



Universidad Científica del Perú - UCP
*Registrado en el Asiento N° A00010 de la Partida N° 11000318, Personas Jurídicas de Iquitos,
Superintendencia de los Registros Públicos - SUNARP*

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL**

TESIS

**“MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE CON ADICIÓN
DE CAL ESTRUCTURAL Y SU INFLUENCIA EN LA
CAPACIDAD PORTANTE DE LA CARRETERA
SHUCUSHUYACU - LAGO CUIPARI – TENIENTE CESAR
LÓPEZ – LORETO”**

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

ASESOR:

M.Sc. Ing. Víctor Eduardo Samamé Zatta

AUTORES:

ALVA RUIZ, Roy Artidoro

PEZO HONORIO, Líder David

TARAPOTO – PERÚ

2021

DEDICATORIA

A Dios, por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos y metas.

A mis padres, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, capaz de afrontar los problemas día a día, quienes merecen más que el título que quiero obtener, siempre los partícipes de todos mis logros y mi formación. Gracias

Roy Artidoro Alva Ruiz

Dedicamos esta tesis a Dios padre todo poderoso, quién nos guio por el buen camino, brindándonos fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban, enseñándonos a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad, ni desfallecer en el intento.

A nuestras familias en especial a nuestros padres por su apoyo, consejos, comprensión, amor, ayuda en los momentos difíciles, y por la disponibilidad con los recursos necesarios para estudiar. Nos han dado todo lo que somos como persona, nuestros valores y principios para conseguir nuestros objetivos.

Líder David Pezo Honorio

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer primero a Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, metas, quien siempre me guio en mi camino.

Especialmente agradezco a mis padres, por sus sabias enseñanzas y por el sacrificio que hicieron por mí. Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores y por la motivación constante de mejorar.

Roy Artidoro Alva Ruiz

A Dios por habernos permitido llegar hasta esta etapa muy importante de nuestras vidas.

Agradecer a todos los profesores de la Universidad Científica del Perú, nuestra alma mater, a los profesores ingenieros por sus enseñanzas y experiencias transmitidas.

También deseamos agradecer a todas las personas que han estado a nuestro lado apoyándonos en este proceso, en especial a nuestros compañeros de clases.

Líder David Pezo Honorio

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN DE LA UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ - UCP

El presidente del Comité de Ética de la Universidad Científica del Perú - UCP

Hace constar que:

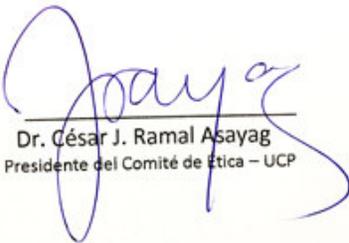
La Tesis titulada:

**“MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE CON ADICIÓN DE CAL ESTRUCTURAL
Y SU INFLUENCIA EN LA CAPACIDAD PORTANTE DE LA CARRETERA
SHUCUSHUYACU - LAGO CUIPARI – TENIENTE CESAR LÓPEZ – LORETO”**

De los alumnos: **ALVA RUIZ ROY ARTIDORO Y PEZO HONORIO LÍDER DAVID**,
de la Facultad de Ciencias e Ingeniería, pasó satisfactoriamente la revisión
por el Software Antiplagio, con un porcentaje de **14% de plagio**.

Se expide la presente, a solicitud de la parte interesada para los fines que
estime conveniente.

San Juan, 29 de Noviembre del 2021.



Dr. César J. Ramal Asayag
Presidente del Comité de Ética – UCP

Document Information

Analyzed document	UCP_INGENIERÍA CIVIL_2021_TESIS_ROYALVA_LIDERPEZO_V1.pdf (D120353663)
Submitted	2021-11-29T16:30:00.0000000
Submitted by	Comisión Antiplagio
Submitter email	revision.antiplagio@ucp.edu.pe
Similarity	14%
Analysis address	revision.antiplagio.ucp@analysis.orkund.com

Sources included in the report

W	URL: https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/648846/MoaleQ_A.pdf?sequence=3&isAllowed=y Fetched: 2020-05-16T06:24:07.9730000		27
W	URL: https://repositorio.utea.edu.pe/bitstream/utea/152/1/Tesis-Estabilizaci%C3%B3n%20de%20suelos%20arcillosos%20con%20cal.pdf Fetched: 2021-11-08T22:49:57.3830000		6
W	URL: http://repositorio.ucp.edu.pe/bitstream/handle/UCP/1241/RAMOS%20P%C3%89REZ%20MERCY%20JUDIT%20Y%20ROBLEDO%20MERINO%20STHEFANY%20-%20TESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y Fetched: 2021-11-26T21:42:38.5770000		1
SA	TESIS_PEÑA LOPEZ KIARITH Y SIFUENTES ALVAREZ NAYSHA.pdf Document TESIS_PEÑA LOPEZ KIARITH Y SIFUENTES ALVAREZ NAYSHA.pdf (D119091771)		1
SA	TESIS_KATERIN_JHONY CORREGIDO.pdf Document TESIS_KATERIN_JHONY CORREGIDO.pdf (D119121447)		3
W	URL: https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/22856/1/TRABAJO%20DE%20GRADO%20MANUEL%20GERARDO%20PARRA%20GOMEZ%20505587.pdf Fetched: 2021-11-29T16:35:00.0000000		1
SA	Universidad Científica del Perú / UCP_2021_INGCIVIL_TSP_HERNANRIOS_ARNOLDSOLANO_V1.pdf Document UCP_2021_INGCIVIL_TSP_HERNANRIOS_ARNOLDSOLANO_V1.pdf (D110619292) Submitted by: revision.antiplagio@ucp.edu.pe Receiver: revision.antiplagio.ucp@analysis.orkund.com		1

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

Con Resolución Decanal **N° 728-2021-UCP-FCEI** del 22 de octubre del 2021, la FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ - UCP designa como Jurado Evaluador de la sustentación de tesis a los señores:

- | | |
|--|------------|
| • Ing. Caleb Rios Vargas, M.Sc. | Presidente |
| • Ing. Luis Armando Cuzco Trigozo, M.Sc. | Miembro |
| • Ing. Isaac Duhamel Castillo Chalco. | Miembro |

Como Asesor: **Ing. Víctor Eduardo Samamé Zatta, M. Sc.**

En la ciudad de Tarapoto, siendo las 18:00 horas del día 22 de diciembre del 2021, modo virtual con la plataforma del ZOOM, supervisado en línea por la Secretaria Académica de la Facultad y el Director de Gestión Universitaria de la Filial Tarapoto de la Universidad, se constituyó el Jurado para escuchar la sustentación y defensa de la Tesis: **“MEJORAMIENTO DE LA SUB RASANTE CON ADICIÓN DE CAL ESTRUCTURAL Y SU INFLUENCIA EN LA CAPACIDAD PORTANTE DE LA CARRETERA SHUCUSHUYACU – LAGO CUIPARI – TENIENTE CