la carpeta asfáltica.
- d) Justificación social: La generación de residuos de construcción y demolición de las grandes construcciones es continua e inevitable generado por los diversos materiales. La responsabilidad de los gerentes, promotores profesionales, equipo técnico y trabajadores de la construcción sobre los residuos generados en obra es un compromiso que se tiene asumir y tomar acción, pero no son los únicos que participan en la generación de los residuos, lo que manifiesta la problemática de analizar el rol de cada uno de los sectores que participan de estos procesos, vincularlos y llegar a conclusiones que accionen mejores procesos para el manejo de las RCD. (Rea, 2017)

Esta investigación ayudará a concientizar a la población el gran impacto ambiental generado por los lodos bentoníticos producidos en la excavación con maquinaria tuneladora y su adecuada reutilización, para no dar por terminado su ciclo al terminar su función a los profesionales ampliar su conocimiento para implementar mejores estrategias para mitigar el impacto negativo que genera estas obras en el medio ambiente.

- e) Justificación ambiental: La presente investigación busca, como aporte, poder utilizar la economía circular del lodo bentoníticos mezclado con cal

como un material auxiliar para la reposición suelos inestables en caso de construcción de vías pavimentadas, lo cual permitirá que no se siga explotando de manera inmensurable canteras para la reposición de suelos no aptos. Esto es sumamente bueno para el medio ambiente, ya que este residuo proveniente de tuneladoras se le dará un segundo uso y no solo será destinado como residuo en botaderos, en muchas veces clandestinos.

#### 1.4.2 Importancia

La presente investigación es importante para revisar y analizar la economía circular del lodo bentonítico en las perforaciones con tuneladora en su impacto ambiental en nuestro país, Así mismo se podrá reconocer que factores influyen en la economía circular del lodo bentonítico para su aprovechamiento en la mejora de las subrasantes de las carreteras, como consecuencia se tendría un mejor control y se mitigarían impactos ambientales y económicos.

## CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes del estudio de investigación

#### 2.1.1 Antecedentes nacionales

Chávez Arbayza & Odar Yabar (2019), en la presente investigación titulada Propuesta de estabilización con cal para subrasantes con presencia de suelos arcillosos en bofedales y su influencia en el pavimento rígido bajo la metodología de diseño AASHTO 93 aplicado al tramo 1 de la carretera Oyón-Ambo se busca analizar y comparar el mejoramiento del comportamiento de suelos arcillosos aplicando cal como estabilizador y mejorar su baja plasticidad que presenta. Para lo cual se efectuó ensayos del suelo en su estado natural para determinar el porcentaje óptimo de cal, una vez determinado este parámetro se procedió a efectuar ensayos de laboratorio de la mezcla (suelo-cal) para finalmente determinar la calidad de la nueva subrasante mediante el Ensayo de Relación de Soporte de California (CBR). Los ensayos presentados dan como resultado un incremento del CBR del suelo natural de 6% a un CBR del suelo mejorado con cal a un 43.3% que según el manual de carreteras MTC se paso de ser una subrasante pobre a una subrasante de excelente calidad.

Moale Quispe & Rivera Justo (2019), en la presente investigación titulada Estabilización química de suelos arcillosos con cal para su uso como subrasante en vías terrestres de la localidad de Villa Rica se busca mejorar la capacidad de soporte de la subrasante, mediante la estabilización química del suelo, utilizando el óptimo porcentaje de cal. Para lo cual se efectuó el estudio natural de los suelos de la localidad para determinar sus propiedades físicas y mecánicas, su adecuada clasificación mediante ensayos de granulometría y ensayos de CBR con distintas muestras del suelo con diferente porcentaje de cal; en el cual los ensayos presentados dieron como resultado que los valores de CBR en suelo natural fue igual a 3.3% al 95% de la máxima densidad seca, lo cual se atribuye a un suelo de baja capacidad de soporte no apto para subrasante y adicionando 15% de cal al suelo natural se incrementó el CBR en 78.8% al 95%. Ya que el suelo presenta mejor

soporte ayudó a disminuir el espesor del pavimento en 15.4% en relación a la estructura del pavimento sobre un suelo sin estabilizar.

Olivares Puruhuaya, J.A. y De la Cruz Del Aguila, M.E. (2020), Instalación de una planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición con la finalidad de mitigar el impacto ambiental. Universidad Ricardo Palma, Perú. (Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil). La investigación consiste en el estudio de la instalación de una planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición en la ciudad de Lima, distrito de Villa el Salvador, para la ubicación de la planta de tratamiento se ha considerado el distrito con mayor cantidad de botaderos tomando como referencia para ello la mayor cantidad de licencias de construcción de edificios multifamiliares en la ciudad de Lima, tiene como finalidad reducir la emisión de combustible y otras partículas perjudiciales para el medio ambiente, de esta manera se mejorara la calidad del aire, también se considera el ahorra en materia prima para la construcción ya que se propondrá protocolos de reutilización de materiales, como conclusión se pretende incentivar la creación de plantas de tratamientos de residuos de construcción y demolición, de esta manera no solo eliminar la informalidad si no mejorar la gestión y manejo en el país.

Vásquez Calderón, J.A. (2015), Impacto Ambiental en el proceso de construcción de una carretera afirmada en la zona alto andina de la región Puno. Pontifica Universidad Católica del Perú, Perú. (Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil). La investigación se basa en el análisis del impacto ambiental en la construcción de la carretera afirmada en la zona alto andina de la región de Puno, evaluando el proceso de construcción con el fin de contrastar el nivel de compatibilidad ambiental de esa intervención con un contexto normativo determinado. El objetivo principal es evaluar el impacto ambiental de una carretera o eje vial en su proceso de construcción, a fin de determinar el nivel de compatibilidad ambiental de esa intervención en un contexto ambiental determinado, La valoración ambiental cualitativa y multicriterio ha demostrado ser una metodología aceptable para proyectos viales, pues demuestra según las reglas de decisión empleadas para la interpretación de impactos, que los resultados obtenidos son acordes a los

impactos generados en la construcción de una carretera, y no se ha obtenido resultados discrepantes.

Ruiz LLamocanta, E.N (2013), Impacto Ambiental Generado por la construcción del camino vecinal Cullanmayo-Nudillo, Universidad Nacional de Cajamarca, Perú. (Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil). La investigación se basa en evaluar el impacto ambiental, generado por la construcción del camino vecinal Cullanmayo-Nudillo; Distrito Cutervo, Provincia de Cutervo- Cajamarca. Los datos se recolectaron en un periodo de tres meses entre diciembre 2012 a febrero del 2013. Se usó la técnica de observación directa, donde se utilizaron listas de verificación, cuestionarios y matrices de causa-efecto con la finalidad de identificar los efectos ambientales producidos en la construcción del camino vecinal; posteriormente se procedió a evaluarlos mediante la matriz de Leopold calificándose como: Muy significativa o severo, regular significancia o moderado y poca significancia o leve. Según la matriz de significancia se identificaron 82 impactos, de las cuales el 80.49% son Impactos negativos y el 19.51% son impactos positivos. En la construcción del camino vecinal, la mayoría de los factores ambientales, aire, agua, suelo, biota han sido de alguna forma modificadas en sus condiciones naturales. El análisis de las matrices indica que la mayoría de los impactos son impactos negativos representando el 80.49 % y el 19.51% son impactos positivos de un total de 82 impactos generados por la construcción del camino vecinal.

### 2.1.2 Antecedentes internacionales

Ulloa López (2015), en la presente investigación titulada Estabilización de suelos cohesivos por medio de Cal en las Vías de la comunidad de San Isidro del Pegón, municipio de Potosí-Rivas se busca estabilizar los suelos cohesivos de la comunidad con una mezcla de cal hidratada para mejorar sus propiedades. Para lo cual se procedio con la recolección de material en distintos puntos de la via en estudio, determinar el porcentaje del material estabilizador para un optimo desempeño, reduciendo las susceptibilidad al hinchamiento por cambio de humedades, en estos ensayos dió como resultado que el suelo en estado natural son suelos con baja capacidad de carga y un



alto índice de pasticidad, a su vez al aumentar 9% de cal al suelo natural se mejora significativamente la plasticidad, densidad de campo y principalmente su capacidad de soporte.

Movilla Quesada (2012), en la presente investigación titulada Optimización y análisis del comportamiento de materiales tratados con cal en carreteras: aplicación a lodos de tuneladora y mezclas bituminosas Santander, España. (Tesis doctoral), En esta tesis doctoral se presentan diversos estudios experimentales mediante los cuales se mejoran los materiales utilizados en carreteras, tanto en terraplenes como en firmes. El objetivo del presente estudio es valorizar un residuo de la construcción y demolición (RCD) en forma de lodos procedentes de tuneladora y transformarlo como material de construcción para seguidamente aplicar en obra estos nuevos materiales reciclados, concluye destacando la mejora de la cal en diferentes características de los suelos, de terraplenes y en el comportamiento cohesivo de las mezclas bituminosas.

García Espinel J. (2009), el presente artículo titulado Reciclado de material asimilable a lodo procedente de la excavación de pantallas en la Ampliación del Campo de Vuelos del Aeropuerto de Málaga, Revista de Obras Públicas, 3.501,23-38. En la obra de “Ampliación del Campo de Vuelos del Aeropuerto de Málaga”, se ha desarrollado y aplicado con éxito la tecnología para poder reciclar un material asimilable a lodo, procedente de la excavación de los muros pantallas. De esta manera se consigue evitar tener que llevar este material a vertedero reutilizándolos para la ejecución del terraplén de ciertas zonas delimitadas del aeropuerto, evitando el fuerte impacto medioambiental que generaría dicho vertedero, reduciendo las molestias al tráfico en el entorno de la obra y disminuyendo las toneladas de CO<sub>2</sub> emitidas a la atmósfera al disminuir drásticamente el transporte de camiones entre la obra y los vertederos.

Joaquín Díaz & Daniel Castro-Fresno (2011), la presente investigación titulada Estabilización de Lodos Bentoníticos Procedentes de Tuneladora Tratados con cal, 2011. En la presente investigación se muestran los

resultados obtenidos a partir del tratamiento con cal de cuatro muestras de lodos bentoníticos procedentes de tuneladora. El estudio realizado se basa en ensayos de tipo mineralógico, químico, geotécnico y mecánico de la mezcla del lodo bentonítico con el porcentaje óptimo de cal, llegándose a alcanzar mejoras del 80% en las propiedades resistentes del suelo.

Bauzá Castelló, Juan Diego (2015), la presente investigación titulada El Tratamiento de los Suelos Arcillosos con Cal. Comportamiento Mecánico y Evolución a largo plazo ante Cambios de Humedad, se busca recopilar información de investigaciones recientes sobre el mejoramiento de suelos mezclados con cal y a su vez determinar los parámetros de deformación que presenta un suelo de arcilla altamente plástico al ser modificado su grado de humedad y succión. Dicha recopilación de información ayudó a formular un manual actualizado de los suelos mejorados con cal y a identificar sus mejoras como: reducción de hinchamiento y plasticidad, aumento de resistencia, mayor retención de agua, aumenta la resistencia a erosión, entre otros.

## 2.1 Bases teóricas vinculadas a la variable o variable de estudio

### 2.1.1 Mejoramiento de subrasante

a) Clasificación de subrasante: La clasificación de la subrasante se basa principalmente según a su capacidad de soporte, las cuales se determinan mediante el ensayo de CBR. (Moale Quispe & Rivera Justo, 2019)

Según (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2014), para que la subrasante se considere adecuada se requiere que el CBR sea  $\geq 6\%$ , de no cumplir con este requisito se necesitara el mejoramiento del suelo mediante cualquier tipo de estabilización existente y que vaya acorde con su presupuesto de obra.

Tabla N° 2  
Clasificación de subrasante.

<b>Categorías de Sub rasante</b>	<b>CBR</b>
S0 : Sub rasante Inadecuada	CBR < 3%
S1 : Sub rasante Insuficiente	De CBR ≥ 3% A CBR < 6%
S2: Sub rasante Regular	De CBR ≥ 6% A CBR < 10%
S3 : Sub rasante Buena	De CBR ≥ 10% A CBR < 20%
S4 : Sub rasante Muy Buena	De CBR ≥ 20% A CBR < 30%
S5 : Sub rasante Excelente	De CBR ≥ 30%

Fuente: Elaborado por Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2014.

b) Tipos de estabilización.

- Por combinación de suelos

Según (Moale Quispe & Rivera Justo, 2019), la estabilización por combinación de suelos se caracteriza principalmente por el retiro del suelo de una capa de aproximadamente 15 cm, para luego ser mezclado con otro suelo de una mejor calidad. El suelo mezclado tiene que pasar por un proceso de limpieza el cual consiste en la eliminación de partículas que tengan menor diámetro a 75mm para luego darle un tratamiento de humedecimiento y aireación, el cual ayudara a cumplir todos los requerimientos necesarios para una adecuada compactación.



*Figura N° 12:* Estabilización de suelos por combinación.  
Fuente: Tomada por Brackel Constructions Products S.L. , 2015.



*Figura N° 13:* Proceso de aireación de suelos Landfarnig.  
Fuente: Tomada por Interempresas, 2017.

- Por sustitución

Según (Moale Quispe & Rivera Justo, 2019), este tipo de estabilización se usa principalmente cuando el terreno en uso presenta muy malas propiedades de soporte, por tal motivo el suelo es retirado en capas según lo indicado en obra para luego ser rellanado por un suelo de mejor calidad, hasta alcanzar las cotas requeridas; una vez que se coloca el nuevo suelo se procede a la nivelación y compactación del mismo.



*Figura N° 14:* Sustitución de suelos.  
Fuente: Tomada por Doroteo Cid, 2012.



*Figura N° 15:* Material de sustitución proveniente de un banco.  
Fuente: Tomada por Doroteo Cid, 2012.



*Figura N° 16:* Sustitución de suelos en Nicaragua.

Fuente: Tomada por Moale Quispe & Rivera Justo, 2019.

- Estabilización con cal

Según (Moale Quispe & Rivera Justo, 2019), otro proceso para el mejoramiento del suelo en campo, sería incorporación de un porcentaje de cal en el suelo natural para su posterior mezclado. Esta mezcla produce un proceso llamado floculación, que es un proceso químico donde se logra un aumento de la resistencia de penetración y disminuir su expansión ante la presencia de agua, todo esto ocurre por un intercambio iónico debido al desplazamiento de las partículas de cal en la superficie del terreno donde se fue agregado.

Otra propiedad importante de la incorporación de cal en el suelo natural, es que este influye en su plasticidad, disminuyendo o aumentando su límite plástico y límite líquido, y a su vez el aumento de la humedad óptima de compactación (Moale Quispe & Rivera Justo, 2019).

Según (Ulloa López, 2015), el uso de cal se da principalmente para el mejoramiento de suelos en el rubro de la construcción de carreteras, sin embargo se le puede dar otro uso como el secado de suelos, que en la actualidad, se viene usando como un método alternativo muy económico para mejoramiento de suelos rurales de

comunidades lejanas que no cuentan con un presupuesto para la pavimentación de su caminos.



*Figura N° 17:* Suelo de arcilla floclada con cal.  
Fuente: Tomada por Nacional Lime Association, 2004.



*Figura N° 18:* Aplicación de lechada de cal.  
Fuente: Tomada por Nacional Lime Association, 2004.



*Figura N° 19: Mejoramiento de caminos naturales con sistema con cal*  
Fuente: Tomada por Máxima Online, 2018.

- Estabilización con cemento

Según (Moale Quispe & Rivera Justo, 2019), la estabilización de suelos con cemento solo se debe emplear para suelos de Tipo : A-1, A-2 y A-3 que vienen a ser suelos granulares cuyas partículas no exceden el 35% de material que pasa por el tamiz N° 200; de los cuales se obtiene una mezcla con mayor endurecimiento y mayor resistencia.

El porcentaje de compactación requerida para este tipo de suelo mezclado con cal se llega al 95% de la Máxima Densidad Seca a nivel de subrasante y se debe hacer un curado adecuado para evitar posibles fisuramientos del suelo tratado. (Moale Quispe & Rivera Justo, 2019)





*Figura N° 20:* Estabilización de suelos con cemento.  
Fuente: Tomada por 360 En Concreto, 2010.



*Figura N° 21:* Estabilización con cemento.  
Fuente: Tomada por ANCADE, ANTER & IECA, 2008.

- Estabilización por compactación

Según la (Norma CE.020 Estabilización de Suelos y Taludes, 2012), este proceso de estabilización se debe usar en toda obra donde prime el uso de suelo como soporte de carga útil de fuerzas externas, ya sea como terraplenes para vías, suelo de cimentación, rellenos, etc. Donde su uso ayudará al aumento de la resistencia de corte, reducir asentamientos, reducir permeabilidad.

Este tipo de estabilización está en relación a la energía aplicada en su compactación, actualmente en los laboratorios de Mecánica de Suelos se emplea la energía del ensayo de Proctor Modificado para determinar el porcentaje de humedad óptimo para su máxima densidad a fin de cuantificar la cantidad de agua necesaria para su mayor desempeño del suelo. (Moale Quispe & Rivera Justo, 2019)



*Figura N° 22:* Compactación de terreno con rodillo vibrador calle Atahualpa.  
Fuente: Tomada por Noticias al Día, 2021.



*Figura N° 23:* Compactación de terreno con canguro compactador.  
Fuente: Tomada por Alquiros Enriquez.

- Estabilización por geosintéticos

Este tipo de estabilización es muy común en presencia de suelos blandos o con gran porcentaje de finos, sobre el cual se necesitará conformar una capa granular. Ante este problema se coloca un geotextil para separar la nueva capa granular con el terreno blando natural, ayudando así a controlar el gran porcentaje de humedad presente en el terreno blando y aumentar la distribución de cargas.



*Figura N° 24:* Mejoramiento de suelos con geotextil.  
Fuente: Tomada por Geotextan.

- c) Ensayos de laboratorio

- Ensayo de granulometría

Según (Villalobos, 2016) el ensayo de granulometría es una forma adecuada de poder elaborar la curva granulométrica del suelo, donde se resalta la distribución del tamaño de las partículas presentes en el suelo de estudio. Muchas veces para lograr una adecuada curva granulométrica se hace empleo del Análisis de Granulometría por Tamizado y Análisis de Granulometría por Sedimentación.

Análisis de Granulometría por Tamizado: Este proceso nos ayuda a determinar qué porcentaje de partículas quedan entre los distintos

tamices empleados en el ensayo, de los cuales solo se permite hasta el tamiz N° 200, ya que el material que pasa por este tamiz se deberá considerar para el análisis de granulometría por sedimentación.

Según (Villalobos, 2016), la importancia de poder determinar la granulometría de los suelos va en relación a la resistencia que presenta el grano según su tamaño.

Para la correcta elaboración de la curva granulométrica se procede con la colocación del material sobre los tamices para su posterior vibración manual o eléctrica, donde cierta cantidad de material se va quedando en los distintos tamices, el cual será pesado y se registra. (Villalobos, 2016)



*Figura N° 25:* Juego de tamices.  
Fuente: Villalobos, 2016.

Según (RD N°18 2014 MTC, 2017) para realizar este ensayo se deberá contar con dos balanzas, una con sensibilidad de 0,01 g para material que pase el tamiz N° 4 y otra de 0.001 g para materia que se retiene en tamiz N° 4. Además, se deberá contar con una serie de tamices necesarias por donde se pasará el material de estudio, la numeración y tamaño de apertura de estos se presentan en la siguiente Tabla N° 3.

Tabla N° 3  
 Tamices a utilizar para ensayo granulométrico.

TAMICES	ABERTURA (mm)
3"	75,000
2"	50,800
1 ½"	38,100
1"	25,400
¾"	19,000
⅜"	9,500
N° 4	4,760
N° 10	2,000
N° 20	0,840
N° 40	0,425
N° 60	0,260
N° 140	0,106
N° 200	0,075

Fuente: RD N°18 2014 MTC, 2017.

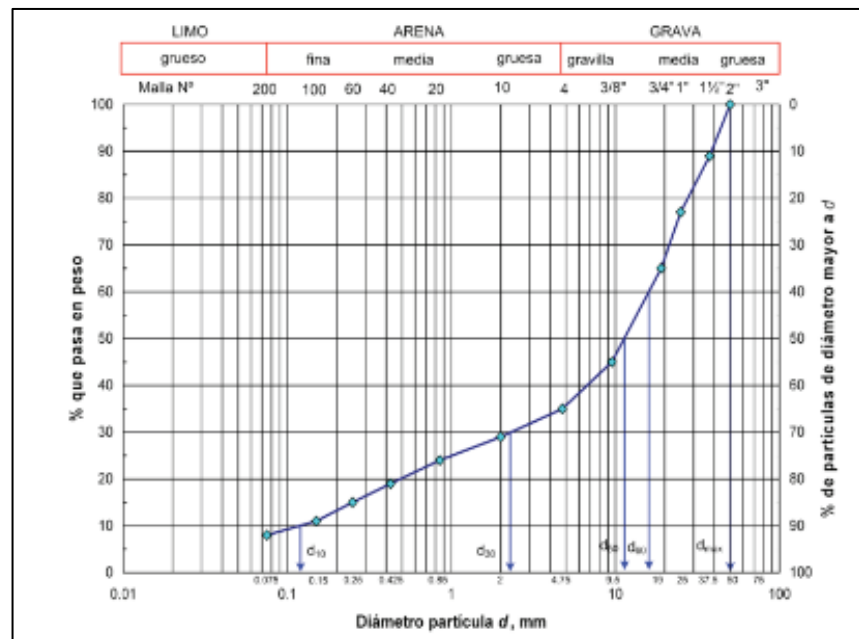


Figura N° 26: Ejemplo curva granulométrica.  
 Fuente: Villalobos, 2016.

Tabla N°4  
Distribución de tamaños de apertura por tamices.

Tamiz (ASTM)	Tamiz (mm.)	Material
3"	80	GRAVA
2"	50	
½"	40	
1"	25	
¾"	20	
3/8"	10	
N° 4	5	ARENA GRUESA
N° 10	2	ARENA MEDIA
N° 20	0,90	
N° 40	0,50	
N° 60	0,30	ARENA FINA
N° 140	0,10	
N° 200	0,08	

Fuente: Movilla Quesada, 2012.

- Límites de Atterberg

El suelo arcilloso mezclado con una cantidad significativa de agua, puede llegar a fluir como un líquido viscoso hasta tener una consistencia totalmente líquida, cuando este suelo es secado gradualmente tendrá un comportamiento como material plástico, semisólido o sólido, esto dependerá del contenido de humedad. (Villalobos, 2016)

Estado	Sólido	Semi-Sólido	Plástico	Líquido	Suspensión
Agua	← w decrece				
Volumen	constante	← V decrece			
Condición	rígida	trabajable	pegagosa	pastosa	agua
Resistencia al corte, kPa	← τ aumenta			Despreciable a cero	
	Suelo seco	Contracción LC	Plástico LP	Líquido LL	
Humedad	0	w <sub>C</sub>	w <sub>P</sub>	w <sub>L</sub>	

Figura N° 27: Características cualitativas de un suelo en función de su estado  
Fuente: Villalobos Felipe (2016).

Límite líquido del suelo: Se denomina límite líquido al porcentaje de humedad que contiene un suelo cuando éste pasa de un estado plástico a un estado líquido, estos parámetros son aplicados en diversos sistemas de clasificación de suelos y para determinar correlaciones con las diferentes propiedades del suelo. El instrumento de medición que se usa en este ensayo es la Copa de Casagrande (Figura 28), en la cual se mide el contenido de humedad de un surco separador de 13mm al dejar caer la copa 25 veces a partir una altura de caída de 1cm, con una velocidad de 2 caídas por segundo. (RD N°18 2014 MTC, 2017)

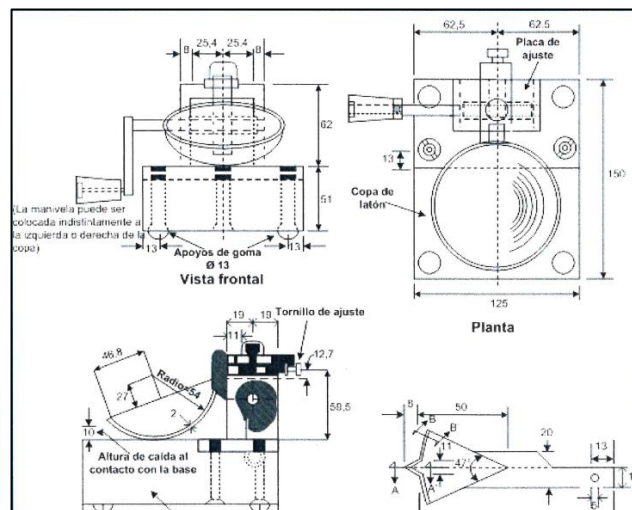


Figura N° 28: Aparato manual para limite líquido.  
Fuente: Manual de ensayo de Materiales (2017).

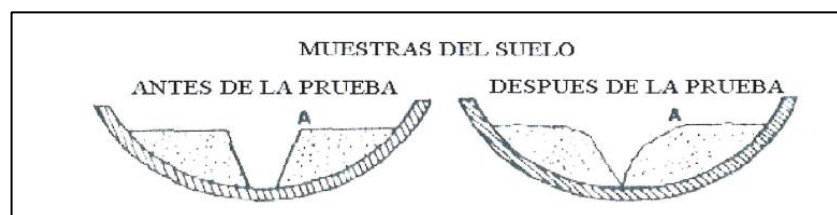


Figura N° 29: Muestras del suelo antes y después de la prueba.  
Fuente: Manual de ensayo de Materiales (2017).

Determinación del límite plástico del suelo: Se denomina límite plástico cuando un suelo pasa de un estado semisólido a un estado plástico, el límite plástico se determina con un porcentaje de

humedad que viene a ser el resultado de amasar unas barras de suelo con la mano sin fisurarse y estas alcanzan un diámetro de 3.2 mm. (RD N°18 2014 MTC, 2017) Ver figura 30.



*Figura N° 30:* Ensayo de límite plástico.  
Fuente: Moale A. y Rivera E. (2018).

- Proctor modificado

Es un ensayo de compactación de suelos el cual se utiliza para suelos con un 30% o menos en peso de partículas retenidas en el tamiz  $\frac{3}{4}$  “. El ensayo tiene como finalidad determinar el contenido óptimo de humedad y la máxima densidad seca del suelo que se someterán a una energía de compactación de 2 700 kN-m/m<sup>3</sup> (56 000 pie-lbf/pie<sup>3</sup>), en un molde de 4’’ o 6’’ con un pistón de 10lbf, teniendo una altura de caída de 18 pulg. (RD N°18 2014 MTC, 2017)

Según Maole A. y Rivera E. (2019) entre las normas existentes para la realización de los procedimientos de este ensayo se encuentra la Norma ASTM D-1557 y la Norma Técnica Peruana NTP 339.141.





*Figura N° 31:* Compactación del espécimen para el ensayo de proctor modificado.  
Fuente: Moale A. y Rivera E. (20 18).

d) Ensayos para determinar las propiedades del suelo

- Ensayo de Californian Bearing Ratio (CBR)

El ensayo de CBR determina la capacidad portante de bases, subbases y subrasantes de suelos por medio de un índice de resistencia que viene hacer el valor de la relación de soporte, antes de realizar el ensayo se debe tener la humedad óptima y la máxima densidad seca del suelo. En líneas generales, el suelo saturado es la condición más favorable de humedad; para obtener ello se debe tener la muestra sumergida durante cuatro días, confinados en un molde con una sobrecarga que simula el peso del pavimento. Por lo tanto, el CBR se obtiene con del esfuerzo de penetración de un pistón de 44.5 KN, para penetrar 0.1'' y 0.2'' en la muestra con referencia al esfuerzo, que se obtuvo para penetrar la misma profundidad en una muestra de piedra chancada de california; según las especificaciones de la norma peruana el valor deberá ser como mínimo de 6% para considerar un suelo óptimo para ser usado en proyectos viales. (RD N°18 2014 MTC, 2017).

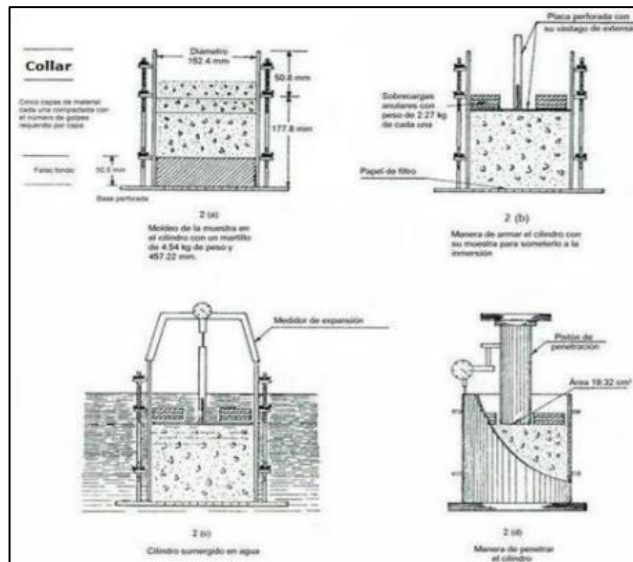


Figura N° 32: Ensayo CBR adaptada del manual de ensayos de materiales. Fuente: Ministerio de Transporte y comunicaciones (2016).

## 2.1.2 Economía circular del lodo bentonítico mezclado con cal

### a) Tipos de lodos bentonítico

Los lodos usados en las perforaciones están formados por una base líquida, un agente espesante, una arcilla bentonítica, lignosulfatos y lignitas. La base líquida está conformada por agua o aceite diésel, acompañada por el sulfato de bario que suele ser el agente espesante. La característica principal de la arcilla bentónica es ayudar al proceso de retiro de los recortes del pozo y al mismo tiempo actuar como elemento filtrante en las paredes del agujero. Además, los encargados de mantener el lodo en estado líquido son los lignosulfatos y lignitas, cabe mencionar que en algunas oportunidades se utilizan aditivos que cumplen funciones específicas.

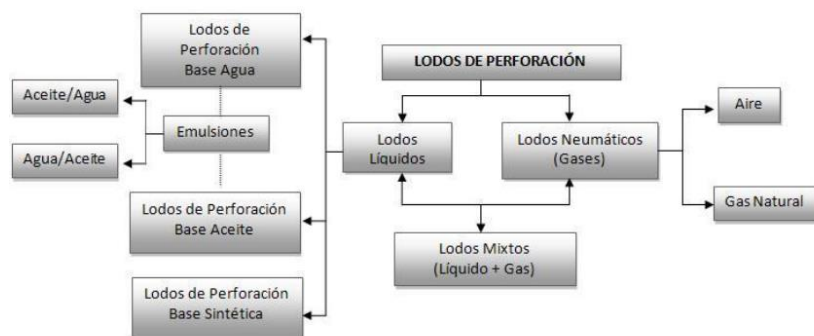


Figura N° 33: Clasificación general de lodos de perforación. Fuente: Movilla Quesada D. (2012).

- Lodos base agua

Los lodos de perforación se clasifican en lodos con base acuosa, con base de aceite y con base sintética. Los lodos con base acuosa se pueden utilizar inmediatamente sobre el terreno. Pueden ser descargados en las aguas lejanas a la costa, siempre y cuando sigan las normativas de vertido actuales, su precio en comparación con los demás tipos de lodos es relativamente bajo y generalmente no presenta problemas con el medio ambiente para organismos presentes. En algunas ocasiones, pueden presentarse dificultades al momento de realizar la perforación en terrenos de pozos profundos u horizontales muy extensos, debido a que este tipo de lodo no tiene un buen comportamiento en la perforación terrestre. Para estas situaciones se sugiere la utilización de lodos de base aceitosa. (Quesada, 2012)

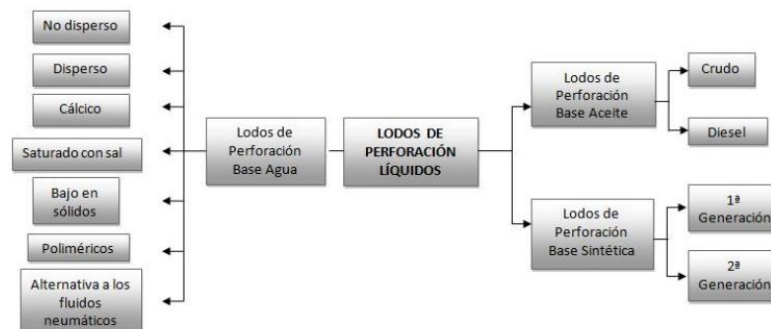


Figura N° 34: Clasificación de los lodos de perforación de base acuosa.  
Fuente: Movilla Quesada D. (2012).

- Lodos no dispersos

Estos lodos están compuestos por bentonita, agua dulce e hidróxido cálcico. Para aumentar o disminuir el valor del punto de cedencia y así mejorar el transporte de recortes en pozos de poca profundidad, se hidrata la bentonita y se mezcla con hidróxido cálcico. El mayor problema es que este tipo de lodos no resiste altas temperaturas (~205° C). (Quesada, 2012)

- Lodos de calcio

Estos lodos inhiben el hinchamiento que ocurre en las arcillas y de esa manera controla el punto de cedencia que puede darse en cualquier perforación. Su característica principal es que una vez mezclado con cal, el contenido de bentonita se convierte en arcilla base calcio, generando una disminución de la viscosidad y como consecuencia, un aumento en la solidificación. Las concentraciones utilizadas pueden variar según la naturaleza del lodo y el contenido en agua natural desde 1 a 5 kg/m<sup>3</sup> y se denominan lodos de bajo contenido, hasta 15-50 kg/m<sup>3</sup> siendo lodos de alto contenido en cal. (Quesada, 2012)

- Lodos dispersos

Estos lodos tienen un alto contenido de bentonita y agentes dispersantes como lignosulfatos y lignitos, por esta razón dispersan fácilmente las arcillas, dejando las partículas floculando en un líquido y reduciendo la permeabilidad. Su aplicación es en pozos de mayor profundidad, puesto que el agente dispersante actúa frente a la estabilidad de la perforación, funcionando hasta en temperaturas de 180° C. Los estudios realizados muestran que estos materiales son capaces de desestabilizar arcillas con contenidos en montmorillonita, caolín, illita y cloritos. (Quesada, 2012)

- Lodos bajos en sólidos

A lo largo del tiempo la composición de este tipo de lodos ha ido variando. En la actualidad la mezcla está compuesta de agua dulce o agua salada, cloruro de potasio, un polímero de inhibición denominado poliacrilamida, un polímero encargado de generar la viscosidad, bentonita ya hidratada, almidón estabilizado, soda cáustica y otros lubricantes. Sin embargo, esa nueva mezcla ha cambiado de forma relativa algunas de las propiedades de estos materiales. Por ejemplo, al haber adicionado polímeros se limita la

temperatura a la que pueden estar expuestos (~120° C). Es importante considerar que, al ser sometidos a varios tratamientos para su preparación, este tipo lodos aumentan su valor monetario. (Quesada, 2012)

- Lodos saturados con sal

Los lodos saturados con sal están conformados por una base pre hidratada de bentonita, diversos aditivos como el almidón o carboximetilcelulosa que mejoran el control de pérdidas de los flujos existentes. Con respecto a su aplicabilidad en perforación, estos lodos luego de los de base de aceite y cloruro potásico, son los de mejor comportamiento. Es importante mencionar que en repetidas ocasiones no se usa este tipo de materiales por la dificultad que presentan en sus propiedades reológicas, puesto que al disminuir su concentración salina cabe la posibilidad que los recortes se dispersen en el lodo, lo cual produciría un problema de almacenamiento masivo en la perforación. (Quesada, 2012)

- Lodos con materiales poliméricos

Están conformados por una base de agua (dulce o salada) y materiales poliméricos como el almidón, gomas de “guar”, lignito, celulosa polianiónica, poliacrilatos, sulfonatos, ácidos poliaminados, metilglucosa, etc. Estos polímeros son de cadena larga, aumentando el peso molecular, produciendo una serie de factores importantes en las características del material. Algunos de esos factores generan una mejora del control de pérdidas de filtrado, mantenimiento de la estabilidad de las zonas perforadas, estabilidad térmica, prevención de la corrosión y mejora en la trabajabilidad. El costo elevado es la mayor desventaja que presenta este tipo de lodos, debido a que los polímeros son una nueva tendencia generando ello su alto valor monetario. (Quesada, 2012)

- Lodos base aceite

Por su naturaleza, este tipo de lodo está condicionado a otro tipo de regulaciones ante su aplicación en cualquier tipo de obra. La cantidad de aceites diésel y minerales como fluido base, pueden generar problemas medio ambientales, por esa razón está prohibido en zonas marinas. No obstante, las normas ambientales europeas prohíben el uso de lodo de base de aceite, por esa razón los pozos de alta temperatura son perforados con lodos de base agua. Un elemento muy común de estos fluidos son los cromo-lignosulfonatos que actúan como un dispersante de alta calidad, además de conferir un excelente control de la pérdida de flujo y de las propiedades reológicas. No obstante, los continuos cambios en las normativas medioambientales hacen que surjan dudas sobre la utilización de estos elementos por su composición de base cromo, por lo que se ha investigado sobre otro tipo de lodos basado en arcillas y polímeros capaces de proporcionar casi las mismas características que los lodos de base de aceite. (Quesada, 2012)

- Lodos de base sintética

El principal problema que presentan los lodos en base de aceite es la capacidad nula para su biodegradación. Además, la estricta legislación obliga a muchas empresas a controlar los derrames fuera de la costa. Los lodos sintéticos dependen del nivel de biodegradación y bioacumulación que se requiera (por ejemplo, los materiales con contenido en oxígeno se degradan más fácilmente) y de la eliminación parcial o total que quiera hacerse de los hidrocarburos aromáticos (que condicionan la toxicidad del aceite). La mejor manera de clasificar los fluidos sintéticos dependerá de su solubilidad en el agua. (Quesada, 2012)

b) Aplicación del lodo bentonítico con cal

Los lodos que provienen de la construcción subterránea son materiales que tienen una serie de condiciones que desfavorecen al medioambiente, la mayoría son depositados en vertederos autorizados o incluso no autorizados por la legislación vigente. En EEUU se ha aplicado mucho la

técnica lodo-cal a lo largo del tiempo, en su mayoría en pistas de aeropuertos. Por ejemplo, en los aeropuertos de Denver, Dallas Ft. Worth y Newark se ampliaron las pistas de aterrizaje y despegue con materiales de obras cercanas tratados con cal. Sin embargo, al tratarse de pistas que iban a estar expuesta a varias tensiones, optaron en utilizar lechada de cal ya que a que la cal seca podía empolvar los aviones y el equipo mecánico. En 1994 se puso en práctica esta técnica sobre las ruinas de Angkor localizadas en Camboya. El proyecto fue realizado por el gobierno japonés y se centró en estabilizar con cal los lodos alrededor del edificio central, para que no se produjeran desprendimientos. Los resultados obtenidos demostraron que el uso de la cal aumentaba la capacidad portante, con lo que disminuían las oportunidades de derrumbe. (Quesada, 2012)

En el año 2000 en el aeropuerto del Prat en Barcelona se dieron problemas por el asentamiento limo-arcilloso sobre el terreno en el que estaba construido el aeropuerto y por su cercanía con el nivel freático. Luego de muchos estudios, los investigadores eligieron como solución a la problemática, la utilización de materiales cercanos al propio aeropuerto, tratados con cal en una capa de 40 cm. de espesor. Los resultados fueron tan buenos que se aplicaron en pistas de aterrizajes. (Quesada, 2012)

En el año 2006 se inauguró la prolongación de la línea 11 del metro de Madrid, durante esta obra fueron reutilizados 165.000 m<sup>3</sup> de lodos generados en la excavación, fueron tratados con un 2 % de cal para su aplicación en los caballones anti-ruido de la R-5. (Quesada, 2012)

c) Tipos de cal

- Cales aéreas

Según (Usedo Valles, 2015), este tipo de cales son producidas por un proceso de calcinación de dolomías o calizas, compuestas principalmente de óxido e hidróxido de calcio y magnesio. No presentan propiedades hidráulicas ya que no se endurecen en presencia con agua.

Uno de sus principales características es que se endurecen en contacto con CO<sub>2</sub> que proviene del aire y su obtención viene de rocas calizas con 95% a más de carbonatos (Bauzá Castelló, 2015).

- Cales hidráulicas

Según (Usedo Valles, 2015), este tipo de cal está constituido principalmente por silicatos, aluminatos de calcio e hidróxido de calcio, los cuales sufren endurecimiento y fraguado al ser mezclados con agua. Provenientes mediante un proceso de calcinación.

d) Presentación de la cal

- Cal viva

Este tipo de cal proviene principalmente del proceso de calcinación, su presentación final es en forma de grano o molidas en polvo el cual no se encuentra hidratado. (Bauzá Castelló, 2015).

En el manejo de la cal viva hay que tener mucho cuidado ya que al contacto con agua o con la humedad del ambiente, se genera la hidratación de los óxidos conocida como una reacción fuerte exotérmica, lo cual pone en peligro la seguridad del personal que lo está trabajando.

- Cal apagada

Este tipo de cal proviene principalmente de la hidratación de la cal viva, su presentación final es en forma de lechada, pasta o en polvo seco. (Bauzá Castelló, 2015).



Tabla N° 5  
Comparativa de Cal Viva y Cal Apagada.

Forma	Ventajas	Inconvenientes
Cal viva (polvo)	<ul style="list-style-type: none"> <li>* La proporción de óxido de calcio es más alta para igual peso</li> <li>* Se puede usar para el secado del soporte o medio</li> <li>* Permite trabajar en más épocas del año (la cal "calienta" el suelo)</li> <li>* Ahorra costes de transporte</li> <li>* Al tener mayor densidad aparente su almacenamiento es más económico</li> <li>* Su aplicación es más rápida que en lechada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Es un material inestable para su almacenamiento</li> <li>* Su aplicación es peligrosa</li> <li>* Genera la emisión de polvo en la extensión</li> <li>* Requiere normalmente la aplicación de agua posterior para su empleo y para su apagado</li> </ul>
Cal apagada en polvo	<ul style="list-style-type: none"> <li>* No presenta riesgos de aplicación</li> <li>* Su aplicación es más rápida que en lechada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Requiere más cantidad para proporcionar la misma actividad que la cal viva</li> <li>* Genera la emisión de polvo en la extensión</li> </ul>
Cal apagada en lechada	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Sirve para humectar el soporte o medio que lo recibe a la vez que se aplica</li> <li>* Es más fácil asegurar una distribución homogénea</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Su transporte se encarece porque se mueve agua</li> <li>* Requiere incorporar medios especiales de almacenamiento y extensión</li> </ul>

Fuente: Elaborado por Bauzá Castelló, 2015.

e) Propiedades de la cal

- Densidad aparente

Según (Bauzá Castelló, 2015), sus valores varían según su presentación, para la cal viva va desde 700 – 1200 kg/dm<sup>3</sup> y para la cal apagada de 300 – 1000 kg/dm<sup>3</sup>, los cuales dependen mucho del peso específico presente en el óxido de calcio puro el cual presentan valores mayores a 3 kg/dm<sup>3</sup> dando una porosidad nula.

- Finura de grano

Por lo general la cal comercial presenta de 75% a 95% de material los cuales presentan un tamaño inferior a 200 µm. Lo cual mientras más fino es influye para una mejor eficiencia de las reacciones. (Bauzá Castelló, 2015).

f) Economía circular

- Origen de la economía circular

El origen de la economía circular no está definido, a pesar de que se habla de ello desde hace mucho tiempo atrás, hablar del de su origen

relacionado con sostenibilidad a existido desde los 70 del siglo XX, en los noventa se logró conceptualizarlo de una forma más completa gracias a los aportes de Pearce y Turner quienes fueron los pioneros de la economía circular. (Montenegro E. y Sandoval Y., 2021)

El concepto de economía circular, logró establecerse en los procesos productivos y en el marco legislativo de los años 80, siendo Alemania la pionera. Esto significo, terminar con los modelos de economía lineal, prolongando la vida útil de los productos. La fundación Ellen MacArthur en estos últimos años se ha encargado de difundir y promoción de la economía circular. (Montenegro E. y Sandoval Y., 2021)

Año	Acontecimientos
1937	Ludwig von Bertalanffy desarrolla un primer esbozo de lo que sería la <i>teoría general de sistemas</i> publicada formalmente en 1969.
1950	La metodología de dinámica de sistemas es desarrollada por Jay Forrester en el MIT.
1966	Kenneth Boulding propone una economía de flujos circulares.
1968	Garret Harding publica <i>La tragedia de los comunes</i> .
1970	John T. Lyle sentó las bases del diseño regenerativo.
1972	El trabajo dirigido por Donella H. Meadows y Denis Meadows, <i>Los límites del crecimiento</i> , argumenta a favor de la reutilización y el reciclaje de productos.
1976	Walter Stahel propone la extensión de la vida útil de productos haciendo énfasis en los residuos generados al final de su uso. Asimismo, desarrolla el concepto de <i>economía del rendimiento</i> .
1980	William McDonough y Michael Braungart analizan la idea de una economía basada en bucles (circular).
1989	Frosch y Gallopoulos desarrollan el concepto de <i>ecología industrial</i> .
1990	David Pierce y Kerry Turner acuñan el concepto de <i>economía circular</i> .
2000	Marian Chertow establece las bases del estudio de la <i>simbiosis industrial</i> , que analiza la recuperación de recursos para su reutilización.
2003	Janine Benyus publica su libro <i>Biomímesis</i> , que habla sobre la emulación de los sistemas naturales.
2010	Nace la Fundación Ellen MacArthur con el fin de acelerar la transición hacia una economía circular.
2010	Gunter Pauli publica su libro <i>La economía azul</i> exponiendo conceptos como los flujos de efectivo múltiples y los negocios en cascada.

Figura N° 35: Acontecimientos en la evolución de la economía circular.  
Fuente: Raufflet, Portales, García, Lozano y Barrera (2017).

- Definición de la economía circular

El objetivo de la economía circular es que el producto siempre se maneje de manera circular, quiere decir que al terminar su vida útil se pueden reutilizar para generar nuevos productos y de esa manera no se agotan los recursos. La economía circular es un sistema industrial enfocado en restaurar, poniendo como opción el rediseño de productos, sistemas de negocios y de producción; de manera que se logre la eliminación de todos los residuos. (Montenegro E. y Sandoval Y., 2021)

La economía circular plantea reconstituir y regenerar enfocado en el diseño como objetivo principal, la conservación de los productos, materiales, etc., para su uso en un nivel máximo diferenciado entre ciclos biológicos y ciclos técnicos. La economía circular es el desarrollo de resultados que siempre están enfocados en ayudar y mejorar la preservación y el aumento del capital natural, de esta manera se optimizan los recursos y se minimizan riesgos. (Montenegro E. y Sandoval Y., 2021)

- Principios de la economía circular

La economía circular tiene tres principios básicos:

- Principio 1

Se basa en la protección y mejora en el capital humano, siempre cuidando las reservas limitadas, controlando los flujos de energías renovables y a medida que sea necesario algún recurso, el sistema elige con buen juicio las tecnologías y procesos que utilizan recursos renovables si es viable. (Espaliat, 2017)

- Principio 2

Tiene como objetivo mejorar el rendimiento de los recursos distribuyendo productos, componentes y materias para obtener máximas ganancias en los ciclos técnicos y biológicos. Los sistemas circulares aumentan la cantidad de ciclos consecutivos de cada ciclo, maximizando la vida útil de los productos e incentivando la reutilización. Así mismo, distribuyendo los recursos aumenta el aprovechamiento y reutilización de los productos, subproductos y los residuos valorizables. (Espaliat, 2017)

- Principio 3

Está enfocado en promover la eficiencia de los sistemas, identificando y retirando las partes negativas externas del diseño, eliminando las pérdidas en la alimentación, el transporte, la educación, la salud y el ocio, y teniendo el control correcto de los factores externos importantes, como el uso del suelo, la

contaminación del aire y del agua, o los residuos tóxicos.  
(Espaliat, 2017)

- Características de la economía circular
  - Eliminación de los residuos desde el diseño
  - Los recursos biológicos no dañan al medio ambiente y pueden retornar a la superficie mediante el proceso de compostaje o digestión anaeróbica. Los recursos técnicos se diseñan para ser recuperados, reparados y mejorados, aminorando el suministro de energía necesaria para incrementar la retención del valor. (Espaliat, 2017)
  - Generación de solidez a través de la diversidad
  - La economía circular tiene en cuenta la diversidad porque genera solidez, por esa razón es un impulso importante de versatilidad y resiliencia. Tomando como ejemplo, las empresas grandes ofrecen volumen y eficacia, en cambio las empresas pequeñas ofrecen variedad de opciones de sus diferentes actividades que contribuyen a la estabilidad. (Espaliat, 2017)
  - Impulsión de la economía con energías renovables
  - Con la finalidad de disminuir la dependencia de los recursos finitos y maximizar la fortaleza de los sistemas en una crisis, es necesario utilizar energías renovables que incentivan a la economía circular. (Espaliat, 2017)
  - Pensar en sistemas
  - El pensamiento basado en sistemas se utiliza de forma general. Tanto las empresas, las personas o las plantas son parte de sistemas complejos que están fuertemente relacionados entre sí. Estos vínculos deben ser constantes y permanentes para el implemento de una economía circular. (Espaliat, 2017)
  - Reflejar los costes reales en precios y mecanismos de retroalimentación
  - Los precios actúan como modelos por lo cual deben ser expuestos con transparencia, eliminando todo aquello que distorsione su

valor real, por el contrario, se obstaculizaría el camino a la economía circular. (Espaliat, 2017)

### 2.1.3 Definición de términos básicos

- a) Excavación: Proceso que consiste en efectuar una cavidad con formas geométricas en el terreno, en el rubro de la construcción se realiza manualmente o con uso de maquinarias pesadas. (Environmental Resources Management, 2015)
- b) Residuos Sólidos: Son los desechos en estado sólido o semisólido generados por las personas, los cuales no cuentan con valor económico. (Cotrino, 2018)
- c) Impactos Ambientales: Es la modificación de la línea base del medio ambiente ocasionado por acción del hombre o por acción natural, generando un resultado positivo o negativo. (Aguila, 2020)
- d) Túneles: Vía Subterránea, abierta de modo artificial para el transporte de personas o vehículos. (González Pascual, 2017)
- e) Escombreras: Lugar destinado para el depósito de los desechos ocasionados por las obras civiles. (Aguila, 2020)
- f) Vertederos: Espacio destinado para la deposición final de la basura. (Aguila, 2020)
- g) Mitigar: Proceso de atenuar una situación negativa. (Aguila, 2020)
- h) RCD: Residuos de Construcción y Demolición, con naturaleza inerte, generados en las obras civiles como, construcción, demolición, excavación, etc. (Aguila, 2020)
- i) Tuneladora TBM: Máquina usada para la excavación de túneles a sección completa, a su vez se encarga de colocación de soportes si es que lo requiere. (González Pascual, 2017)
- j) Bentonita: Es una arcilla conformada con iones de sodio, el cual al ser mezclada con agua se expande y debido a sus propiedades coloidales son usados para la excavación de túneles. (Quesada, 2012)
- k) La cal: “La cal es un material conglomerante que proviene de la calcinación de piedras calizas, la cual puede variar desde cales con alto grado de pureza hasta cales hidráulicas con contenidos de menos de 50% de óxido de calcio”. (Moale Quispe & Rivera Justo, 2019)

- l) Subrasante: “La subrasante es la capa superior del terraplén o el fondo de las excavaciones en terreno natural, que soportará la estructura del pavimento” (Moale Quispe & Rivera Justo, 2019)
- m) Economía Circular: Es un modelo de producción y consumo que consiste en reparar, reutilizar, renovar, reciclar materiales y productos existentes para crear un valor añadido. (Espaliat, 2017)
- n) Límites de Atterberg: Son los límites de consistencia, que se aplican para caracterizar el comportamiento de los suelos finos, aunque su comportamiento varía a lo largo del tiempo. (RD N°18 2014 MTC, 2017)
- o) Suelo saturado: Son los suelos donde los espacios vacíos entre sus partículas están ocupados completamente por agua. (Villalobos, 2016)
- p) Copa de Casagrande: Es un instrumento de medición que se utiliza para determinar el límite líquido del suelo. (RD N°18 2014 MTC, 2017)
- q) Contenido de humedad: Es la relación expresada como porcentaje del peso de agua en una masa dada de suelo, al peso de las partículas. (Villalobos, 2016)

## CAPÍTULO III: SISTEMA HIPÓTESIS

### 3.1 Hipótesis

#### 3.1.1 Hipótesis principal

La Economía Circular del Lodo Bentonítico con Cal de excavaciones de la Línea 2 del Metro de Lima incidirá en el mejoramiento de Subrasante.

#### 3.1.2 Hipótesis secundarias

- a) La Clasificación según SUCS y AASHTO de una muestra de suelo tomada del Distrito de Lurín incidirá para la determinación de un suelo apto para subrasante.
- b) La determinación de la densidad seca máxima, porcentaje óptimo de humedad y CBR de una muestra de suelo de Lurín incidirá en la clasificación de subrasante.
- c) La determinación de la densidad seca máxima, porcentaje óptimo de humedad y CBR de una muestra de suelo de Lurín mezclado con 4% de Cal y 5% de Lodo bentonítico incidirá en la clasificación de subrasante.
- d) La determinación de la densidad seca máxima, porcentaje óptimo de humedad y CBR de una muestra de suelo de Lurín mezclado con 4% de Cal incidirá en la clasificación de subrasante.

### 3.2 Variables

#### 3.2.1 Definición conceptual de las variables

##### a) Variable independiente

En la Tabla N° 6 se describe la definición conceptual, definición operacional y dimensiones que corresponden a la variable independiente Economía circular del lodo bentonítico con cal. Para cada variable se ha realizado la definición operacional, de esta forma se definen las variables que se utilizan en las hipótesis de la investigación, de tal forma que puedan ser comprobadas y contextualizadas. (Hernandez R. , 2014)

TablaN° 6  
Variable Independiente.

	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores
<b>Economía Circular del Lodo Bentonítico Mezclado con Cal</b>	La economía circular tiene como objetivo principal que los productos siempre se manejen de manera circular, quiere decir que al finalizar su vida útil se pueden reutilizar dando origen a nuevos productos y de esa manera evitamos que se agoten los recursos (Montenegro R. y Sandoval Y, 20219, Aplicado en lodos bentoníticos que es material utilizado en las perforaciones profundas, que al ser mezclado con cal mejoran la estabilidad de los suelos (Quesada, 2012)	La economía circular se realizará utilizando el lodo bentonítico proveniente de las perforaciones de la construcción del metro de Lima, se realizará la clasificación para definir el tipo de lodo ha utilizado, se evaluará que tipo de cal es la adecuada y la cantidad necesaria para conseguir la mezcla óptima para su reutilización.	Tipos de Lodo Bentonítico	Lodos Líquidos Lodos Neumáticos Lodos Mixtos
			Aplicación de Lodo con Cal	Ingeniería Civil
			Tipos de Cal	Cales con Alto Contenido de Calcio Cales Dolomíticas Cales Hidráulicas Cales Aéreas
			Presentación de Cal	Cal Viva (Polvo) Cal Apagada (Polvo) Cal Apagada (Lechada)
			Propiedades de la Cal	Densidad Aparente Finura de Grano Solubilidad en Agua Origen de la Economía Circular Definición de la Economía Circular
			Economía Circular	Principios de la Economía Circular Características de la Economía Circular Ingeniería Civil

Fuente: Elaboración propia, 2022.Variable Dependiente



b) Variable Dependiente

En la Tabla 7 se describe la definición conceptual, definición operacional y dimensiones que corresponden a la variable dependiente Mejoramiento de subrasante.

Tabla N° 7  
Variable Dependiente.

Variable	Definición conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores
<b>Mejoramiento de la Subrasante</b>	Es el mejoramiento de las propiedades para optimizar la capacidad portante de la subrasante, que es la capa superior del terraplén o el fondo de las excavaciones en terreno natural, que soportará la estructura del pavimento (Moale Quispe & Rivera Justo, 2019)	En el mejoramiento de la Subrasante se evaluará las propiedades del suelo, mediante un proceso de ensayos de mecánica de suelos como ensayo granulométrico, Límite de Atterberg, Ensayo de Proctor Modificado y finalmente el de CBR con el que se determina la resistencia de soporte del suelo.	Clasificación de Subrasante	Categorías de la Subrasante
			Tipos de Estabilización	Por Combinación de Suelos
				Por Sustitución
				Estabilización con Cal
			Ensayos de Laboratorio	Estabilización con Cemento
				Estabilización con Cloruro de Sodio
Estabilización con Cloruro de Calcio				
Ensayos para Determinar sus Propiedades	Estabilización con Cloruro de Magnesio			
	Estabilización por Compactación			
	Ensayo de Granulometría por Tamizado			
	Límites de Atterberg			
	Ensayo de Proctor Modificado			
	Ensayo CBR			

Fuente: Elaboración propia, 2022

### 3.2.2 Operacionalización de las Variables

En la Tabla 8 se muestra la Operacionalización de las variables donde se detallan las dimensiones, indicadores, unidades e instrumentos correspondientes a las variables dependiente e independiente, Mejoramiento de subrasante y Economía circular del lodo bentonítico mezclado con cal, respectivamente.

Tabla N° 8  
Matriz de Operacionalización de Variables.

Variable	Dimensiones	Indices	Unidades	Instrumento
Mejoramiento de Subrasante	Clasificación de Subrasante	Categorías de la Subrasante	Porcentaje	Hoja de Cálculo
	Tipos de Estabilización	Por Combinación de Suelos	Nominal	Hoja de Cálculo
		Por Sustitución	Nominal	Hoja de Cálculo
		Estabilización con Cal	Nominal	Hoja de Cálculo
		Estabilización con Cemento	Nominal	Hoja de Cálculo
		Estabilización con Cloruro de Sodio	Nominal	Hoja de Cálculo
		Estabilización con Cloruro de Calcio	Nominal	Hoja de Cálculo
		Estabilización con Cloruro de Magnesio	Nominal	Hoja de Cálculo
		Estabilización por Compactación	Nominal	Hoja de Cálculo
	Estabilización por Geosintéticos	Nominal	Hoja de Cálculo	
	Ensayos de Laboratorio	Ensayo de Granulometría por Tamizado	Porcentaje	Tamices/Hoja de Cálculo
		Limites de Atterberg	Porcentaje	Copa Casagrande/Hoja de Cálculo
		Ensayo de Proctor Modificado	gr/cm <sup>3</sup> y %	Martillo Compactador/Hoja de Cálculo
	Ensayos para determinar sus propiedades	Ensayo de CBR	Lbs/pulg <sup>2</sup> y %	Equipo para CBR/Hoja de Cálculo
Economía Circular del Lodo Bentonítico Mezclado con Cal	Tipos de Lodo Bentonítico	Lodos Líquidos	Nominal	Hoja de Cálculo
		Lodos Neumáticos	Nominal	Hoja de Cálculo
		Lodos Mixtos	Nominal	Hoja de Cálculo
	Aplicación de Lodo con Cal	En Ingeniería civil	Nominal	Hoja de Cálculo
	Tipos de Cal	Cales con alto contenido de Calcio	Nominal	Hoja de Cálculo
		Cales Dolomíticas	Nominal	Hoja de Cálculo
		Cales Hidráulicas	Nominal	Hoja de Cálculo
		Cales Aéreas	Nominal	Hoja de Cálculo
	Presentación de Cal	Cal Viva (polvo)	Nominal	Hoja de Cálculo
		Cal apagada (polvo)	Nominal	Hoja de Cálculo
		Cal apagada (lechada)	Nominal	Hoja de Cálculo
	Propiedades de Cal	Densidad Aparente	kg/dm <sup>3</sup>	Balanza/Hoja de Cálculo
		Finura de Grano	Porcentaje	Tamices/Hoja de Cálculo
Solubilidad en Agua		kg/m <sup>3</sup>	Hoja de Cálculo	
Economía Circular	Origen de la economía circular	Nominal	Hoja de Cálculo	
	Definición de la economía circular	Nominal	Hoja de Cálculo	
	Principios de la economía circular	Nominal	Hoja de Cálculo	
	Características de la economía circular	Nominal	Hoja de Cálculo	

Fuente: Elaboración propia, 2022

## CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

### 4.1 Tipo y nivel

#### 4.1.1 Tipo de investigación

La investigación de tipo aplicada, se basa en buscar, conocer, actuar, construir y modificar la realidad de la problemática, su principal interés es la aplicación inmediata sobre una problemática. (Borja, 2016)

Por esa razón nuestra investigación es de tipo aplicada ya que tiene como prioridad la aplicación de la economía circular del lodo bentonítico mezclado con cal para el mejoramiento de la subrasante.

#### 4.1.2 Nivel de investigación

La investigación por su nivel de profundidad puede ser exploratoria, descriptiva, correlacional o explicativa (Hernandez R. , 2014). Nuestra investigación es descriptiva y explicativa ya que se realizarán ensayos a las muestras recolectadas para poder lograr demostrar las hipótesis planteadas y así conocer la incidencia de la economía circular del lodo bentonítico mezclado con cal para la mejora de la subrasante.

### 4.2 Diseño de investigación

#### 4.2.1 Tipo de diseño de investigación

Según (Hernandez R. , 2014) una investigación experimental se refiere a un estudio en el que se manipulan una o más variables independientes, para evaluar sus efectos que la manipulación tiene sobre las variables (variables dependientes).



Figura N° 36: Esquema de experimento y variables.  
Fuente: Hernández (2014).

Los requisitos para un experimento son: la manipulación intencional de una variable (variable independiente), la variable dependiente se mide para analizar qué efecto tubo, debido a la manipulación de la variable independiente y finalmente el manejo o verificación interna del estado del experimento, quiere decir, que solo la manipulación de la variable independiente deberá causar el efecto sobre ella y no debido a otros factores. (Hernandez R. , 2014)

a) Tipo de diseño experimental

- Estudio de pre-prueba y post-prueba con un solo grupo

En este tipo de diseño Experimental al objeto de estudio se le aplica una medición antes y después del estímulo para comprobar la evolución de la variable dependiente. En este caso existe un punto de referencia inicial para analizar el comportamiento del objeto (Borja, 2016) , en nuestro caso se evaluará la capacidad de la subrasante antes y después de la aplicación del lodo bentonítico mezclado con cal.

#### 4.2.2 Enfoque de investigación

La investigación cuantitativa propone que una manera segura y confiable para conocer la realidad se da mediante la recolección y análisis de datos, y de esta manera se podría contestar las interrogantes de la investigación y comprobar las hipótesis. (Borja, 2016)

Según (Borja, 2016) este tipo de investigación confía en la medición numérica, el conteo y frecuentemente en el uso de la estadística para establecer con exactitud patrones de comportamiento en una población.

#### 4.2.3 Método de investigación

Se denomina método inductivo a la forma como un razonamiento lógico tomando como punto de partida de la investigación de casos particulares, puede desarrollar una conclusión general, es por ello, que el investigador hace la generalización a partir de la observación de una muestra representativa del objeto en estudio. (Borja, 2016)

#### 4.2.4 Población y muestra

La población de estudio de la presente investigación es el Lodo bentonítico proveniente de la construcción del Metro de Lima.

Viéndolo estadísticamente, se define población o Universo al conjunto de elementos que serán objeto de estudio (Borja, 2016).

La muestra de la investigación corresponde al lodo bentonítico proveniente de la construcción del tramo “Etapa 2” de la Línea 2 del Metro de Lima.

Se utiliza la estadística para seleccionar una fracción de la población, la cual deberá cumplir la siguiente condición: “Con una probabilidad P, todas las conclusiones que se infieran de ella, deberán tener validez para todo el universo (Borja, 2016).



Figura N° 37: Línea 2 del metro de Lima.  
Fuente: Sociedad concesionaria Metro de Lima Línea 2 (2016).

#### 4.3 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La recolección de datos es un proceso que implica principalmente tres actividades que llevan relación entre sí, como primera actividad, define el instrumento de recolección de datos el cual deberá de contar con confiabilidad y validez, la segunda actividad es utilizar el instrumento y aplicarlo a la muestra de estudio, quiere decir obtener observaciones, registros o mediciones de variables y finalmente como tercera actividad el análisis de la información recopilada. (Borja, 2016)

#### 4.3.1 Tipos de técnicas e instrumentos

Observación Directa: Se realizará una visita al proyecto para visualizar las condiciones con las que se gestiona el lodo bentonítico para realizar una caracterización de los mismos.

Análisis de Documentos: Se analizó investigaciones previas, reglamento, artículos científicos y Manuales.

#### 4.3.2 Criterios de validez y confiabilidad de los instrumentos

Según (Olivares & De la Cruz, 2020)“La validez es una cualidad del instrumento que consiste en que este sirva para medir la variable que se busca medir, y no otra, es decir, que sea el instrumento preciso, el adecuado.”

La validez de esta investigación va a ser revisada y verificada por especialistas en la materia de la rama de ingeniería civil y ambiental, se encargarán de revisar a detalle los instrumentos utilizados para la recolección de datos.

En nuestra investigación la confiabilidad se basa en todos los ensayos, cálculos, tablas, gráficos y resultados que están sustentados en tesis de pregrado, postgrado, trabajos de investigación, libros y revistas científicas con artículos aprobados por las máximas entidades en cuestiones de investigación.

#### 4.3.3 Procedimientos para la recolección de datos

En la presente investigación se realizaron siguientes etapas:

- Recopilación de información: Se revisó trabajos de grados, libros, normas y reglamento, artículos, proyectos de investigación, sobre la economía circular y aplicaciones de la mezcla del lodo bentonítico con cal.
- Se caracterizarán los residuos de los lodos bentoníticos proveniente de las perforaciones con la tuneladora para evaluar y poder definir las cantidades y tipos de cal que se utilizarán para las muestras que serán ensayadas en los laboratorios.
- Se realizará una entrevista a la empresa cuya función es la gestión de eliminación del lodo Bentonítico para conocer el proceso que emplea y las cantidades eliminadas.



#### 4.4 Técnicas para el procesamiento y análisis de la información

El análisis de procesos implica revisar, reconocer con criterio, mirar todos los componentes e inspeccionar cada variable.

Para nuestra investigación se propuso cuatro pasos para poder desarrollar nuestra metodología las cuales consisten en:

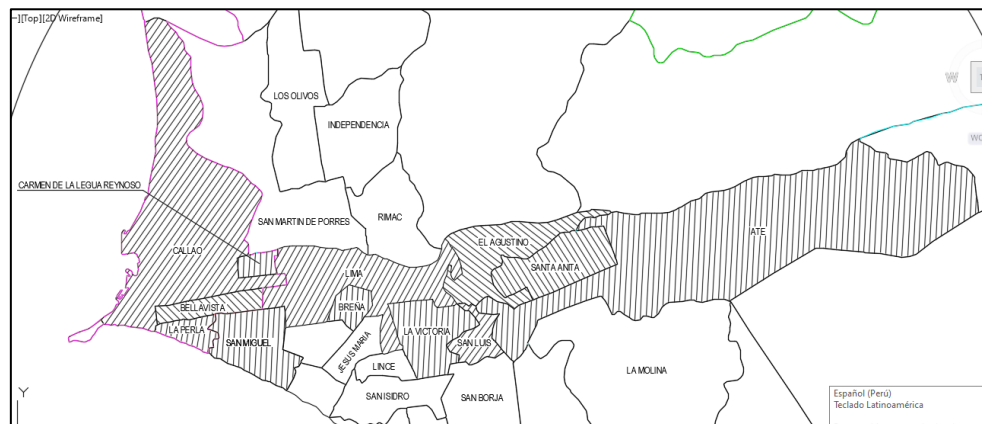
- a) Recopilación de información: Aquí se buscó información existente y relacionada con nuestro tema de estudio, la cual nos permitirá entender la situación de los residuos de lodo bentonítico en las perforaciones y sus aplicaciones para mejorar la resistencia en las subrasantes en nuestro país y en el mundo.
- b) Análisis de Información y Resultados: Ya finalizado nuestro estudio de la realidad problemática se procede a la recopilación de muestras de lodo bentonítico para los respectivos ensayos, que nos ayudaran a definir las características de los mismo y de esa manera poder determinar el tipo y cantidad de cal que será necesaria para lograr la resistencia requerida en el mejoramiento de la subrasante, la cual será verificada con los ensayos de CBR para calcular la capacidad de carga del suelo, como ya se ha descrito todo lo anterior se llevara a cabo mediante ensayos, en los cuales se utilizaran sus respectivos instrumentos, hojas de cálculos en el programa Excel, sus respectivos ábacos y parámetros para la determinación de resultados.
- c) Resultados: En esta etapa se determinará la veracidad de nuestras hipótesis, si la economía circular de los lodos bentoníticos procedentes de las perforaciones de la construcción del metro de Lima mezclados con cal, mejoraran la resistencia de la subrasante.

# CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

## 5.1 Diagnóstico y situación actual: Línea 2 del Metro de Lima

### 5.1.1 Ubicación del proyecto

El proyecto de Línea 2 del Metro del Lima principalmente une los distritos de Ate, Santa Anita con los del Centro de Lima y Callao.



*Figura N° 38:* Distritos a intervenir por ejecución de obras.  
Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N° 9  
Trazo del proyecto

LÍNEA	PROVINCIA	DISTRITOS	TRAZO
LÍNEA 2 (Eje Este-Oeste)	Lima - Callao	Ate	-Av. Víctor Raúl Haya de la Torre (Carretera Central).
		Santa Anita	-Av. Nicolás Ayllón.
		San Luis	-Av. 28 de Julio.
		El Agustino	-Av. Paseo de la República
		La Victoria	-Av. Paseo Colón.
		Breña	-Av. Arica.
		Cercado de Lima	-Av. Venezuela.
		Bellavista	-Av. Germán Amézaga.
		Cercado del Callao	-Av. Oscar R. Benavides.
			-Av. Guardia Chalaca.

Fuente: Environmental Resources Management, 2015.

Tabla N° 10  
Ubicación de estaciones

ID	Estación	Progresiva	Distancia (m)	Cercanía a
1	Puerto Callao	0+317.50	1625.83	Ovalo Garibaldi
2	Buenos Aires	1+943.33	1121.05	Av. Buenos Aires
3	Juan Pablo II	3+064.38	972.50	Av. Santa Rosa
4	Insurgentes	4+036.88	891.90	Av. Los Insurgentes
5	Carmen de la Legua L2	4+928.78	948.13	Av. Elmer Faucett
6	Oscar Benavides	5+876.91	1073.61	Ca. Ricardo Palma
7	San Marcos	6+950.52	875.62	Av. Universitaria
8	Elio	7+826.14	873.18	Av. Santa Bernardita
9	La Alborada	8+699.32	928.41	Av. La Alborada
10	Tingo María	9+549.80	813.66	Av. Tingo María
11	Parque Murillo	10+441.39	908.05	Av. Bolivia
12	Plaza Bolognesi	11+349.44	705.32	Pz. Bolognesi
13	Estación Central	12+054.76	1194.82	Paseo de la República
14	Plaza Manco Cápac	13+249.44	790.45	Av. Marco Capac

Fuente: Environmental Resources Management, 2015.

Tabla N° 11  
Ubicación de estaciones.

ID	Estación	Progresiva	Distancia (m)	Cercanía a
15	Cangallo	14+040.03	838.34	Jr. Cangallo
16	28 de Julio	14+878.37	951.59	Av. Aviación
17	Nicolás Ayllón	15+829.96	852.19	Av. Riva Agüero
18	Circunvalación	16+682.15	828.72	Av. Circunvalación
19	Nicolás Arriola	17+510.87	1900.83	Clínica San Juan de Dios
20	Evitamiento	19+411.70	1059.44	Av. Evitamiento
21	Ovalo Santa Anita	20+411.70	1045.66	Av. La Molina
22	Colectora Industrial	21+516.80	1237.15	Av. 9 de Setiembre
23	La Cultura	22+753.95	805.89	Hospital Emilio Valdizán
24	Mercado Santa Anita	23+559.84	981.42	Av. La Cultura
25	Vista Alegre	24+541.26	1135.59	Av. Las Azucenas
26	Prolong. Javier Prado	25+676.85	1037.78	Prolong. Javier Prado
27	Municipalidad de Ate	26+714.63		Municipalidad de Ate

Fuente: Environmental Resources Management, 2015.

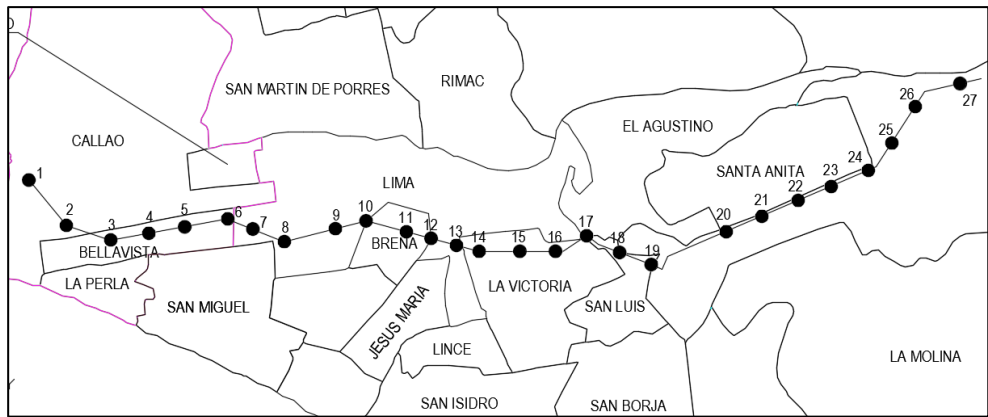


Figura N° 39: Ubicación de estaciones.  
Fuente: Elaboración Propia.

Actualmente el tramo donde se encuentra el proceso de excavación se ubica en la Av. Óscar R. Benavides (exColonial) entre la Av. Hipólito Unanue y Av. Enrique Meiggs.



Figura N° 40: Plan de desvío vehicular.  
Fuente: Metro de Lima Línea 2, 2022.

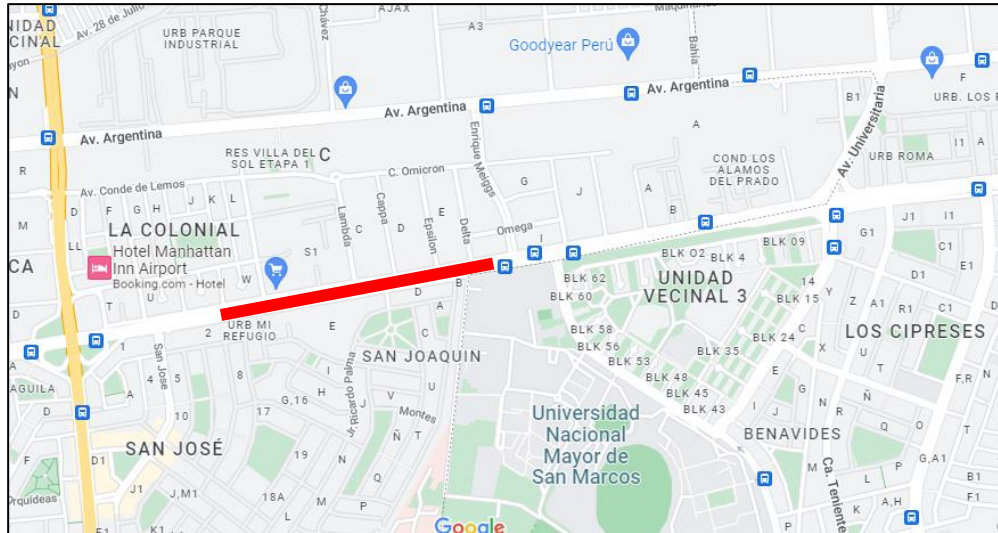


Figura N° 41: Zona de intervención estación E-06 Oscar R. Benavides.  
Fuente: Elaboración Propia.

### 5.1.2 Proceso constructivo

#### a) Metro subterráneo

Es el conjunto de trenes urbanos subterráneos ubicados en la ciudad, siendo esta una solución para el transporte masivo uniendo distritos de una misma ciudad en un tiempo reducido.

Los túneles dan solución al tráfico de las calles, agilizando el tráfico que muchas veces se ve afectado por la congestión vehicular, también se debe considerar que se ahorran espacios que pueden ser usados para edificaciones u otros fines. En la construcción de túneles subterráneos se excavan las calles de la ciudad, que posteriormente serán reconstruidas sobre el túnel.

En el siguiente proceso constructivo de Túneles para la construcción del Metro de Lima de la línea 2 específicamente la etapa 2 es necesario describir el proceso constructivo y el método usado en la construcción de las estaciones ya que posterior a ello se inicia el proceso de perforación con las tuneladoras.



*Figura N° 42:* Línea 2 del Metro de Lima.  
Fuente: Metro de Lima línea 2 (2020).

b) Proceso constructivo de las estaciones

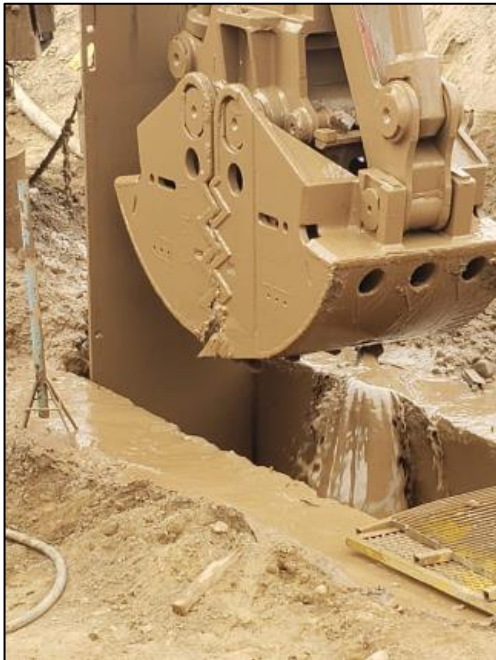
Para la ejecución del metro se utilizó el método “top down” es uno de los más usados actualmente para la construcción de túneles en el interior de la ciudad, no requiere de tanta maquinaria especializada y permite que las calles de la ciudad afectadas sean restablecidas en un menor tiempo (Piqueras, 2015).

- Inicialmente se construye las paredes perimetrales y columna de soporte de la estructura con muros pantallas o pilotes excavados, se procede con el vaciado de pilotes perimetrales y muros pantalla in situ in situ, cuidando que tengan un buen acabado y que estén aplomadas.





*Figura N° 43:* Perforación de muros pantallas.  
Fuente: Elaboración Propia (2020).



*Figura N° 44:* Perforación de muros pantalla con lodo bentonítico.  
Fuente: Elaboración Propia (2020).



*Figura N° 45: Perforaciones de muros pantalla.*  
Fuente: Elaboración Propia (2020).



*Figura N° 46: Armado de muro pantalla.*  
Fuente: Elaboración Propia (2020).



*Figura N° 47:* Vaciado de concreto muro pantalla.  
Fuente: Elaboración Propia (2020).

- Posteriormente se excava el interior hasta la cota del vestíbulo donde se ejecutará la losa de hormigón, se instalan las vigas prefabricadas en cabeza de las pantallas y ejecuta la losa de compresión superior para proceder con el relleno y restablecimiento de los servicios en superficie.

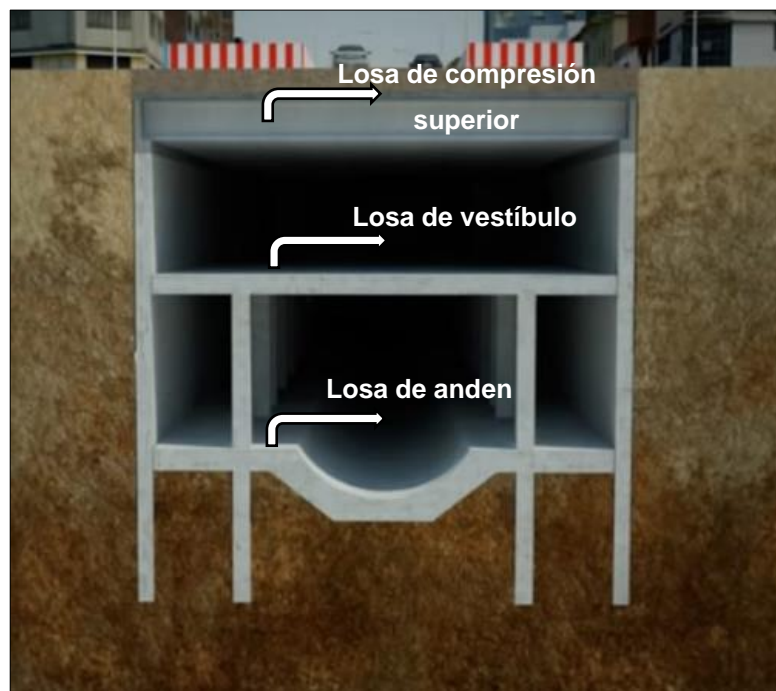


*Figura N° 48:* Losa de vestíbulo y viga prefabricada.  
Fuente: Andina agencia peruana de noticias (2022).



*Figura N° 49:* Losa de compresión.  
Fuente: Andina agencia peruana de noticias (2022).

- Finalmente, la excavación prosigue bajo la losa del vestíbulo a través de huecos dejados en la misma hasta la cota inferior de anden donde se ejecuta la losa de anden.



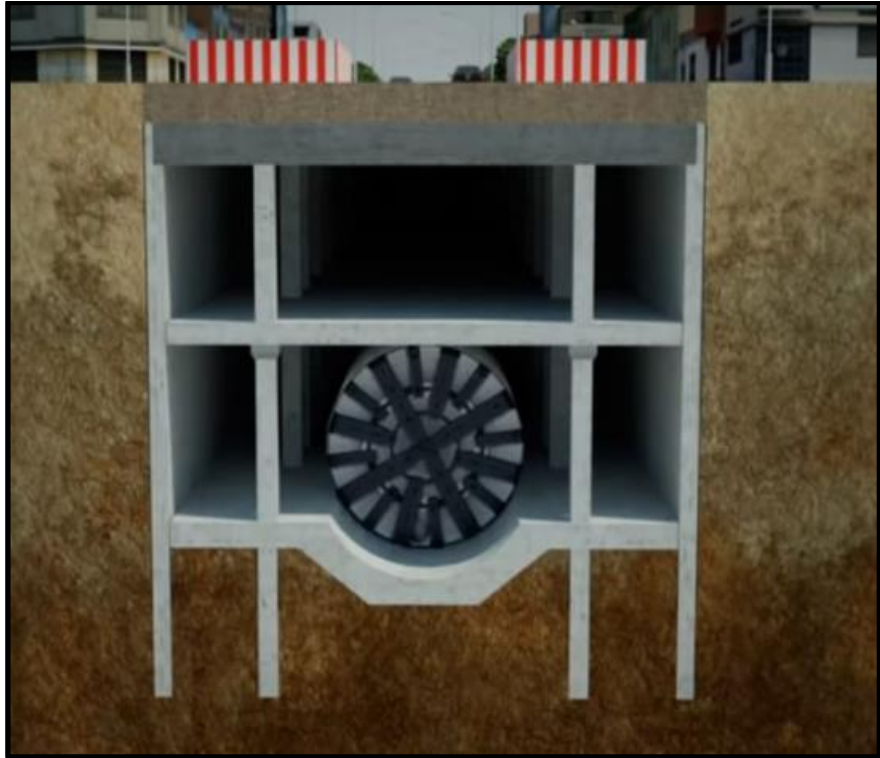
*Figura N° 50:* Losa de vestíbulo y losa anden.  
Fuente: Andina agencia peruana de noticias (2022).



*Figura N° 51:* Estación de Metro de Lima Línea 2.  
Fuente: Elaboración Propia (2020).

c) Proceso constructivo del túnel

- Sobre la losa del andén se ensambla la tuneladora que es la máquina que perfora los túneles para el metro de Lima, son tuneladoras de fabricación alemana de más de 120 metros y 75 metros de diámetro son las encargadas de perforar el suelo subterráneo, en promedio perfora 14ml por día mediante un proceso continuo quiere decir que mientras perfora se va transportando el material generado por la perforación en dos fajas transportadoras que trasladaran al material a la superficie, ambas fajas junto a la tuneladora funciona de manera sincronizada (Reyna, 2022).



*Figura N° 52:* Tuneladora en losa del andén.  
Fuente: Andina agencia peruana de noticias (2022).



*Figura N° 53:* Tuneladora Micaela para perforaciones húmedas.  
Fuente: Ministerio de transporte (2022).



*Figura N° 54:* Faja trasportadora inferior.  
Fuente: Andina agencia peruana de noticias (2022).



*Figura N° 55:* Faja transportadora superficial.  
Fuente: Andina agencia peruana de noticias (2022).



*Figura N° 56:* Armado de tuneladora.  
Fuente: Elaboración propia (2022).

- Las tuneladoras cuentan con un sistema el cual le permite colocar los soportes de concreto para sostener el túnel, los soportes también llamados dovelas son prefabricadas en una planta especializada, culminada la perforación las tuneladoras son retiradas del terreno.



*Figura N° 57:* Planta de dovelas de concreto.  
Fuente: Elaboración propia (2022).



*Figura N° 58:* Armado de dovelas de concreto.  
Fuente: Elaboración propia (2022).





*Figura N° 59:* Dovelas de concreto prefabricadas.  
Fuente: Elaboración propia (2022).



*Figura N° 60:* Tuneladora instalando dovelas de concreto.  
Fuente: Andina agencia peruana de noticias (2022).



*Figura N° 61:* Instalación de dovelas de concreto.  
Fuente: Andina agencia peruana de noticias (2022).

### 5.1.3 Excavación con cuchara

La excavación de los muros pantalla se realiza mediante cucharas, las Cucharas son cucharas mecánicas accionadas por cable con válvulas de sección semicircular/rectangular (para adaptarse a la huella dejada por la junta en el tacón), de 2.80/3.40 m de ancho y 80/100/120 cm de espesor (Pesos aprox. de 18 a 23 Ton) seleccionadas en función al espesor de muros pantalla a ejecutar en el proyecto. Estas cucharas se distinguen en el mercado por su peso y longitud (10,3 a 11,1 m), condiciones que optimizan la verticalidad obtenible. (Pilotes Terrates, 2020)

El nivel del lodo debe ser tal que en todo momento la presión hidrostática del lodo sea la suficiente para estabilizar las paredes de la excavación y prevenir el ingreso de partículas de suelo en el pozo. (Pilotes Terrates, 2020)

Como fluidos estabilizantes para la perforación se han considerado el uso de lodos bentoníticos y/o poliméricos. Las propiedades que debe satisfacer el lodo fresco, durante la perforación y durante el vaciado del concreto son las que exige la norma europea UNE EN 1538. Pilotes Terrates Perú fabricará y controlará el lodo de perforación en base a los requerimientos de la norma citada UNE EN 1538 (Pilotes Terrates, 2020)



*Figura N° 62:* Excavación con cuchara.  
Fuente: Pilotes Terrates (2020).

a) Montaje de planta de lodos.

La planta de lodo se montará idealmente en una superficie adyacente a cada estación, fuera del área interna de la misma, pero dentro del área de cerramiento de cada estación para evitar movilizaciones internas. Las losas que formarán la base de los tanques australianos serán construidas previamente por el Consorcio. Las losas tendrán un espesor de 15 cm y doble malla. (Pilotes Terrates, 2020)

En el esquema de la figura 4 adjunta se estiman las dimensiones de la planta típica.

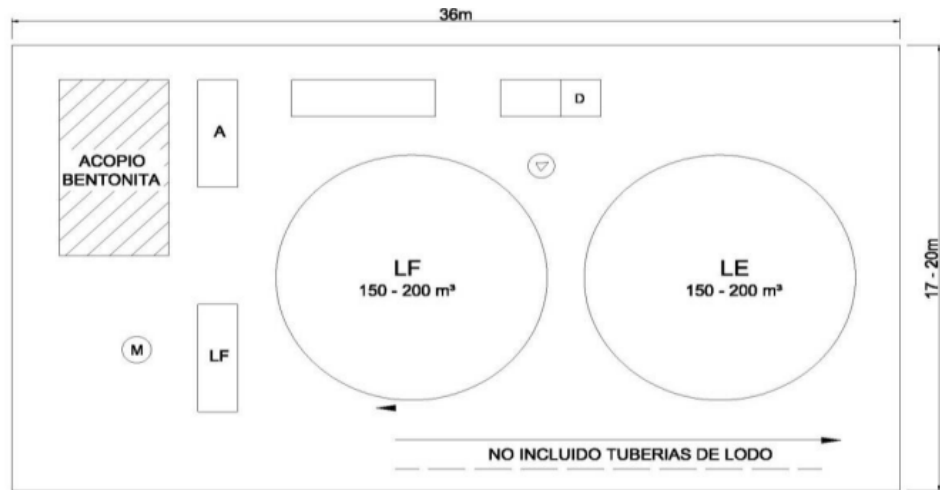


Figura N° 63: Planta típica de lodos.  
Fuente: Pilotes Terrates (2020).



Figura N° 64: Planta de lodos de la línea 2 del Metro de Lima.  
Fuente: Elaboración Propia (2022).

b) Sustitución de lodos de perforación.

Terminada la perforación del panel a la cota prevista se procederá al cambio de lodo. Para ello la bentonita de excavación será cambiada completamente por lodo fresco. El lodo de trabajo procedente del panel se desarenará primero y se devolverá al tanque de lodo de trabajo para ser reutilizado durante la excavación de paneles siguientes. Cuando el lodo de trabajo no cumpla con los parámetros de lodo apto para la excavación

según el punto 5.3.2), será descartado. Este proceso de sustitución podrá realizarse con dos técnicas a través del propio tubo tremie como medio, colocado hasta el fondo del panel, mediante bombas de succión directa en superficie dentro del citado tremie o mediante “air lift” impulsando aire comprimido por su interior cerca del fondo, siendo imprescindible que se compaginen los volúmenes de extracción del lodo de excavación con el del lodo fresco de aportación en la superficie. (Pilotes Terrates, 2020)



*Figura N° 65: Proceso de desarenado de lodo bentonítico.*  
Fuente: Elaboración Propia (2022).

c) Lodos a utilizar

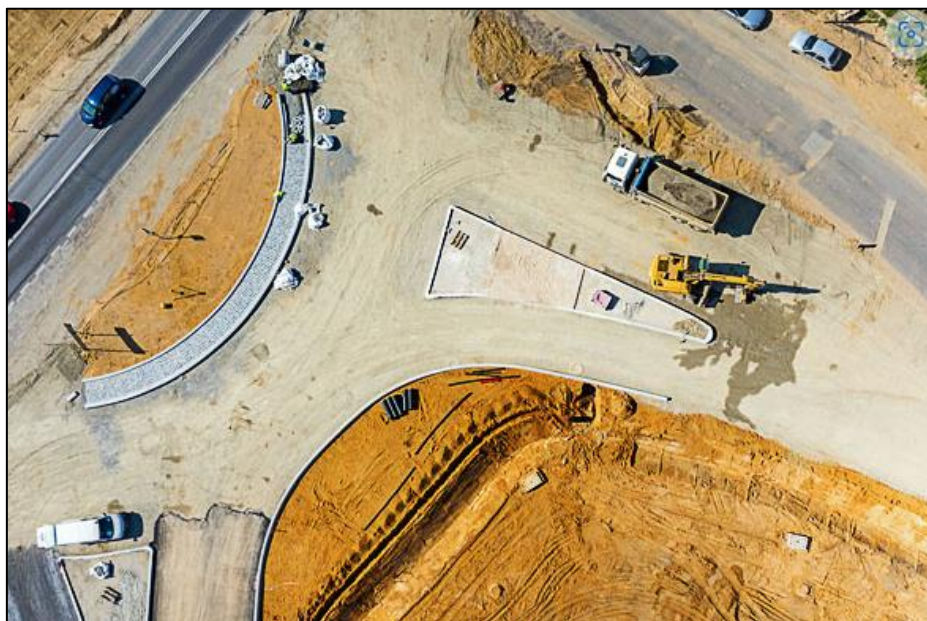
Como fluidos estabilizantes de la perforación se utilizarán lodos bentoníticos, Para su fabricación es necesario contar con un agua de amasado que cumpla con los mismos requerimientos del agua de amasado para concretos. Se prestará especial atención a la adecuada dosificación y maduración del lodo. Cabe señalar que las características del producto cambian según sea el tipo, procedencia, etc. por lo que puede ser necesario comprobar y corregir periódicamente las dosificaciones. (Pilotes Terrates, 2020)

<i>Propiedad</i>	<i>Fresca</i>	<i>Reutilizada</i>	<i>Antes de vaciado de concreto</i>
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	< 1.10	< 1.25	< 1.15
Viscosidad Marsh (s)	32 a 50	32 a 60	32 a 50
Contenido de arena (%)	N/A	N/A	<4
Perdida de fluido en cm <sup>3</sup>	< 30	< 50	No aplica
pH	De 7 a 11	De 7 a 12	No aplica
Cake en mm	< 3	< 6	No aplica

*Figura N° 66:* Parámetros de aceptación de lodos bentoníticos  
Fuente: Pilotes Terrates (2020).

d) Disposición final de lodos

La disposición final está a cargo de la empresa Birrak que se ubica en el distrito de Ventanilla, es una planta de transformación de residuos peligrosos y no peligrosos de la construcción para Lima y Callao, ellos se encargan de la recepción, valorización y disposición final del Lodo Bentonítico.



*Figura N° 67:* Planta Birrak en Ventanilla.  
Fuente: Birrak (2022).



Figura N° 68: Proceso de Birrak.

Fuente: Birrak (2022).

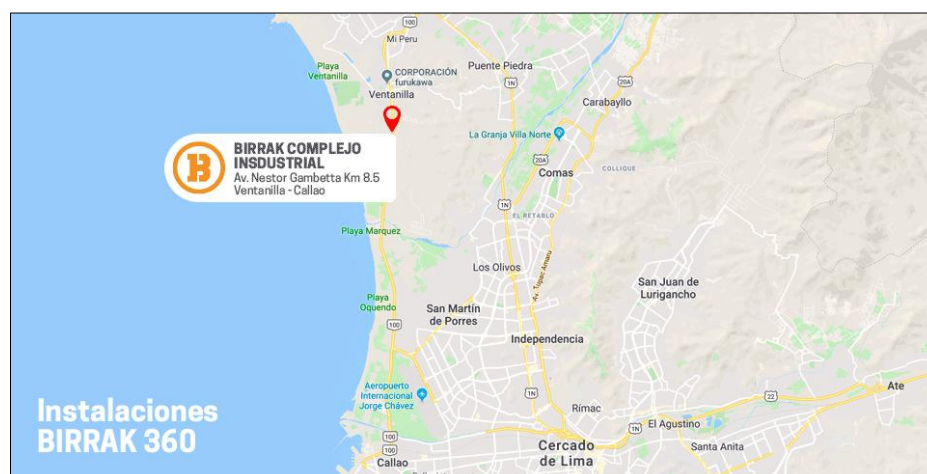


Figura N° 69: Ubicación planta Birrak.

Fuente: Birrak (2022).

### 5.1.4 Ensayos de laboratorio

#### a) Granulometría por tamizado (Análisis Granulométrico)

El presente ensayo tiene como objetivo conocer la distribución por tamaños de las partículas de suelos gruesos y finos que conforman la muestra de suelo de la investigación y según lo anterior clasificar el suelo de acuerdo a su graduación; es decir Grava bien graduada, Arena mal graduada.

#### Equipo y material

- Juego de mallas (comúnmente se utilizan: 3", 2", 1 ½", 1", ¾", ½", 3/8", N°4, N°10, N°20, N°40, N°60, N°100, N°200, la tapa y el platillo de fondo).
- Cucharón.
- Balanza con aproximación al 0.01 gr.

- Termómetro.
- Embudo.
- Probeta de 500 ml. de capacidad.
- Pizeta o frasco lavador.
- Bomba de vacíos.
- Horno o estufa.
- Franela o papel toalla.
- Curva de calibración del matraz.
- Canastilla.
- Bandeja de aluminio.
- Espátula.
- Cristal grueso.

#### Procedimiento

- El suelo secado, se disgrega y cuartea, se saca una muestra representativa, se pesa la muestra y se toma nota del peso.
- A continuación, se procede a pasar el material por las diferentes mallas, que van de mayor a menor abertura, para este proceso se debe aplicar un movimiento vertical y horizontal de tamiz para que las partículas sean retenidas por la abertura de malla correspondiente.



*Figura N° 70:* Proceso de tamizado.  
Fuente: Elaboración propia.



- Posteriormente el material retenido en cada malla se pesa y se va anotando en la columna de peso retenido.



*Figura N° 71:* Suelo retenido en malla.  
Fuente: Elaboración propia.

- Todo lo descrito anteriormente se realiza hasta la malla No. 4 y con el material que pasa dicha malla procedemos a obtener una muestra de suelo que sea representativa, para ello habrá que pasar el material las veces necesarias por el partidador de muestras, hasta que se obtenga una muestra de entre 500 y 1000 gr.
- La muestra anterior se pone a secar totalmente, esta se enfría y se pesa una muestra de 200.0 gr, la cual se vacía a un recipiente de aluminio y se vacía agua hasta llenarlo; con esto se procede a realizar el Lavado del suelo. Si el suelo en estudio, tiene una cantidad apreciable de grumos, este se deja en saturación por 24 horas.
- El Lavado del suelo, consiste en agitar el suelo utilizando el alambón con punta redondeada, haciendo figuras en forma de “ochos” durante 15 segundos.
- Se vacía el líquido a la malla No. 200, con el fin de eliminar los finos (que es el material que pasa dicha malla), posteriormente se vierte más agua al recipiente y se agita de la forma antes descrita.

- Cuando en la malla se acumule mucho material (arena), se reintegra al recipiente, vaciando agua sobre el reverso de la malla, siempre cuidando de no perder material; esto se hará cada 5 veces que se vacíe agua con finos a la malla No. 200. Esta operación se repite las veces necesarias para que el agua salga limpia o casi limpia.
- El suelo es secado al horno o a la estufa, se deja enfriar y después se pasa por las siguientes mallas, que son la No. 10 a la No. 200.
- Para que sea un vibrado más eficaz se recomienda, llevar todo el conjunto de mallas al agitador de mallas.
- Se procede a pesar el material retenido en cada malla.
- Se realizan los cálculos de: % retenido parcial, % retenido acumulado, % que pasa; se dibuja la curva granulométrica.
- Se calculan: los % de grava, de arena y de finos, así como los Coeficientes de uniformidad (Cu) y de Curvatura (Cc).

b) Porcentaje de Humedad

El presente ensayo de porcentaje de Humedad, tiene como objetivo determinar la cantidad de agua en porcentaje (%) que posee una muestra en estado natural, en relación a la muestra seca.

El contenido de humedad, es la relación del peso de la muestra con agua entre el peso de la muestra seca.

Fórmula:

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

$\omega$ : Contenido de Humedad del suelo (%)

$w_w$ : Peso de la fase líquida (agua) del suelo

$w_s$  : Peso de la fase sólida del suelo

### Equipos y Materiales:

- Horno eléctrico, que mantenga la temperatura constante a  $110 \pm 5$  grados Centígrados.
- Balanza con aproximación al 0.01 gr.
- Bandeja y recipiente o tarro de aluminio
- Espátula
- Cristal grueso
- Hornilla o estufa

### Procedimiento:

- En este ensayo, lo primero que se realizó fue determinar el peso de los dos recipientes en gramos ( $W$  recipiente)
- Luego estos dos recipientes se llenaron con una porción de la muestra del suelo en estado natural ( $W$  recipiente  $S_w$ ) y se pesa nuevamente.
- Posterior a esto se procede a llevar los recipientes al horno para su secado, y una vez secado se vuelve a pesar los recipientes con el suelo seco ( $W$  recipiente  $S$ ).



Figura N° 72: Dos muestras para secado en horno.  
Fuente: Elaboración Propia.

- Se calculará el peso del Suelo Seco ( $W_w$ ) usando la siguiente fórmula:

$$W_w = W_{\text{Recipiente S}} - \text{Recipiente}$$

Dónde:

$W_w$  : Peso del Suelo Seco

$W_{\text{Recipiente S}}$  : Peso del Recipiente más Suelo Seco

$W_{\text{Recipiente}}$  : Peso del Recipiente

- Se calcula el peso del Agua ( $W_s$ ) usando la siguiente fórmula:

$$W_s = W_{\text{Recipiente Sw}} - W_{\text{Recipiente S}}$$

Dónde:

$W_s$  : Peso del Agua

$W_{\text{Recipiente Sw}}$ : Peso del Recipiente más Suelo en estado Natural

$W_{\text{Recipiente S}}$  : Peso del Recipiente más Suelo Seco

- Se calcula el Porcentaje de Humedad usando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Humedad} = \left( \frac{W_s}{W_w} \right) \times 100$$

- Finalmente se procede hacer el promedio de los dos resultados obtenidos.

c) Caracterización del Comportamiento de los Finos

Límite líquido:

- El suelo debe ser tamizado por la malla No. 40, el cual se vacía en una cápsula de porcelana y debe humedecerse 24 horas antes de estas determinaciones.



Figura N° 73: Ensayo de límite líquido.  
Fuente: Elaboración Propia.

- Se pesan las charolas de aluminio (4 para el LL y 4 para el LP)
- Para el Límite Líquido, el suelo es mezclado en la cápsula de porcelana con agua, hasta que se vea una mezcla en pasta manejable, se coloca en la Copa de Casagrande, distribuyendo el material del centro hacia los extremos, de tal manera que en el centro quede una superficie a nivel.
- Se hace una ranura en la parte media del suelo, utilizando el ranurador, de tal forma que este vaya perpendicular a la Copa.



Figura N° 74: Muestra en copa Casagrande.  
Fuente: Elaboración Propia.

- Se procede a darle los golpes en la Copa, con una frecuencia de 2 golpes por segundo, hasta que los taludes del material se unan en una longitud de 12.7 mm (1/2"), los golpes son contados y registrados en la columna de Número de golpes de la hoja formato. Debe tratarse de que esta condición, antes descrita se cumpla entre 4 y 40 golpes, para que la prueba se tome como bien ejecutada; se recomienda que esta condición se logre una vez en cada uno de los siguientes intervalos de golpes: Una vez entre 30 y 40 golpes, Otra entre 20 y 30 golpes Otra entre 15 y 20 golpes Otra entre 5 y 15 golpes Lo anterior es recomendado con el fin de que los puntos obtenidos al graficar, el número de golpes contra contenido de agua, estos queden separados unos de otros y se pueda definir con mayor claridad la Curva de Fluidez.
- En cada una de estos ensayos se toman muestra del centro de la Copa, las cuales son pesadas y se anotan en el registro como: tara + suelo húmedo.



Figura N° 75: Golpes en la copa Casagrande.  
Fuente. Elaboración Propia.

- Estas muestras son introducidas al horno para determinar el contenido de humedad en cada ensayo.

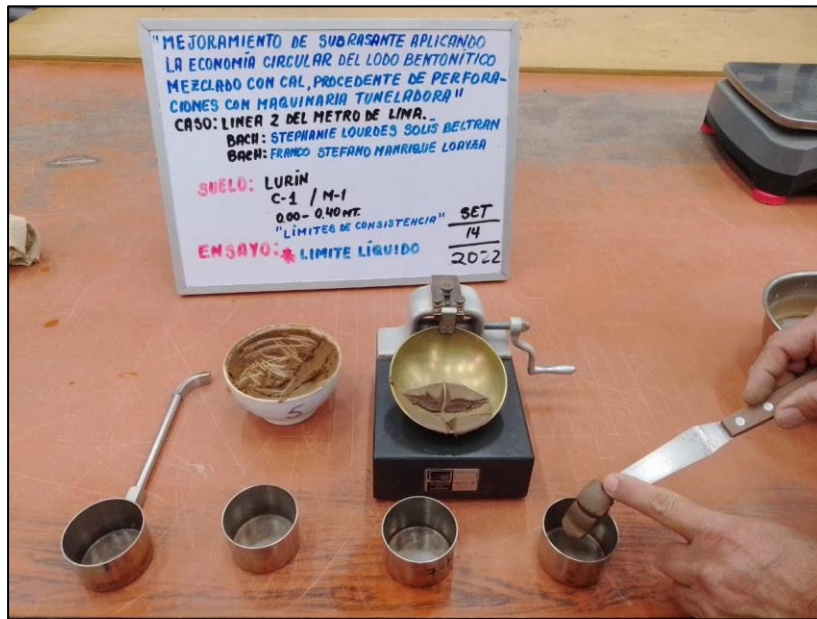


Figura N° 76. Distribución de la muestra en recipiente.  
Fuente: Elaboración propia.

- Cuando el suelo tenga la humedad correspondiente al LL (ensaye en el intervalo de 20 a 30 golpes), se llena el molde rectangular, en 3 capas, dándole los suficientes golpes a cada capa contra la mesa, con el fin de extraerle el aire atrapado, después el molde se enrasa, se limpia exteriormente con una franela húmeda y finalmente se pesa, anotándolo como: Peso del molde + suelo húmedo; con lo descrito en este paso se realiza la prueba de Límite de contracción.
- Para el Límite Líquido, las muestras son sacadas del horno, se dejan enfriar y se pesan, se registran en la columna de: tara + suelo seco. Con estos datos se obtiene el contenido de agua en los 4 ensayos, se grafican: Número de golpes contra contenido de agua, obteniéndose 4 puntos, por los cuales se traza una línea recta por los puntos o parte intermedia de ellos, a esta recta se le llama Curva de Fluidez; en 25 golpes, subimos e interceptamos la Curva de Fluidez y de ahí con la horizontal, leemos ese contenido de humedad, la que corresponderá al Límite Líquido.

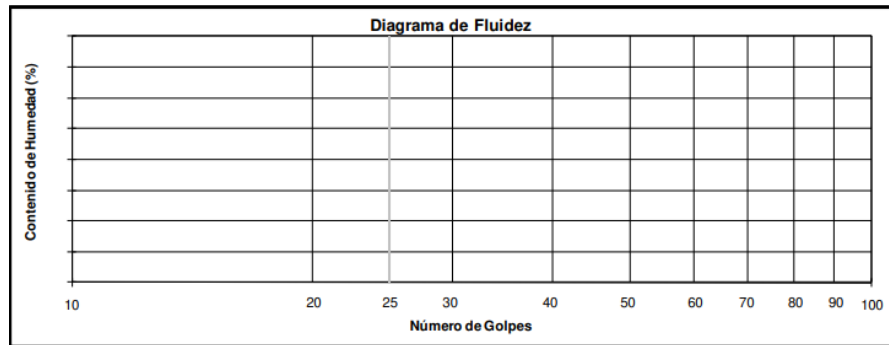


Figura N° 77: Diagrama de fluidez.  
Fuente: Universidad Ricardo Palma (2016).

#### Límite plástico:

- De la muestra menos húmeda, pero que sea moldeable, se hace primeramente una esfera de 1.5 cm aproximadamente.
- Se gira o se rola con la palma de la mano, sobre la placa de vidrio, tratando de hacer un cilindro alargado y con un diámetro de 3.2 mm (1/8”), se utilizará el vernier para verificar el diámetro del cilindro.
- Si este cilindro presenta agrietamientos múltiples, se dice que el suelo presenta el Límite plástico, donde se obtendrán muestras de suelo, se someterán al secado para determinar el contenido de agua, el cual equivale al LP.
- En caso de no cumplirse la anterior condición, el suelo se hará de nuevo una esfera y se repetirá el proceso hasta que se cumpla lo especificado.
- Para el Límite Plástico, se procede a obtener el contenido de agua correspondiente, estos 2 contenidos de agua se promediarán siempre y cuando no haya una diferencia mayor a 2 puntos porcentuales, en caso contrario se tendrá que repetir esta prueba. El promedio antes descrito, se reportará como el resultado de Límite Plástico.
- Para obtener el Índice Plástico ( $I_p$ ) =  $LL - LP$

#### Límite de Contracción:

- El suelo es sacado del horno, se pesa y se obtienen los volúmenes iniciales y final, utilizando para ello un Vernier o determinarlo por volumen desplazado de mercurio mediante el principio de “Arquímedes”, y se llena el siguiente registro en el formato



- Peso del molde + suelo húmedo = gr
- Peso del molde + suelo seco = gr
- Peso del molde = gr
- Peso del suelo húmedo (W1) = gr
- Peso del suelo seco (Ws) = gr
- Volumen del suelo húmedo (V1) = cm<sup>3</sup>
- Volumen del suelo seco (V2) = cm<sup>3</sup>
- Peso específico del agua ( $\gamma_w$ ) = 1 gr/cm<sup>3</sup>

$$LC = \frac{W_1 - W_s - (V_1 - V_2)\gamma_w}{W_s} \times 100$$

#### d) Clasificación SUCS y AASHTO

##### Clasificación SUCS

Para poder clasificar los suelos según SUCS, lo primero que debemos verificar es el porcentaje del suelo retenido acumulado en el tamiz N° 200:

- % Retenido Acumulado Tamiz N° 200 > 50%, es un Suelo de Partícula Grueso.
- % Retenido Acumulado Tamiz N° 200 < 50%, es un Suelo de Partícula Fina.

##### Suelo de Partícula Gruesa:

Se procederá verificar el porcentaje del Suelo retenido en el Tamiz N°4:

- %Retenido acumulado Tamiz N° 4 > 50%, son Gravas.
- %Retenido acumulado Tamiz N° 4 < 50%, son Arenas.

Las Gravas (G) y Arenas (S) se subdividen de la siguiente manera:

Tabla N° 12  
Tabla de Clasificación de Gravas y Arenas.

TIPOS	SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
<b>Gravas Limpias</b> Poco o nada de partículas finas	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos.
	GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos.
<b>Gravas con Finos</b> Cantidad apreciable de partículas finas	GM	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo.
	GC	Gravas arcillosas, mezclas de gravas, arena y arcilla.
<b>Arenas Limpias</b> Poco o nada de partículas finas	SW	Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.
	SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poca o nada de limos.
<b>Arenas con Finos</b> Cantidad apreciable de partículas finas	SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.
	SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.

Fuente: Elaborado por Braja M. Das., 2014.

Para determinar si el Suelo es Grava (GW, GP, GM, GC o SW) o si es Arena (SW, SP, SM o SC) se verificará el % que pasa por el Tamiz N° 200, los cuales se clasificarán en:

- SP (Arena Mal Gradada).
- SW (Arena Bien Gradada).
- GP (Grava Mal Gradada).

- GW (Grava Bien Gradada).

La simbología P y W estará dada con las siguientes condiciones:

- $C_u > 6$ , donde  $C_u$  es Coeficiente de Uniformidad
- $1 \leq C_c \leq 3$ , donde  $C_c$  es Coeficiente de Curvatura

Si, se cumplen las dos condiciones el suelo será considerado W (Bien Gradada), caso contrario, si no cumple con una de las dos condiciones será considerado P (Mal Gradada) los suelos se clasificarán con doble simbología:

- SP - SM (Arena Mal Gradada con Limo).
- SP - SC (Arena Mal Gradada con Arcilla).
- SW - SM (Arena Bien Gradada con Limo).
- SW - SC (Arena Bien Grada con Arcilla).
- GP - GM (Grava Mal Gradada con Limo).
- GP - GC (Grava Mal Gradada con Arcilla).
- GW - GM (Grava Bien Gradada con Limo).
- GW - GC (Grava Bien Grada con Arcilla).

La simbología P y W en el Caso de Arenas (S) estará dada con las siguientes condiciones:

- $C_u > 6$ , donde  $C_u$  es Coeficiente de Uniformidad.
- $1 \leq C_c \leq 3$ , donde  $C_c$  es Coeficiente de Curvatura.

La simbología P y W en el Caso de Gravas (G) estará dada con las siguientes condiciones:

- $C_u > 4$ , donde  $C_u$  es Coeficiente de Uniformidad.
- $1 \leq C_c \leq 3$ , donde  $C_c$  es Coeficiente de Curvatura.

Si, se cumplen las dos condiciones en los casos de Arena o Grava será considerado W (Bien Gradada), caso contrario, si no cumple con una de las dos condiciones será considerado P (Mal Gradada).

Tabla 13  
Cuadro Resumen de Condiciones para la Clasificación de Arenas y Gravas.

Arenas		Condición	Resultado
<b>Pobremente Graduada</b>	SP - SM	$Cu > 6$ $1 \leq Cc \leq 3$	Si no cumple alguna de las dos condiciones
	SP - SC		
<b>Bien Graduada</b>	SW - SM	$1 \leq Cc \leq 3$	Si cumple las dos condiciones
	SW - SC		
Gravas		Condición	Resultado
<b>Pobremente Graduada</b>	GP - GM	$Cu > 4$ $1 \leq Cc \leq 3$	Si no cumple alguna de las dos condiciones
	GP - GC		
<b>Bien Graduadas</b>	GW - GM	$1 \leq Cc \leq 3$	Si cumple las dos condiciones
	GW - GC		

Fuente: Elaboración Propia.

La simbología Limos (M) y Arcillas (C) estarán dadas en la Carta de Plasticidad.

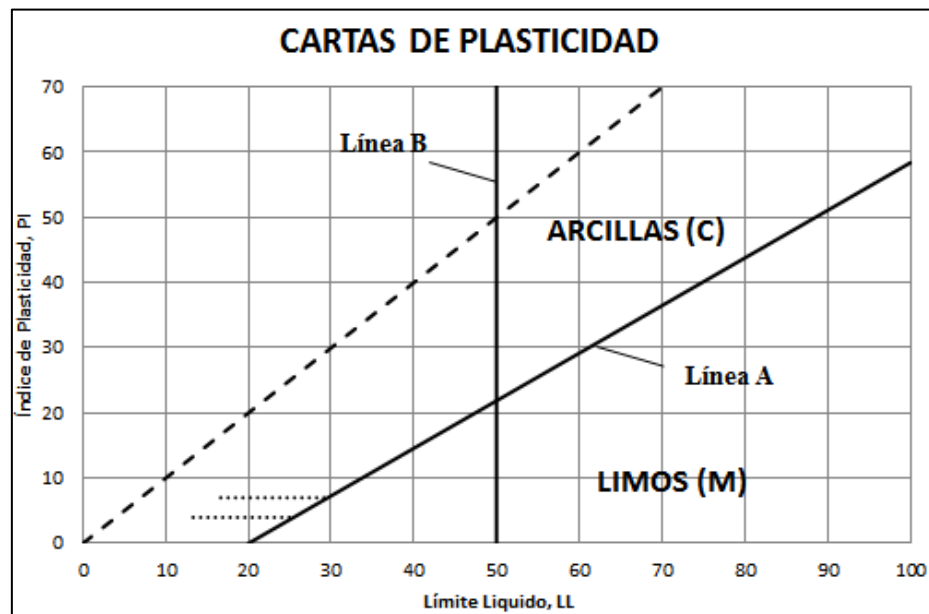


Figura N° 78: Carta de plasticidad para suelo de partícula gruesa.  
Fuente: Elaboración propia.

Donde los valores que se encuentren encima de la Línea A serán Considerados Arcillas (C) y los que se encuentren debajo de la Línea A serán considerados Limos (M), los suelos se clasificarán en:

- SM (Arena con Limos).
- SC (Arena con Arcillas).
- GM (Grava con Limos).
- GC (Grava con Arcillas).

La simbología Limos (M) y Arcillas (C) estarán dadas en la Carta de Plasticidad de la Figura 69.

Donde será considerado Arcillas (C) todos los valores que se encuentren encima por encima de la Línea A y Limos (M) todos los valores que se encuentren por debajo de la Línea A.

#### Suelo de Partícula Fina

Los suelos de Partícula fina se clasificarán:

- ML (Limos Inorgánicos de baja compresibilidad).
- OL (Limos y arcillas orgánicas).
- CL (Arcillas Inorgánicas de baja compresibilidad).
- CH (Arcillas Inorgánicas de alta compresibilidad).
- MH (Limos Inorgánicos de alta compresibilidad).
- OH (Arcillas y Limos Orgánicas de alta compresibilidad).

Su simbología estará dada por la Carta de Plasticidad de la Figura 79.

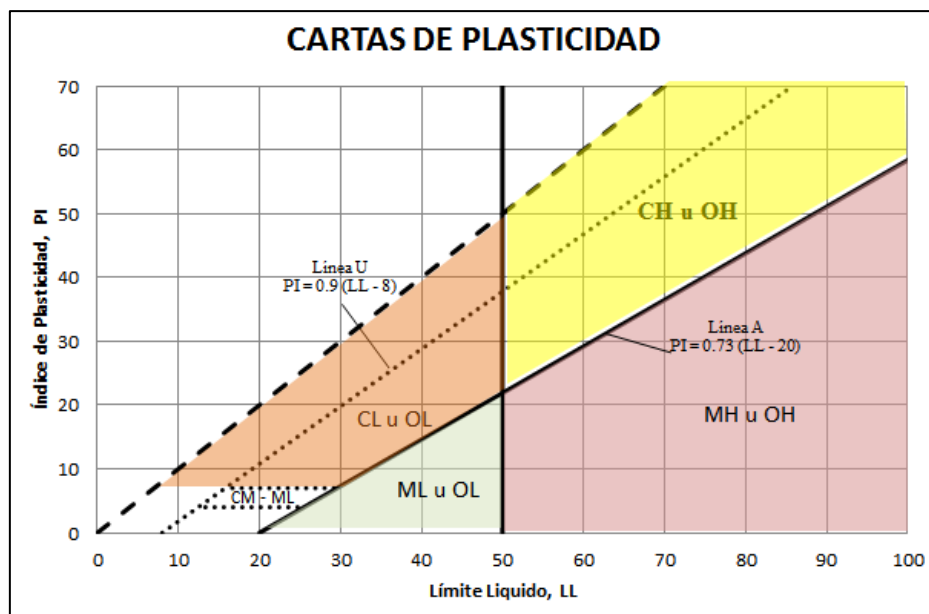


Figura N° 79: Carta de plasticidad para suelos de partícula fina.  
Fuente: Elaboración Propia.

### Clasificación AASHTO

Para poder clasificar el suelo según AASHTO se hará uso de tablas según el tipo de Material.

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)						
	A-1			A-2			
Grupo de clasificación	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)							
Núm. 10	50 máx.						
Núm. 40	30 máx.	50 máx.	51 mín.				
Núm. 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
Características de la fracción de paso núm. 40							
Límite líquido				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Limo o grava arcillosa y arena			
Clasificación general de la subrasante	Excelente a bueno						

Figura N° 80. Clasificación de suelos método AASHTO (Material Granular).  
Fuente: Elaborado por Braja M. Das., 2014.

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)			
				A-7 A-7-5* A-7-6†
Grupo de clasificación	A-4	A-5	A-6	
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)				
Núm. 10				
Núm. 40				
Núm. 200	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características de la fracción de paso núm. 40				
Límite líquido	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes	Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Clasificación general de la subrasante	Regular a malo			
*Para A-7-5, $PI \leq LL - 30$				
†Para A-7-6, $PI > LL - 30$				

Figura N° 81. Clasificación de suelos método AASHTO (Material Limo-Arcilloso).  
Fuente: Elaborado por Braja M. Das., 2014.

#### e) Proctor Modificado



Figura N° 82: Muestra de suelo de Lurín para ensayo de proctor modificado  
Fuente: Elaboración Propia.

Se procede a rellenar el molde del ensayo de Proctor modificado con el material del suelo en 5 capas, cada capa tendrá 25 golpes con el martillo compactador.

Para este ensayo es fundamental trabajar las 4 muestras con distinto porcentaje de humedad para que pueda graficarse la Curva de Proctor Modificado, la cual relaciona el Peso Específico Seco con % de Humedad.



Figura N° 83: Cuatro ensayos de proctor modificado de suelo de Lurín.  
Fuente: Elaboración Propia.

Para calcular el Peso Específico Húmedo del Suelo se usa la Siguiete  
Fórmula:

$$\text{Peso Especifico Humedo} = \frac{\text{Peso del Suelo Húmedo}}{\text{Volumen del Molde}} \quad (\text{gr/ cc})$$

Para Calcular el Peso Específico Seco del Suelo se usa la Siguiete  
Fórmula:

$$\text{Peso Especifico Sec} = \left( \frac{\text{Peso Especifico Humedo}}{\text{Porcentaje de Humedad} + 100} \right) \times 100 \quad (\text{gr/ cc})$$

Una vez obtenidos el Porcentaje de Humedad y Peso Específico Seco de las 4 muestras se procederá a graficar, en el eje x los valores de % de humedad y en el eje y los valores de Peso Específico Seco.



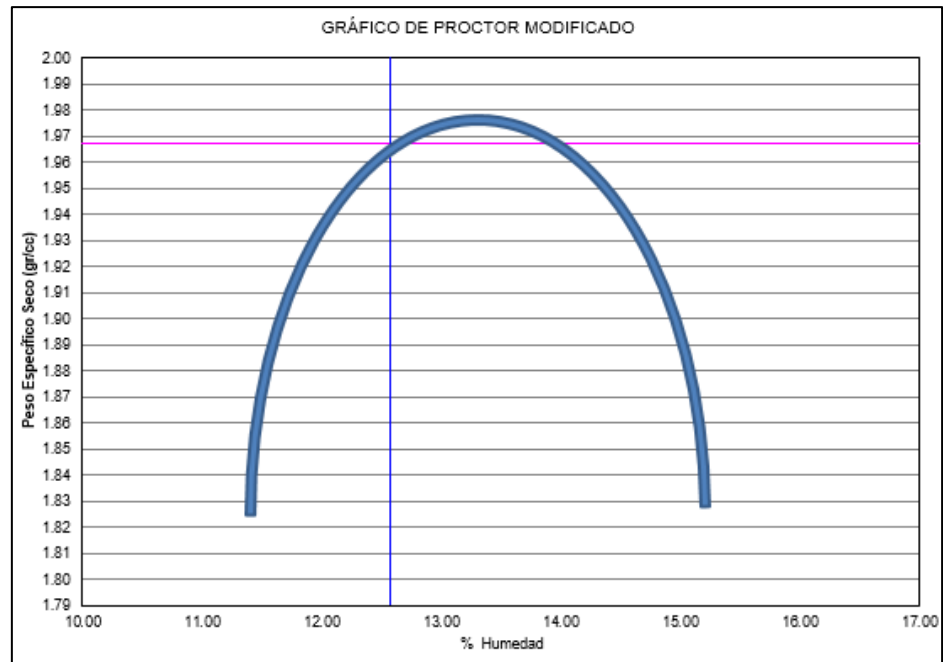


Figura N° 84: Modelo gráfico proctor modificado.  
Fuente: Elaboración Propia.

De la Figura N° 84 se tendrá que interpolar los datos para determinar el punto máximo de la curva, el cual nos determinará el Porcentaje de Humedad Optimo para el Máximo Peso Específico seco.

f) CBR

Para este ensayo se trabajó con 7kg de la muestra del suelo, en el cual primero se hace un tamizado para trabajar solo con el material que pasa por el tamiz N°4.

Una vez con el material ya listo se procede a pesar y anotar el volumen del molde, a continuación, se procede a llenar el molde con el suelo y compactar con 5 capas de 12 golpes cada. De igual manera se hace la compactación con otros dos moldes, pero con 25 y 56 golpes cada uno.



Figura N° 85: Compactación de ensayo de CBR suelo de Lurín.  
Fuente: Elaboración Propia.



Figura N° 86: Compactación CBR suelo de Lurín.  
Fuente: Elaboración Propia.



Figura N° 87: Peso del suelo de Lurín con molde de CBR.  
Fuente: Elaboración Propia.



Figura N° 88: Moldes con suelo de Lurín para 56, 25 y 12 golpes antes de saturar.  
Fuente: Elaboración Propia.



Figura N° 89: Moldes con suelo de Lurín para 56,25 y 12 golpes en saturación.  
Fuente: Elaboración Propia.



Figura N° 90: Retiro de molde con suelo de Lurín saturado.  
Fuente: Elaboración Propia.



Figura N° 91: Molde con suelo de Lurín en ensayo de CBR.  
Fuente: Elaboración Propia.



Figura N° 92: Ensayo CBR suelo de Lurín con 4% cal y 5% bentonita.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura N° 93. Ensayo CBR suelo de Lurín con 4% cal.  
Fuente: Elaboración Propia.

## 5.2 Resultados de laboratorio

### a) Suelo de Lurín

- Porcentaje de humedad

CONTENIDO DE HUMEDAD ( $\omega$ )			
1	No Recipiente	(gr)	<b>B - 8</b>
2	W Recipiente	(gr)	931.00
3	W Recipiente Sw	(gr)	2408.50
4	W Recipiente S	(gr)	2227.62
5	Ww: 3 - 4	(gr)	180.88
6	Ws: 4 - 2	(gr)	1296.62
7	$\omega: 100 * 5/6$	(%)	<b>13.95</b>

Figura N° 94: Resultado porcentaje de humedad suelo Lurín.  
Fuente: Elaboración Propia.

- Granulometría

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO			
8	W Recipiente s (Lavado)	(gr)	1407.86
9	W s (Lavado)	(gr)	476.86
10	W s Fino (Platillo)	(gr)	2.16
11	W Total Parcial Retenido	(gr)	475.26
12	$\Delta W : 9 - 11$	(gr)	1.60
13	W s Fino (Total) : $[6-(11-10)-12]$	(gr)	821.92
14	% Finos : $100*13/6$	(%)	63.39
15	Error : $100*12/9$	(%)	<b>0.34</b>

Figura N° 95: Lavado de muestra y % de error Granulometría por tamizado.  
Fuente: Elaboración Propia.

Tamiz	Peso Parcial Retenido	Peso Parcial Retenido Corregido	% Parcial Retenido	% Acumulado Retenido	% Acumulado Que Pasa
(mm)	(gr)	(gr)	(%)	(%)	(%)
3"	75.000				100.00
2"	50.000				100.00
1 1/2"	37.500				100.00
1"	25.000				100.00
3/4"	19.000	21.89	1.69	1.69	98.31
3/8"	09.500	17.01	1.31	3.00	97.00
N° 004	04.750	25.69	1.98	4.98	95.02
N° 010	02.000	37.40	37.4	2.88	7.87
N° 020	00.850	37.14	2.86	10.73	89.27
N° 040	00.425	37.53	2.89	13.62	86.38
N° 060	00.250	58.33	4.50	18.12	81.88
N° 100	00.150	98.05	7.56	25.69	74.31
N° 200	00.075	140.06	10.93	36.61	63.39
Platillo	2.16	821.92	63.39	100.00	0.00
Total	475.26	1296.62	100.00		

Figura N° 96: Resultados porcentaje que pasa por tamices granulometría.  
Fuente: Elaboración Propia.

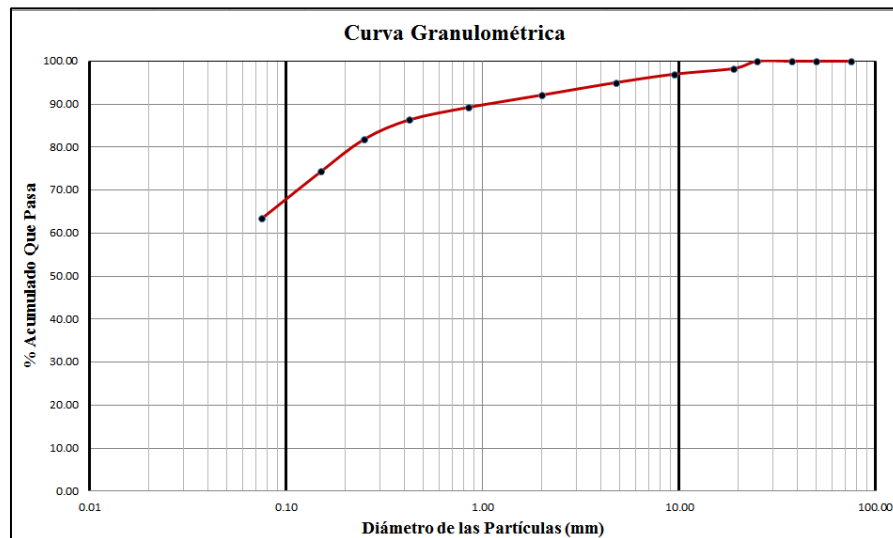


Figura N° 97: Curva granulométrica suelo inestable.  
Fuente: Elaboración Propia.

D10 (mm)	<b>0.014</b>
D30 (mm)	<b>0.022</b>
D60 (mm)	<b>0.012</b>
$Cu = D60/D10$	<b>0.85</b>
$Cc = D30^2 / (D10 * D60)$	<b>2.95</b>

Figura N° 98. Coeficiente de uniformidad (Cu) y coeficiente de curvatura (Cc).  
Fuente: Elaboración Propia.

- Límites de Atterberg

Cálculo de Límite Líquido (%)

LÍMITE LIQUIDO (LL)					
		1-H	2-H	3-H	4-H
1	No recipiente				
2	No golpes	17	26	32	43
3	W recipiente (gr)	52.88	53.82	52.99	52.52
4	W recipiente sw (gr)	81.04	79.55	78.46	79.61
5	W recipiente s (gr)	75.44	74.71	74.09	75.18
6	W w : 4-5 (gr)	5.60	4.84	4.37	4.43
7	W s : 5-3 (gr)	22.56	20.89	21.10	22.66
8	w : 100*6/7 (%)	24.82	23.17	20.71	19.55
9	LL (%)		22.72		

Figura N° 99: Cuadro de cálculo de límite líquido.  
Fuente: Elaboración Propia.

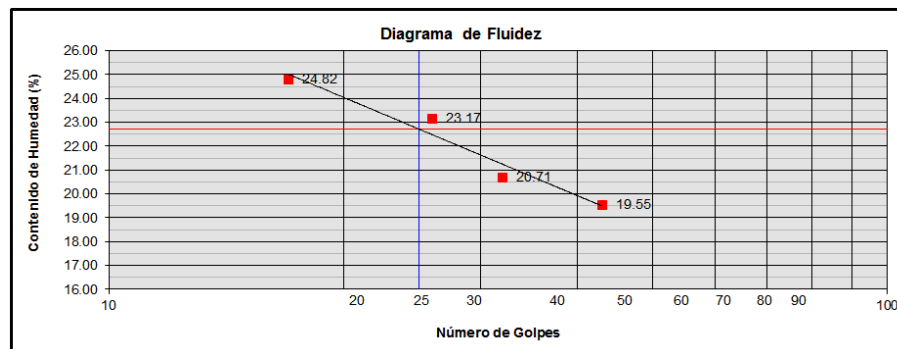


Figura N° 100: Diagrama de fluidez de suelo inestable.  
Fuente: Elaboración Propia.

Del Gráfico se determina el Límite Líquido el cual se encuentra en los 25 golpes: 22.72 %.

Cálculo de Límite Plástico (%)



LIMITE PLASTICO (LP)							
1	No recipiente		5-H	6-H	7-H	8-H	
2	W recipiente	(gr)	52.56	53.05	54.42	53.22	
3	W recipiente sw	(gr)	62.57	63.37	64.70	64.07	
4	W recipiente s	(gr)	61.10	61.86	63.14	62.48	
5	W w : 3-4	(gr)	1.47	1.51	1.56	1.59	
6	W s : 4-2	(gr)	8.54	8.81	8.72	9.26	
7	LP : 100*5/6	(%)	17.21	17.14	17.89	17.17	
8	LP promedio	(%)				17.35	

Figura N° 101: Cuadro de cálculo de limite plástico.  
Fuente: Elaboración Propia.

El Límite Plástico es 17.35%.

El Índice Plástico es  $LL - LP = 22.72 - 17.35 = 5.37\%$ .

- Clasificación según SUCS Y AASHTO

Clasificación SUCS

Tamiz	Peso Parcial Retenido	Peso Parcial Retenido Corregido	% Parcial Retenido	% Acumulado Retenido	% Acumulado Que Pasa
(mm)	(gr)	(gr)	(%)	(%)	(%)
3"	75.000				100.00
2"	50.000				100.00
1 1/2"	37.500				100.00
1"	25.000				100.00
3/4"	19.000	21.89	1.69	1.69	98.31
3/8"	09.500	17.01	1.31	3.00	97.00
N° 004	04.750	25.69	1.98	4.98	95.02
N° 010	02.000	37.40	2.88	7.87	92.13
N° 020	00.850	37.14	2.86	10.73	89.27
N° 040	00.425	37.53	2.89	13.62	86.38
N° 060	00.250	58.33	4.50	18.12	81.88
N° 100	00.150	98.05	7.56	25.69	74.31
N° 200	00.075	140.06	10.93	36.61	63.39
Plástico	2.16	821.92	63.39	100.00	0.00
Total	475.26	1296.62	100.00		

Figura N° 102: Porcentaje retenido acumulado tamiz N° 200.  
Fuente: Elaboración Propia.

El porcentaje del suelo retenido acumulado en el tamiz N° 200:  $36.61 < 50\%$ , por tal motivo es un Suelo de Partícula Fina, y se usara la Carta de Plasticidad para determinar su clasificación.

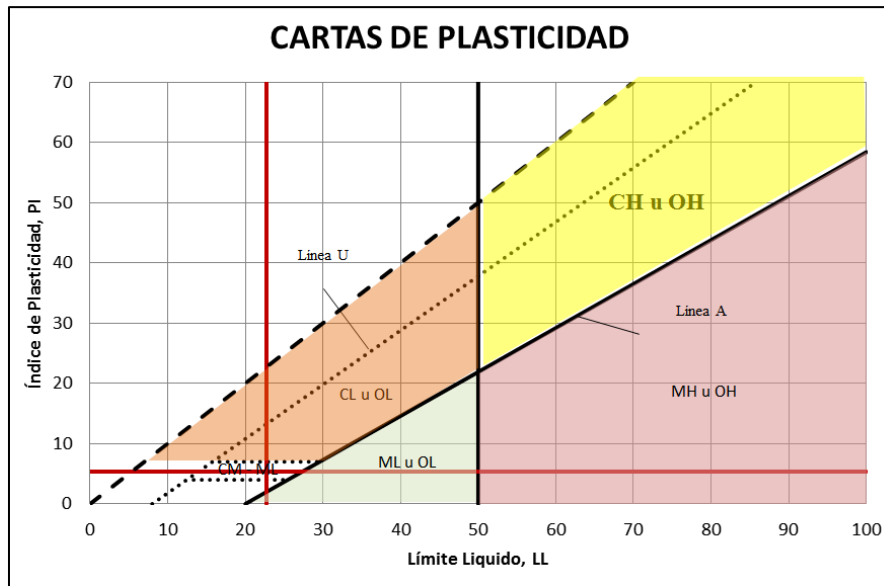


Figura N° 103: Resultado carta de plasticidad en suelo de Lurín.  
Fuente: Elaboración Propia.

Según la Carta de Plasticidad, considerando los valores de Límite Líquido e Índice de Plasticidad, estos resultados caen dentro del grupo (CM – CL), por tal motivo su clasificación según SUCS sería un Suelo de Partícula Fina, Arcilla Limosa Arenosa.

Clasificación AASHTO

Tamiz	Peso Parcial Retenido	Peso Parcial Retenido Corregido	% Parcial Retenido	% Acumulado Retenido	% Acumulado Que Pasa
(mm)	(gr)	(gr)	(%)	(%)	(%)
3"	75.000				100.00
2"	50.000				100.00
1 1/2"	37.500				100.00
1"	25.000				100.00
3/4"	19.000	21.89	1.69	1.69	98.31
3/8"	09.500	17.01	1.31	3.00	97.00
N° 004	04.750	25.69	1.98	4.98	95.02
N° 010	02.000	37.40	2.88	7.87	92.13
N° 020	00.850	37.14	2.86	10.73	89.27
N° 040	00.425	37.53	2.89	13.62	86.38
N° 060	00.250	58.33	4.50	18.12	81.88
N° 100	00.150	98.05	7.56	25.69	74.31
N° 200	00.075	141.66	10.93	36.61	63.39
Platillo	2.16	821.92	63.39	100.00	0.00
Total	475.26	1296.62	100.00		

Figura N° 104: Porcentaje que pasa por tamiz N° 200.  
Fuente: Elaboración Propia.

Como el % que pasa por el Tamiz N° 200 > 35% se Usara la Tabla de Finos, donde se cumple lo siguiente:

- % Tamiz N° 200 (63.39%)  $\geq$  36% (Cumple)
- Limite Líquido (22.72%)  $\leq$  40% (Cumple)
- Índice de Plasticidad (5.37%)  $\leq$  10% (Cumple)

Como se cumple todos los valores de la columna A-4, el suelo será clasificado como un Suelo Limoso (A-4).

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)			
	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5* A-7-6†
Grupo de clasificación	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5* A-7-6†
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)				
Núm. 10				
Núm. 40				
Núm. 200	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características de la fracción de paso núm. 40				
Límite líquido	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes		Suelos limosos		Suelos arcillosos
Clasificación general de la subrasante		Regular a malo		
*Para A-7-5, $PI \leq LL - 30$				
†Para A-7-6, $PI > LL - 30$				

Figura N° 105: Clasificación AASHTO para finos.  
Fuente: Elaborado por Braja M. Das., 2014.

Y su Índice de Grupo será:

$$IG = (F - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01(F - 15)(PI - 10)$$

F = Porcentaje pasado por el Tamiz N° 200

LL= Límite Líquido

PI = Índice de Plasticidad

$$IG = (63.39 - 35)[0.2 + 0.005(22.72 - 40)] + 0.01(63.39 - 15)(5.37 - 10)$$

$$IG = 0.9 \approx 1$$

Según AASHTO el Suelo es: A-4 (1).

Porcentaje Óptimo de Humedad y Peso Específico Seco

**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y ASFALTO**

ENSAYO : PROCTOR MODIFICADO  
 METODO : Modificado-A  
 NORMA : N.T.P. 339.141 / ASTM D1557  
 INFORME : TITES VIRTUAL 2022  
 PROYECTO : MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE EN CARRETERAS, APLICANDO LA ECONOMÍA CIRCULAR  
 SOLICITANTE : BACH. STEPHANIE LOURDES SOLIS BELTRÁN & BACH. FRANCO STÉFANO MANRIQUE LOAYZA  
 UBICACION : LÍNEA 2 DEL METRO DE LIMA ESTACIÓN CALLAO  
 FECHA : 20/9/2022  
 TIPO DE EXPLORACION : Recolección  
 No DE EXPLORACION : E-1  
 No DE MUESTRA : M - 1  
 PROFUNDIDAD DE MUESTRA (m) : 0.00

PESO ESPECIFICO ( $\gamma$ )	(gr/cc)	2.08	2.22	2.17
CONTENIDO DE HUMEDAD ( $\omega$ )	(%)	11.06	12.74	14.25
PESO ESPECIFICO SECO ( $\gamma_d$ )	(gr/cc)	1.87	1.97	1.90
PESO ESPECIFICO SECO ( $\gamma_d$ )	(gr/cc)	2.10	2.03	1.97
(100 % de saturación)				

OCH	(%)	12.57
$\gamma_d$ max	(gr/cc)	1.967
$\gamma_d$ max (98%)	(gr/cc)	1.928
$\gamma_d$ max (95%)	(gr/cc)	1.869

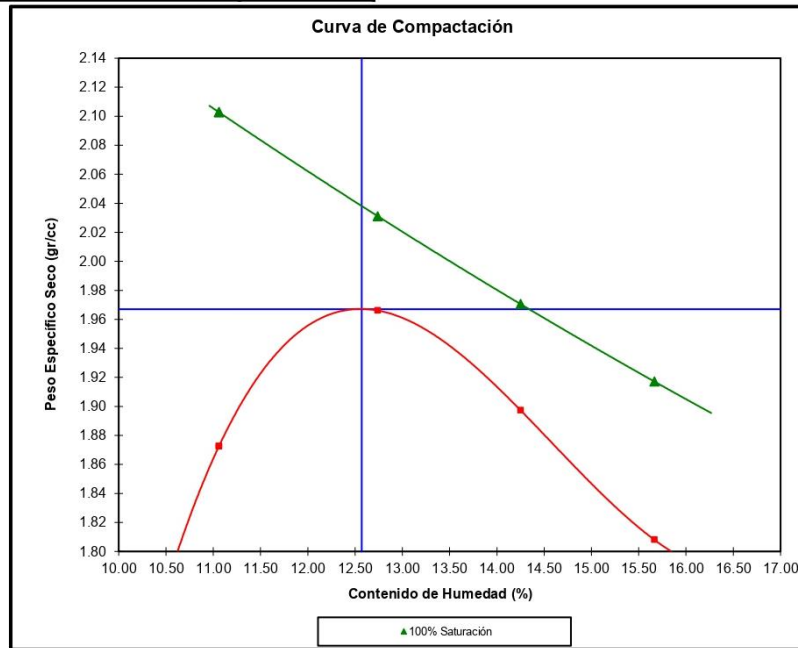


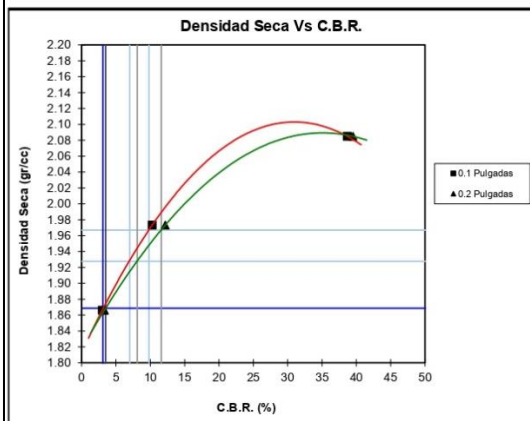
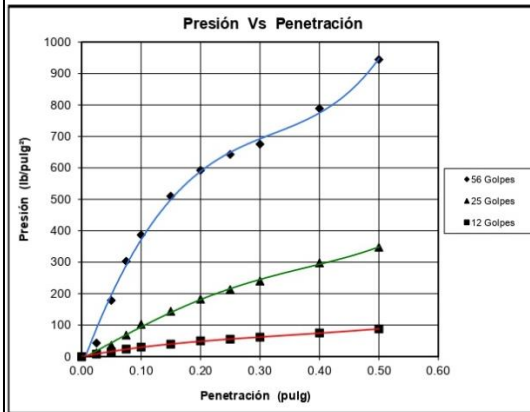
Figura N° 106: Resultados de laboratorio proctor modificado suelo de Lurín.  
Fuente: Elaboración Propia.

## Ensayo de CBR

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y ASFALTO							
ENSAYO	: C.B.R.						
NORMA	: N.T.P. 339.145 / ASTM D1883						
INFORME	: TITES VIRTUAL 2022						
SOLICITANTE	: BACH. STEPHANIE LOURDES SOLIS BELTRÁN & BACH. FRANCO STÉFANO MANRIQUE LOAYZA						
PROYECTO	: MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE EN CARRETERAS, APLICANDO LA ECONOMÍA CIRCULAR DEL						
UBICACION	: LÍNEA 2 DEL METRO DE LIMA ESTACIÓN CALLAO						
FECHA	: 20/9/2022						
No DE EXPLORACION	: E-1						
No DE MUESTRA	: M - 1						
PROFUNDIDAD DE MUESTRA	: 0.00						
No GOLPES POR CAPA	56	25	12				
PESO ESPECIFICO ( $\gamma$ ) (gr/cc)	2.35	2.22	2.10				
CONTENIDO DE HUMEDAD ANTES DE SATURAR ( $\omega$ ) (%)	12.54	12.52	12.53				
PESO ESPECIFICO SECO ( $\gamma_d$ ) (gr/cc)	2.08	1.97	1.87				
GRADO DE SATURACION ANTES DE SATURAR (Gw) (%)	109.41	88.28	73.31				
EXPANSION							
Sobrecarga (gr)	5642.00	5652.00	5632.00				
Tiempo (Hora)	Deformación Acumulada (%)						
0	0.000	0.000	0.000				
15	330.657	706.880	913.962				
22	771.532	1264.530	1449.732				
PENETRACION							
Penetración (pulg)	Presión Patrón (lb/pulg <sup>2</sup> )	Presión Corregida (lb/pulg <sup>2</sup> )	CBR (%)	Presión Corregida (lb/pulg <sup>2</sup> )	CBR (%)	Presión Corregida (lb/pulg <sup>2</sup> )	CBR (%)
0.100	1000	386.87	38.69	102.68	10.27	30.12	3.01
0.200	1500	592.58	39.51	182.52	12.17	49.84	3.32
CONTENIDO DE HUMEDAD DESPUES DE SATURAR ( $\omega$ ) (%)	19.45	22.41	24.57				
CONTENIDO DE HUMEDAD ABSORBIDO ( $\omega$ ) (%)	6.90	9.89	12.04				
GRADO DE SATURACION DESPUES DE SATURAR (Gw) (%)	0.04	0.03	0.02				
C.B.R.	$\gamma_d$ max (100%)	$\gamma_d$ max (98%)	$\gamma_d$ max (95%)				
C.B.R. (0.1" de Penetración) (%)	9.80	7.00	<b>3.10</b>				
C.B.R. (0.2" de Penetración) (%)	11.60	8.10	<b>3.50</b>				

Figura N° 107: Resultado de laboratorio CBR suelo de Lurín.  
Fuente: Elaboración Propia.

ENSAYO : C.B.R.  
 NORMA : N.T.P. 339.145 / ASTM D1883  
 INFORME : TITES VIRTUAL 2022  
 SOLICITANTE : BACH. STEPHANIE LOURDES SOLIS BELTRAN & BACH. FRANCO STEFANO MANRIQUE LOAYZA  
 PROYECTO : MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE EN CARRETERAS, APLICANDO LA ECONOMIA CIRCULAR DEL LODO BENTONITICO MEZCLADO CON CAL PROCEDENTE DE LAS EXCAVACIONES, DE LA OBRA LINEA 2 DEL METRO DE LIMA  
 UBICACION : LINEA 2 DEL METRO DE LIMA ESTACION CALLAO  
 FECHA : 20/9/2022  
 TIPO DE EXPLORACION : Recolección  
 No DE EXPLORACION : E-1  
 No DE MUESTRA : M - 1  
 PROFUNDIDAD DEL ESTRATO (m) : 0.00



Limite inferior Eje X	0.00	
Limite superior Eje X	220.00	
Limite inferior Eje Y	0.00	
Limite superior Eje Y	2.25	
γd max (100%)	0.00	1.97
	220.00	1.97
γd max (98%)	0.00	1.93
	220.00	1.93
γd max (95%)	0.00	1.87
	220.00	1.87
C.B.R.(100%) 0.1"	9.80	0.00
	9.80	2.25
C.B.R.(98%) 0.1"	7.00	0.00
	7.00	2.25
C.B.R.(95%) 0.1"	3.10	0.00
	3.10	2.25
C.B.R.(100%) 0.2"	11.60	0.00
	11.60	2.25
C.B.R.(98%) 0.2"	8.10	0.00
	8.10	2.25
C.B.R.(95%) 0.2"	3.50	0.00
	3.50	2.25

Figura N° 108: Resultados de laboratorio gráficos CBR ssuelo de Lurín.  
 Fuente: Elaboración Propia.

b) Resultados de laboratorio suelo de Lurín con 4% de cal y 5% de lodo bentonítico.

Porcentaje óptimo de humedad y peso específico máximo del suelo de Lurín con 4% de cal y 5% de lodo bentonítico.

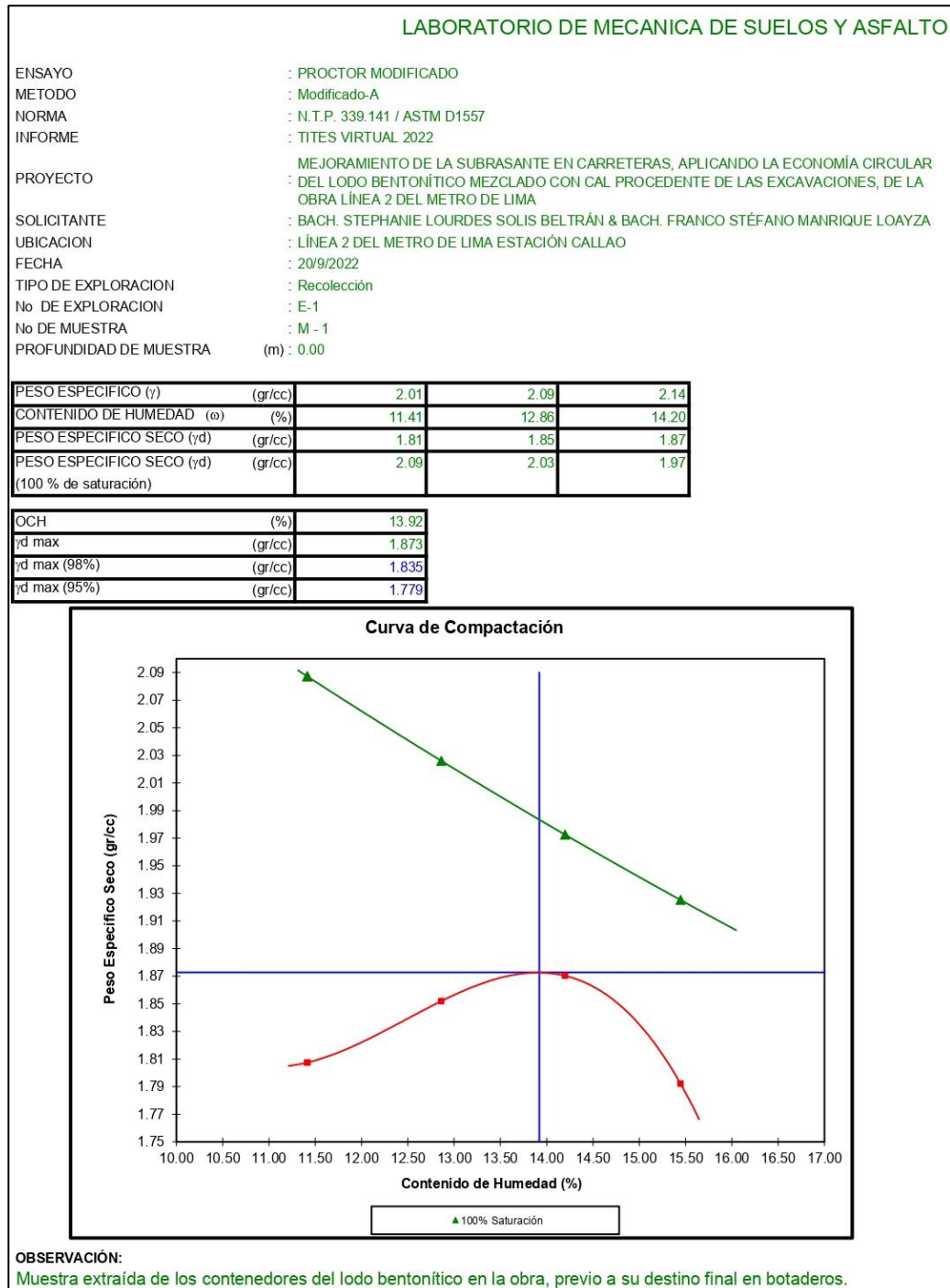


Figura N° 109: Resultados de proctor suelo de Lurín + 4% cal + 5% lodo bentonítico.  
Fuente: Elaboración Propia.

## Ensayo de CBR.

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y ASFALTO							
ENSAYO	: C.B.R.						
NORMA	: N.T.P. 339.145 / ASTM D1883						
INFORME	: TITES VIRTUAL 2022						
SOLICITANTE	: BACH. STEPHANIE LOURDES SOLIS BELTRÁN & BACH. FRANCO STÉFANO MANRIQUE LOAYZA						
PROYECTO	: MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE EN CARRETERAS, APLICANDO LA ECONOMÍA CIRCULAR DEL						
UBICACION	: LÍNEA 2 DEL METRO DE LIMA ESTACIÓN CALLAO						
FECHA	: 20/9/2022						
No DE EXPLORACION	: E-1						
No DE MUESTRA	: M - 1						
PROFUNDIDAD DE MUESTRA	: 0.00						
No GOLFES POR CAPA	56		25		12		
PESO ESPECIFICO ( $\gamma$ )	(gr/cc)	2.35		2.24		2.08	
CONTENIDO DE HUMEDAD ANTES DE SATURAR ( $\omega$ )	(%)	13.91		13.98		13.97	
PESO ESPECIFICO SECO ( $\gamma_d$ )	(gr/cc)	2.06		1.94		1.82	
GRADO DE SATURACION ANTES DE SATURAR (Gw)	(%)	115.63		92.36		75.84	
EXPANSION							
Sobrecarga	(gr)	5642.00		5652.00		5632.00	
Tiempo (Hora)	Deformación Acumulada (%)						
0	0.000		0.000		0.000		0.000
15	133.837		180.647		346.675		701.229
22	299.165		455.545		701.229		
PENETRACION							
Penetración (pulg)	Presión Patrón (lb/pulg <sup>2</sup> )	Presión Corregida (lb/pulg <sup>2</sup> )	CBR (%)	Presión Corregida (lb/pulg <sup>2</sup> )	CBR (%)	Presión Corregida (lb/pulg <sup>2</sup> )	CBR (%)
0.100	1000	1130.00	113.00	623.73	62.37	279.02	27.90
0.200	1500	1517.00	101.13	767.24	51.15	347.71	23.18
CONTENIDO DE HUMEDAD DESPUES DE SATURAR ( $\omega$ )	(%)	16.59		20.62		24.46	
CONTENIDO DE HUMEDAD ABSORBIDO ( $\omega$ )	(%)	2.68		6.63		10.49	
GRADO DE SATURACION DESPUES DE SATURAR (Gw)	(%)	0.09		0.07		0.05	
C.B.R.	$\gamma_d$ max (100%)		$\gamma_d$ max (98%)		$\gamma_d$ max (95%)		
C.B.R. (0.1" de Penetración)	(%)	42.60		31.80		17.00	
C.B.R. (0.2" de Penetración)	(%)	34.60		26.20		14.40	

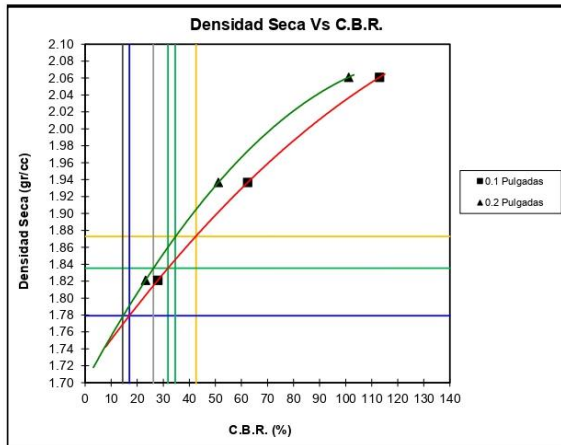
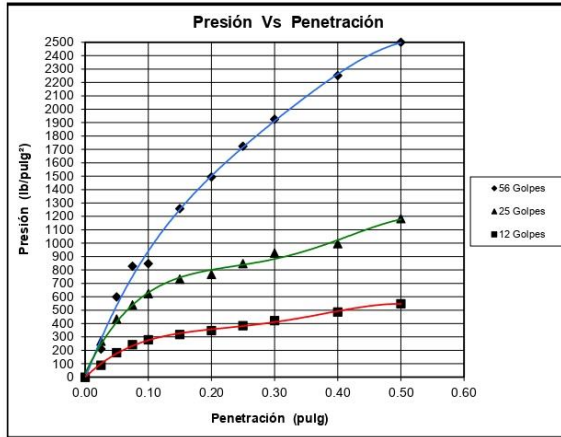
Figura N° 110: Resultado de laboratorio CBR suelo Lurín + 4% cal + 5% lodo bentonítico.  
Fuente: Elaboración Propia.



LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y ASFALTO

ENSAYO : C.B.R.  
 NORMA : N.T.P. 339.145 / ASTM D1883  
 INFORME : TITES VIRTUAL 2022  
 SOLICITANTE : BACH. STEPHANIE LOURDES SOLIS BELTRAN & BACH. FRANCO STEFANO MANRIQUE LOAYZA  
 PROYECTO : MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE EN CARRETERAS, APLICANDO LA ECONOMÍA CIRCULAR DEL LODO BENTONÍTICO MEZCLADO CON CAL PROCEDENTE DE LAS EXCAVACIONES, DE LA OBRA LÍNEA 2 DEL METRO DE LIMA

UBICACION : LÍNEA 2 DEL METRO DE LIMA ESTACIÓN CALLAO  
 FECHA : 20/9/2022  
 TIPO DE EXPLORACION : Recolección  
 No DE EXPLORACION : E-1  
 No DE MUESTRA : M - 1  
 PROFUNDIDAD DEL ESTRATO (m) : 0.00



Limite inferior Eje X	0.00
Limite superior Eje X	140.00
Limite inferior Eje Y	0.00
Limite superior Eje Y	2.10
$\gamma_d$ max (100%)	0.00 1.87
$\gamma_d$ max (98%)	140.00 1.87
$\gamma_d$ max (95%)	140.00 1.78
C.B.R.(100%) 0.1"	42.60 0.00
C.B.R.(98%) 0.1"	42.60 2.10
C.B.R.(95%) 0.1"	31.80 0.00
C.B.R.(100%) 0.2"	17.00 0.00
C.B.R.(98%) 0.2"	17.00 2.10
C.B.R.(95%) 0.2"	34.60 0.00
C.B.R.(100%) 0.2"	34.60 2.10
C.B.R.(98%) 0.2"	26.20 0.00
C.B.R.(95%) 0.2"	26.20 2.10
C.B.R.(95%) 0.2"	14.40 0.00
C.B.R.(95%) 0.2"	14.40 2.10

OBSERVACION:  
 Muestra extraída de los contenedores del lodo bentonítico en la obra, previo a su destino final en botaderos.

Figura N° 111: Resultados gráfico CBR suelo Lurín + 4% cal + 5% lodo bentonítico  
 Fuente: Elaboración Propia

c) Resultados de laboratorio suelo de Lurín con 4% de cal.

Porcentaje óptimo de humedad y peso específico máximo del suelo de Lurín con 4% de cal.

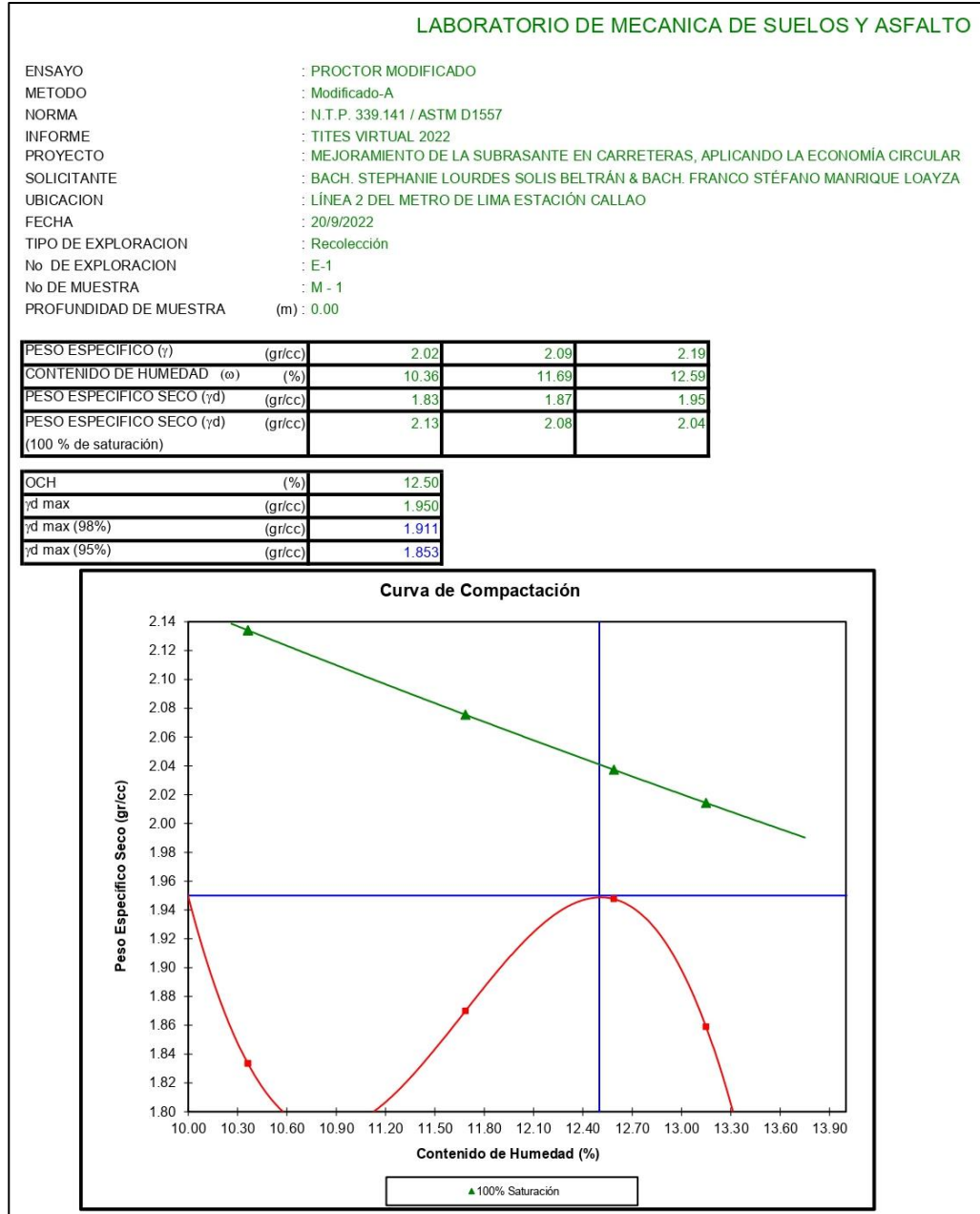


Figura N° 112: Resultados de laboratorio proctor suelo de Lurín + 4% cal.  
 Fuente: Elaboración Propia.

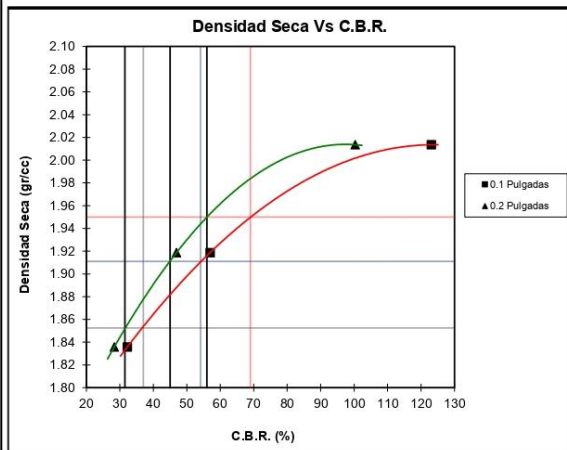
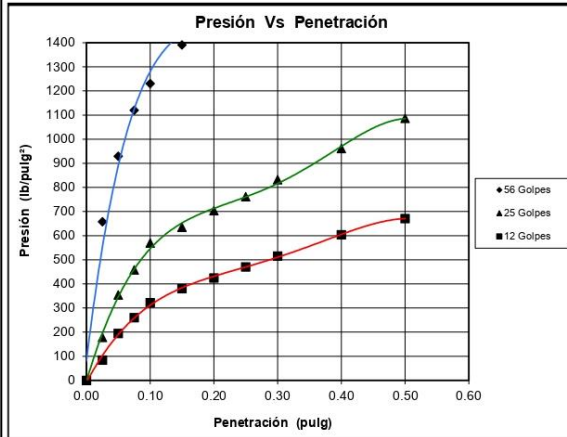
## Ensayo de CBR.

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y ASFALTO							
ENSAYO	: C.B.R.						
NORMA	: N.T.P. 339.145 / ASTM D1883						
INFORME	: TITES VIRTUAL 2022						
SOLICITANTE	: BACH. STEPHANIE LOURDES SOLIS BELTRÁN & BACH. FRANCO STÉFANO MANRIQUE LOAYZA						
PROYECTO	: MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE EN CARRETERAS, APLICANDO LA ECONOMÍA CIRCULAR DEL						
UBICACION	: LÍNEA 2 DEL METRO DE LIMA ESTACIÓN CALLAO						
FECHA	: 20/9/2022						
No DE EXPLORACION	: E-1						
No DE MUESTRA	: M - 1						
PROFUNDIDAD DE MUESTRA	: 0.00						
No GOLFES POR CAPA	56	25	12				
PESO ESPECIFICO ( $\gamma$ ) (gr/cc)	2.27	2.16	2.07				
CONTENIDO DE HUMEDAD ANTES DE SATURAR ( $\omega$ ) (%)	12.52	12.53	12.51				
PESO ESPECIFICO SECO ( $\gamma_d$ ) (gr/cc)	2.01	1.92	1.84				
GRADO DE SATURACION ANTES DE SATURAR (Gw) (%)	95.06	80.19	69.57				
EXPANSION							
Sobrecarga (gr)	5632.00	5626.00	5435.00				
Tiempo (Hora)	Deformación Acumulada (%)						
0	0.000	0.000	0.000				
15	267.674	408.420	-267.885				
22	275.547	424.128	-244.248				
PENETRACION							
Penetración (pulg)	Presión Patrón (lb/pulg <sup>2</sup> )	Presión Corregida (lb/pulg <sup>2</sup> )	CBR (%)	Presión Corregida (lb/pulg <sup>2</sup> )	CBR (%)	Presión Corregida (lb/pulg <sup>2</sup> )	CBR (%)
0.100	1000	1230.67	123.07	569.54	56.95	322.10	32.21
0.200	1500	1504.91	100.33	703.63	46.91	424.70	28.31
CONTENIDO DE HUMEDAD DESPUES DE SATURAR ( $\omega$ ) (%)	19.45		22.41		24.57		
CONTENIDO DE HUMEDAD ABSORBIDO ( $\omega$ ) (%)	6.93		9.88		12.06		
GRADO DE SATURACION DESPUES DE SATURAR (Gw) (%)	0.11		0.08		-0.14		
C.B.R.	$\gamma_d$ max (100%)		$\gamma_d$ max (98%)		$\gamma_d$ max (95%)		
C.B.R. (0.1" de Penetración) (%)	69.00		54.10		37.00		
C.B.R. (0.2" de Penetración) (%)	56.00		45.00		31.50		

Figura N° 113: Resultado de laboratorio CBR suelo de Lurín + 4% cal.

Fuente: Elaboración Propia.

ENSAYO : C.B.R.  
 NORMA : N.T.P. 339.145 / ASTM D1883  
 INFORME : TITES VIRTUAL 2022  
 SOLICITANTE : BACH. STEPHANIE LOURDES SOLIS BELTRAN & BACH. FRANCO STEFANO MANRIQUE LOAYZA  
 PROYECTO : MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE EN CARRETERAS, APLICANDO LA ECONOMÍA CIRCULAR DEL LODO BENTONÍTICO MEZCLADO CON CAL PROCEDENTE DE LAS EXCAVACIONES, DE LA OBRA LÍNEA 2 DEL METRO DE LIMA  
 UBICACION : LÍNEA 2 DEL METRO DE LIMA ESTACIÓN CALLAO  
 FECHA : 20/9/2022  
 TIPO DE EXPLORACION : Recolección  
 No DE EXPLORACION : E-1  
 No DE MUESTRA : M - 1  
 PROFUNDIDAD DEL ESTRATO (m) : 0.00



Limite inferior Eje X		20.00
Limite superior Eje X		130.00
Limite inferior Eje Y		1.80
Limite superior Eje Y		2.10
γd max (100%)	20.00	1.95
	130.00	1.95
γd max (98%)	20.00	1.91
	130.00	1.91
γd max (95%)	20.00	1.85
	130.00	1.85
C.B.R.(100%) 0.1"	69.00	1.80
	69.00	2.10
C.B.R.(98%) 0.1"	54.10	1.80
	54.10	2.10
C.B.R.(95%) 0.1"	37.00	1.80
	37.00	2.10
C.B.R.(100%) 0.2"	56.00	1.80
	56.00	2.10
C.B.R.(98%) 0.2"	45.00	1.80
	45.00	2.10
C.B.R.(95%) 0.2"	31.50	1.80
	31.50	2.10

Figura N° 114: Resultados gráficos CBR suelo Lurín + 4% cal.  
 Fuente: Elaboración Propia.

### 5.3 Cuadro resumen de resultados

Tabla 14  
Resumen de Resultado.

		Suelo de Lurín	Suelo de Lurín + 4% Cal + 5% Lodo Bentonítico	Suelo de Lurín + 4% Cal
Ensayo Proctor Modificado	Porcentaje Óptimo de Humedad	12.57%	13.92%	12.50%
	Peso Específico Seco Máximo	1.967 (gr/cc)	1.873 (gr/cc)	1.950 (gr/cc)
Ensayo CBR	CBR 100%	9.80%	42.60%	69.00%
	CBR 98%	7.00%	31.80%	54.10%
	CBR 95%	8.10%	17.00%	37.00%

Fuente: Elaboración Propia.

### 5.4 Comparación de Resultados

#### 5.4.1 Análisis e Interpretación de los Resultados

De los resultados obtenidos de los ensayos expuestos en tablas y gráficos en el capítulo de resultados, se clasificaron y determinaron las características principales pertinentes para nuestra tesis, siendo la máxima densidad seca que resulta de los ensayos de Proctor modificado y la resistencia del ensayo de CBR del suelo de tres muestras, la primera fue un suelo de Lurín, la segunda el suelo de Lurín más 4% de cal y 5% de lodo bentonítico y la última el suelo de Lurín más 4% de cal.

La densidad seca máxima la utilizamos para poder determinar el CBR en el gráfico resultante de los ensayos, en tres puntos al 95%, 98% y 100%, nosotros para la tesis usaremos el CBR al 100%, para las tres muestras antes expuestas siempre tendremos dichos ensayos

De las tablas de Clasificación según ASHTO se determinó que el suelo de Lurín, es un suelo A-4 (1), quiere decir que es un suelo de grano fino.

De los gráficos de densidad seca vs CBR resultantes de los ensayos se obtuvo una capacidad portante de 9.8 %, luego para la segunda muestra de suelo que es el suelo de Lurín mezclado con 4% de cal y 5% de lodo bentonítico se determinó una capacidad portante de 47% y finalmente para la

tercera y última muestra que es el suelo de Lurín mezclado con 4% de cal se determinó una resistencia de 69%, los resultados de la resistencia para las tres muestras de suelo nos permitirán contrastar nuestras hipótesis realizadas al inicio de nuestra investigación.

#### 5.4.2 Contrastación de Hipótesis

De la hipótesis general: La economía circular del lodo bentonítico mezclado con cal para el mejoramiento de la subrasante en carreteras es válida debido a que los resultados del ensayo del CBR demuestran que el suelo de Lurín mejora su resistencia de 9.8% a 47% al ser mezclado con 5% de lodo bentonítico y 4% de cal, ello demuestra que el lodo bentonítico que ya no puede ser reutilizado para las perforaciones y es desechado en vertederos puede ser reutilizado para el mejoramiento de las subrasantes en carreteras.

De las Hipótesis secundarias plantea que, Determinar la máxima densidad seca y el porcentaje óptimo de humedad de las tres muestras estudiadas, suelo de Lurín, suelo de Lurín mezclado con 4% de cal y 5% de lodo bentonítico y suelo de Lurín mezclado con 4% de cal, incidirán en la clasificación de subrasante en carreteras, y los resultados obtenidos de esta investigación, se concluye que las afirmaciones propuestas en las hipótesis son válidas ya que las densidades secas máximas y los porcentajes óptimos de humedad de las tres muestras estudiadas nos permitieron determinar la resistencia con los resultados obtenidos en los ensayos del CBR, cuyos resultados determinaran la validez de la hipótesis general.

De las hipótesis secundarias plantea que, Determinar el CBR de las tres muestras estudiadas, suelo de Lurín, suelo de Lurín mezclado con 4% de cal y 5% de lodo bentonítico. y suelo de Lurín mezclado con 4% de cal, incidirá en la clasificación de subrasante en carreteras, se concluye que es válida ya que los resultados obtenidos de los ensayos de CBR que nos determinan la resistencia demostraron que el suelo de Lurín mejoro su resistencia al ser mezclado con 4% de cal y 5% de lodo bentonítico.

### 5.4.3 Discusión

De la investigación realizada se obtuvieron resultados que responden a los objetivos planteados inicialmente. Los ensayos realizados nos llevaron a determinar la capacidad portante de las tres muestras de estudio, como nuestra tesis lo plantea aplicar la economía circular del lodo bentonítico mezclado con cal para el mejoramiento de la subrasante en carreteras, nos llevó a realizar ensayos a tres muestras, la primera que es un suelo de Lurín, la segunda que es el suelo de Lurín con 4% de cal y 5% de Lodo bentonítico y la tercera que es suelo de Lurín con 4% de cal, al obtener los resultados se dio validez a la hipótesis principal ya que la resistencia del suelo de Lurín aumento de 9.8% a 47 % al ser mezclado con cal y lodo bentonítico, quedando demostrado que se aplica la economía circular del lodo bentonítico para el mejoramiento de las subrasante en carreteras, incluso por el aumento significativo de la resistencia obtenida podría aplicarse para capas del pavimento que requieran mayores resistencias que la subrasante.

No obstante, es necesario mencionar que la resistencia del suelo de Lurín agregándole 4% de cal tubo un mayor resultado en la resistencia dando un valor de 69%, demostrando que la cal es una sustancia que mejora notablemente la resistencia en los suelos y al mezclarla con el Lodo bentonítico, reciclado de las excavaciones de las pantallas, podemos aplicar la economía circular del mismo.

## CONCLUSIONES

1. Del Objetivo general planteado se concluye lo siguiente: Los resultados del ensayo de CBR del suelo de Lurín mezclado con 4% de cal y 5% de lodo bentonítico a un 100%, dio como resultado una resistencia de 47% quedando demostrado que el suelo de Lurín mejoró su resistencia de 9.8% a 47% siendo útil su aplicación para el mejoramiento de subrasantes u otras capas del pavimento donde el valor del CBR sea el requerido.
2. De acuerdo a la clasificación ASHTO, se determinó que el suelo de Lurín, es un suelo A-4 (1), quiere decir que es un suelo Limoso, apto para los ensayos que se realizaron en el laboratorio de suelos para la clasificación de la subrasante.
3. De los ensayos realizados al suelo de Lurín en el laboratorio de suelos, se obtuvo una densidad seca máxima a un 95% de 1.869 (gr/cc), un porcentaje óptimo de humedad de 12.57% y un CBR al 100% de 9.8%, concluyendo ello una Clasificación de la subrasante como una S2: Subrasante regular, no obstante que el suelo de Lurín ya es un suelo óptimo para la subrasante, de todas formas, se tomó dicho suelo para los ensayos con cal y lodo bentonítico.
4. De los ensayos realizados al suelo de Lurín con 4% de Cal y 5% de Lodo bentonítico en el laboratorio de suelos, se obtuvo una densidad seca máxima a un 95% de 1.779 (gr/cc), un porcentaje óptimo de humedad de 13.92% y un CBR al 100% de 42.60%, concluyendo ello una Clasificación de la subrasante como una S4: Subrasante muy buena, concluyendo que el suelo de Lurín mejoró su resistencia al agregarle 4% de cal y 5% de Lodo bentonítico, demostrando ello que dicha mezcla puede ser aplicada en suelos de bajo valor de CBR para poder ser utilizados como sub rasantes.
5. De los ensayos realizados al suelo de Lurín con 4% de Cal en el laboratorio de suelos, se obtuvo una densidad seca máxima a un 95% de 1.853 (gr/cc), un porcentaje óptimo de humedad de 12.50% y un CBR al 100% de 69%, concluyendo ello una Clasificación de la subrasante como una S4: Subrasante muy buena,



quedando demostrado de la cal es una sustancia alcalina que tiene como propiedad mejorar el valor de CBR en los suelos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y ANEXOS

- Aguila, O. P. (2020). Instalacion de una planta de tratamiento de residuos de contruccion y demolicion con la finalidad de mitigar el impacto ambiental. *Instalacion de una planta de tratamiento de residuos de contruccion y demolicion con la finalidad de mitigar el impacto ambiental*. Lima, Lima, Peru: Universidad Ricardo Palma.
- Alquires Enriquez. (s.f.). *Maquinaria y Equipos para la Construcción*. Obtenido de <https://alquileresenriquez.com/f-compactadores/>
- Ambiente, M. d. (2008). D.S. 021-2008-MTC Reglamento Nacional de Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos. *D.S. 021-2008-MTC Reglamento Nacional de Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos*.
- ANCADE, ANTER & IECA. (2008). Manual de Estabilización de Suelos con Cemento o Cal. España. Obtenido de <http://www.anter.es/pdf/MANUAL-SUELOS.pdf>
- Andina. (9 de enero de 2022). *Andina Agencia Peruana de Noticias*. Obtenido de <https://andina.pe/agencia/noticia-elaboran-plan-cierre-progresivo-botadero-informal-chimbote-738581.aspx>
- Banco Mundial. (20 de Setiembre de 2018). *Los desechos a nivel mundial crecerán un 70 % para 2050, a menos que se adopten medidas urgentes*. Obtenido de Banco Mundial: <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2018/09/20/global-waste-to-grow-by-70-percent-by-2050-unless-urgent-action-is-taken-world-bank-report#>
- Bauzá Castelló, J. D. (2015). El tratamiento de los suelos arcillosos con cal. Comportamiento mecánico y evolución a largo plazo ante cambios de humedad. *Tesis Doctoral*. Universidad de Sevilla. Obtenido de : <https://core.ac.uk/download/pdf/51395864.pdf>
- Bezzolo, & Angelo, D. (2020). Manejo de los residuos de la construcción producidos en la ciudad de Chiclayo. Su Tratamiento, Reciclaje y Eliminación a través de una escombrera. *Tesis de Maestría*. Perú: Universidad Nacional de Piura. Obtenido

de <https://repositorio.unp.edu.pe/bitstream/handle/UNP/2177/IAS-BEZ-DAN-2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Borja, M. (2016). *Metodología de Investigación científica para ingenieros*. Chiclayo.
- Brackel Constructions Products S.L. . (2015). *Estabilización de Suelos y Control de Erosión*. Obtenido de <http://estabilizaciondesuelos.blogspot.com/2015/>
- Braja M. Das. (2014). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (Cuarta ed.). Obtenido de [https://www.academia.edu/37854899/Fundamentos\\_de\\_Ingenieria\\_Geotecnica\\_Braja\\_M\\_Das](https://www.academia.edu/37854899/Fundamentos_de_Ingenieria_Geotecnica_Braja_M_Das)
- CChC, S. (Enero de 2020). *Gestión de residuos sólidos para mejorar la productividad en la empresa*. Obtenido de Gestión de residuos sólidos para mejorar la productividad en la empresa: <https://www.researchgate.net/publication/338410066>
- Chávez Arbayza, D. A., & Odar Yabar, G. (22 de mayo de 2019). Propuesta de estabilización con cal para subrasantes con presencia de suelos arcillosos en bofedales y su influencia en el pavimento rígido bajo la metodología de diseño AASHTO 93 aplicado al tramo 1 de la Carretera Oyón-Ambo. *Tesis de Pregrado*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Obtenido de [https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/625903/Ch%C3%A1vez\\_ad.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/625903/Ch%C3%A1vez_ad.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- Ciclo. (2019). *Reciclar para construir*. Obtenido de <https://ciclo.com.pe/>
- Congreso de la República. (1997). Ley N° 26842 Ley General de Salud. *Ley N° 26842 Ley General de Salud*. Perú: Ministerio de Salud.
- Congreso de la República. (2000). Ley 27314 PCM. Ley General de Residuos Sólidos. *Ley 27314 PCM. Ley General de Residuos Sólidos*. Ministerio del Ambiente.
- Congreso de la Republica. (2001). Ley N° 27314 – Ley General de Residuos Sólidos. *Ley N° 27314 – Ley General de Residuos Sólidos*. Perú: Ministerio del Ambiente.
- Congreso de la República. (2004). Ley 28245. Ley Marco del Sistema Nacional de Gestión Ambiental. *Ley 28245. Ley Marco del Sistema Nacional de Gestión Ambiental*. Perú: Ministerio del Ambiente.

- Congreso de la República. (2004). Ley 28256-PCM Ley que Regula el transporte Terrestres de Materiales y Residuos Peligrosos. *Ley 28256-PCM Ley que Regula el transporte Terrestres de Materiales y Residuos Peligrosos*. Perú: Ministerio del Ambiente.
- Congreso de la Republica. (2005). Ley 28611 Ley general del Ambiente. *Ley 28611 Ley general del Ambiente*. Perú: Ministerio del Ambiente.
- Congreso de la República. (2106). Decreto Legislativo N° 1278 Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos. *Decreto Legislativo N° 1278 Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos*. Perú: Ministerio del Ambiente.
- Cotrino, Q. (2018). Gestión ambiental y residuos sólidos en la construcción del edificio multifamiliar Luxury según la ley n° 27314, en el distrito de Jesús maría-2018. *Gestión ambiental y residuos sólidos en la construcción del edificio multifamiliar Luxury según la ley n° 27314, en el distrito de Jesús maría-2018*. Lima, Lima, Perú: Universidad Cesar Vallejo.
- Diario Independiente Tribuna. (2019). *Diario Independiente Tribuna*. Obtenido de <https://tribunacampeche.com/carmen/2019/12/31/lodo-de-perforacion-invade-zonas-costeras-atatecas/>
- Doroteo Cid, C. (2014). Mejoramiento de Suelo por Sustitución de Material. México: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Obtenido de <https://repositorioinstitucional.buap.mx/bitstream/handle/20.500.12371/5862/718114TL.pdf?sequence=1>
- Empresas, Economía y Sociedad en el Peru*. (2022). Obtenido de Carreteras en Perú, informalidad y peligro: <https://laeconomia.pe/carreteras-en-peru-informalidad-y-peligro/>
- Environmental Resources Management. (2015). *ANÁLISIS COMPLEMENTARIO AL ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL SEMI-DETALLADO DEL PROYECTO "CONSTRUCCIÓN DE LA LÍNEA 2 Y RAMAL AV. FAUCETT-GAMBETTA DE LA RED BÁSICA DEL METRO DE LIMA Y CALLAO"*.
- Espaliat, M. (2017). *Economía circular y sostenibilidad: Nuevos enfoques para la*. Obtenido de [https://wolfypablo.com/documentacion/documentos/2017-10/710%20Economia\\_circular\\_y\\_sostenibilidad.pdf](https://wolfypablo.com/documentacion/documentos/2017-10/710%20Economia_circular_y_sostenibilidad.pdf)

- Feliciano, D. (2020). Residuos Sólidos en el Perú. *Residuos Sólidos en el Perú*. Lima, Lima, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Flores, S. C. (2018). Gestión de residuos sólidos de la actividad de demolición; estudio de casos profesionales y especialistas en la zona financiera del distrito de San Isidro en el 2018. *Gestión de residuos sólidos de la actividad de demolición; estudio de casos profesionales y especialistas en la zona financiera del distrito de San Isidro en el 2018*. Lima, Lima, Perú: Universidad Ricardo Palma.
- García Espinel, J. D. (2009). Reciclado de Material asimilable a lodo procedente de la excavación de pantallas en la Ampliación del Campo de Vuelos del Aeropuerto de Málaga. *Revista de Obras Públicas*, 23-38.
- Geotextan. (s.f.). Obtenido de <https://geotexan.com/caso-practicos-de-uso-de-geotextiles-en-carretera-ponencia-geosintec-iberia/>
- González Pascual, A. (2017). EXCAVACIÓN DE TÚNELES EN FRENTES MIXTOS MEDIANTE TUNELADORA TIPO EPB. *TESIS DE MAESTRÍA*. MÉXICO. Obtenido de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/13741/1/Excavaci%C3%B3n%20de%20t%C3%BAneles%20en%20frentes%20mixtos%20mediante%20tuneladora%20tipo%20EPB.pdf>
- Guzman, C. I. (27 de Marzo de 2016). El drama de los residuos sólidos en Lima. *Correo*.
- Hernandez, L. (2007). *Administración y manejo de los desechos en proyectos de construcción*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica: Instituto tecnologico de Costa Rica.
- Hernandez, R. (2014). *Metodología de la investigación*. Mexico: McGRAW-HILL.
- Instituto Didactia. (Diciembre de 2018). *INSTITUTO DIDACTIA*. Obtenido de INSTITUTO DIDACTIA: <https://www.ididactia.com/2018/12/11/evolucion-de-la-excavacion-mecanica-de-tuneles-con-tbm/>
- Interempresas. (2017). *Interempresas Canales Sectoriales*. Obtenido de <https://www.interempresas.net/Agua/Articulos/197743-Characterizacion-y-descontaminacion-de-suelos-y-aguas-subterranas.html>

- Jiménez Fuentes, Y. A. (2017). Optimización de materiales de excavación de reutilización industrial (MERI) de la mina de carbón "Cerrolargo" para la estabilización de suelos en el desarrollo de infraestructura vial mediante algoritmos evolutivos multiobjetivo (AEMO). *Tesis de Maestría*. Colombia: Universidad Santo Tomás. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/9167/JimenezYolanda2017.pdf?sequence=1>
- Joaquin Diaz y Daniel. (2011). Estabilización de Lodos Bentoníticos procedentes de Tuneladoras Tratados con cal, 2011. (C. Fresno, Ed.) Obtenido de <http://geoserver.ing.puc.cl/info/conferences/PanAm2011/panam2011/pdfs/GEO11Paper1042.pdf>
- Juan Diego Bautiza Castello. (2015). El tratamiento de los suelos Arcillosos con cal. *Tesis Doctoral*. España.
- Kelly, E. S. (1990). *Introducción al Procesamiento de Minerales*.
- La Republica. (2021). Obtenido de La Republica: <https://larepublica.pe/sociedad/2021/07/19/trujillo-retiran-desmante-de-60-puntos-criticos-de-la-ciudad-lrmd/>
- Linares Siesquén, L. (2021). Evaluación y Diagnóstico del Estado del Pavimento Flexible Utilizando la Metodología PCI y la Viga Benkelman en la Av. Confraternidad en el PP JJ Ricardo Palma en la Ciudad de Chiclayo. *Tesis de Pregrado*. Universidad San Martín de Porres. Obtenido de [https://repositorio.usmp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12727/8534/linares\\_slv.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.usmp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12727/8534/linares_slv.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Lopez, A. (2012). Guía práctica para realizar el Estudio de Impacto Ambiental en una obra civil ejemplarizado en una obra Hidráulica. *Guía práctica para realizar el Estudio de Impacto Ambiental en una obra civil ejemplarizado en una obra Hidráulica*. Quito, Ecuador: Universidad San Francisco de Quito.
- Machco Caranca, E. Y. (2019). Aplicación de cal para mejorar la estabilidad de subrasante en la Calle Luna Pizarro A.H. Cueva de los Tallos, Ventanilla, 2019. *Tesis de Pregrado*. Universidad Cesar Vallejo.

- Máxima Online. (2018). *Maxima Online*. Obtenido de [https://www.maximaonline.com.ar/Nota-52173-prueban\\_sistema\\_con\\_cal\\_para\\_mejorar\\_la\\_transitabilidad\\_en\\_caminos\\_naturales](https://www.maximaonline.com.ar/Nota-52173-prueban_sistema_con_cal_para_mejorar_la_transitabilidad_en_caminos_naturales)
- Metro de Lima Linea 2. (2015). *Sociedad Concesionaria Metro de Lima Linea 2*. Obtenido de Sociedad Concesionaria Metro de Lima Linea 2: <https://www.metrolima2.com/inicio.php>
- MINAM. (2009). Decreto Supremo N°012-2009-MINAM-Política Nacional del Ambiente Lineamientos para Residuos Sólidos. *Decreto Supremo N°012-2009-MINAM-Política Nacional del Ambiente Lineamientos para Residuos*.
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (2014). Manual de Carreteras. Perú. Obtenido de <https://geotexan.com/caso-practicos-de-uso-de-geotextiles-en-carretera-ponencia-geosintec-iberia/>
- Moale Quispe, A. B., & Rivera Justo, E. J. (5 de diciembre de 2019). Estabilización química de suelos arcillosos con cal para uso como subrasante en vías terrestres de la localidad de Villa Rica. *Tesis de Pregrado*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Obtenido de <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/648846>
- Mongobay. (2017). *Periodismo Ambiental Independiente en Latinoamérica*. Obtenido de <https://es.mongabay.com/2017/04/ecuador-comunidades-denuncian-malas-practicas-ambientales-del-proyecto-minero-mirador/>
- Montenegro E. y Sandoval Y. (2021). ANÁLISIS ECONÓMICO DE UNA INFRAESTRUCTURA, CONSIDERANDO EL APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN BASADO EN LA ECONOMÍA CIRCULAR . *Tesis profesional*. Lima, Perú: Universidad Ricardo Palma.
- Movilla Quesada, D. (2012). Optimización y Análisis del Comportamiento de Materiales tratados con Cal en Carreteras: Aplicación a lodos de Tuneladora y mezclas Bituminosas Santander España. *Tesis de Maestría*. España: Universidad de Cantabria.

- Nacional Lime Association. (2004). Manual de Estabilización de Suelo Tratado con Cal. *Estabilización y Modificación con Cal*. Obtenido de [https://www.lime.org/documents/publications/free\\_downloads/construct-manual-spanish2004.pdf](https://www.lime.org/documents/publications/free_downloads/construct-manual-spanish2004.pdf)
- Norma CE.020 Estabilización de Suelos y Taludes. (2012). Perú. Obtenido de [http://www3.vivienda.gob.pe/dnc/archivos/Estudios\\_Normalizacion/Normalizacion/normas/NORMACE020.pdf](http://www3.vivienda.gob.pe/dnc/archivos/Estudios_Normalizacion/Normalizacion/normas/NORMACE020.pdf)
- Noticias al Día. (Febrero de 2021). *Noticias al Día*. Obtenido de <https://noticiasaldia24.com/en-pasaje-alcaldia-realiza-bordillos-y-compactacion-en-calle-atahualpa/#>
- Olivares, & De la Cruz. (2020). Instalación de una Planta de Tratamiento de Residuos de Construcción y Demolición con la Finalidad de Mitigar el Impacto Ambiental. *Tesis de Pregrado*. Perú: Universidad Ricardo Palma. Obtenido de [https://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14138/3826/CIV-T030\\_46934748\\_T%20%20%20OLIVARES%20PURUHUYA%20JOHANA%20AYLIN.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14138/3826/CIV-T030_46934748_T%20%20%20OLIVARES%20PURUHUYA%20JOHANA%20AYLIN.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Pacheco Bustos, C., Fuentes Pumarejo, L., Sánchez Cotte, E., & Rondón Quintana, H. A. (2017). Residuos de Construcción y Demolición (RCD), una perspectiva de aprovechamiento para la ciudad de Barranquilla desde su modelo de GFestión. *Ingeniería y Desarrollo*, 1-23. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/852/85252030015.pdf>
- Pilotes Terrates. (Noviembre de 2020). CONSTRUCCIÓN DE PANTALLAS DE CONCRETO EXCAVADA CON CUCHARAS EN ESTACIONES. Lima, Peru: Línea 2 del Metro de Lima.
- Piñeiro, L. (2015). Estudio comparativo de los Sistemas de Gestión de RCDs entre España y Brasil, Universidad de Coruña, Brasil. . *Estudio comparativo de los Sistemas de Gestión de RCDs entre España y Brasil, Universidad de Coruña, Brasil*. . Coruña, Brasil: Universidad de Coruña.
- Piqueras, V. Y. (25 de Junio de 2015). *Universidad Politecnica de Valencia*. Obtenido de Universidad Politecnica de Valencia: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2015/06/22/metodo-cut-and-cover-de-construccion-de-tuneles/>



- Pontificia Universidad Católica del Perú. (2019). ¿Que es la economía circular y cuál es su importancia? *Noticias*. Obtenido de <https://www.pucp.edu.pe/climadecambios/noticias/queeslaeconomiacircularycualsuimportancia/>
- Quesada, D. M. (Julio de 2012). OPTIMIZACIÓN Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE MATERIALES TRATADOS CON CAL EN CARRETERAS: APLICACION A LODOS DE TUNELADORAS Y MEZCLAS BITUMINOSAS. *Tesis Doctoral*. Santander, España: Universidad Cantabria.
- Quimacer. (s.f.). Tratamiento y Eliminación de Lodos Bentoníticos. España. Obtenido de <https://docplayer.es/227486618-Tratamiento-y-eliminacion-de-lodos-bentoniticos.html>
- Quintana, P. B. (2017). Residuos de construcción y demolición (RDC), una perspectiva de aprovechamiento para la ciudad de barranquilla desde su modelo de gestión. *Revista de Ingeniería y Desarrollo*, 534-555.
- RD N°18 2014 MTC. (2017). *Manual de Ensayo de Materiales*. Perú: Ministerio de transporte y comunicaciones.
- RD N°18 2014 MTC. (2017). *Manual de Ensayo de Materiales*. Perú: Ministerio de transporte y comunicaciones.
- República, C. d. (1997). Ley 26834. Ley de Áreas Naturales Protegidas y su Reglamento, D.S. N° 038-2001-AG. *Ley 26834. Ley de Áreas Naturales Protegidas y su Reglamento, D.S. N° 038-2001-AG*. Perú: Ministerio del Ambiente.
- Republica, L. (2021). Obtenido de aa
- Reyna, B. (febrero de 2022). *Andina agencia peruana de noticias*. Obtenido de Andina agencia peruana de noticias: [https://www.youtube.com/watch?v=UvLDV\\_hVClo](https://www.youtube.com/watch?v=UvLDV_hVClo)
- Romero, R. (2014). El estudio de Presión Balanceada en la estación zapata de la Línea 12 del Metro. *El estudio de Presión Balanceada en la estación zapata de la Línea 12 del Metro*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

- RPP. (2016). *RPP*. Obtenido de <https://rpp.pe/lima/obras/cuales-seran-las-estaciones-de-la-linea-2-del-metro-de-lima-noticia-971936>
- Ruiz Llamactanta, E. N. (2013). Impacto Ambiental Generado por la construcción del camino vecinal Cullanmayo-Nudillo. *Impacto Ambiental Generado por la construcción del camino vecinal Cullanmayo-Nudillo*. Cajamarca, Cajamarca, Perú: Universidad Nacional de Cajamarca. Obtenido de <https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14074/469/T%20625.7%20R934%202013.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Santa Cruz Marín, J. (2019). Determinación del Espesor de Mejoramiento de Subrasante con presencia de Suelos blandos. *Tesis de Pregrado*. Universidad Peruana Unión. Obtenido de <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/2223>
- Suarez, S., Andrés, J., Mahecha, L., & Calderón. (2018). Diagnóstico y propuesta para la gestión de los residuos de construcción y demolición en la ciudad de Ibagué (Colombia). *Gestión y Ambiente* 21 (1), 9-21. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6687508.pdf>
- Suarez, S., Betancourt, C., & Molina, J. y. (s.f.). La Gestión de los Resodios de Construcción y Demolición en Villavicencio: Estado Actual, Barreras e Instrumentos de Gestión. *Entramado* 15 (1), 224 - 244.
- Suarez, S., Betancourt, C., Molina, J., & Mahecha, L. (2019). La gestión de los residuos de construcción y demolición en Villavicencio: estado actual, barreras e instrumentos de gestión. *Entramado*, 15 (1). Obtenido de <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/entramado/article/view/5408>
- Tocon, B. (2018). ) Aplicación del Análisis de Ciclo de Vida a la gestión de los Residuos de Construcción. ) *Aplicación del Análisis de Ciclo de Vida a la gestión de los Residuos de Construcción*. Sevilla, España: Universidad de Sevilla.
- Tuck, L. (20 de setiembre de 2018). *Banco Mundial*. Obtenido de Banco Mundial: <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2018/09/20/global-waste-to-grow-by-70-percent-by-2050-unless-urgent-action-is-taken-world-bank-report#>

- Ulloa López, H. (19 de junio de 2015). Estabilización de suelos cohesivos por medio de Cal en las Vías de la comunidad de San Isidro del Pegón, municipio Potosí-Rivas. *Tesis de Pregrado*. Nicaragua: Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua.
- Universidad Ricardo Palma. (2016 ). Lima, Perú: Laboratorio de Suelo de la URP.
- Usedo Valles, R. M. (2015). Estudio y análisis de la utilización de la cal para el patrimonio arquitectónico. *Maestría*. España: Universidad Politécnica de Valencia. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/60200/Memoria.pdf>
- Vargas E. (2020). El reciclaje de residuos por demolición de edificaciones menores en el desarrollo sostenible caso distrito Jesús María Lima. *Tesis Doctoral*. Universidad Nacional Federico Villarreal. Obtenido de Tesis Doctoral.
- Vasques Calderon, J. (2015). Impacto ambiental en el proceso de construcción de una carretera en la zona de alto andina de la región de Puno. *Impacto ambiental en el proceso de construcción de una carretera en la zona de alto andina de la región de Puno*. Puno, Puno, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú. Obtenido de [https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/5965/VASQUEZ\\_JOSE\\_IMPACTO\\_AMBIENTAL\\_PROCESO\\_CONSTRUCCION.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/5965/VASQUEZ_JOSE_IMPACTO_AMBIENTAL_PROCESO_CONSTRUCCION.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Villalobos, F. (2016). *Mecánica de suelos 2*. Chile: UCSC.
- Zevallos Gamarra, R. E. (2017). Identificación y Evaluación de las fallas superficiales en los Pavimentos Flexibles de alguna de las vías de la ciudad de Barranca. *Tesis de Maestría*. Universidad César Vallejo. Obtenido de <https://docplayer.es/96887416-Identificacion-y-evaluacion-de-las-fallas-superficiales-en-los-pavimentos-flexibles-de-algunas-vias-de-la-ciudad-de-barranca-2017.html>

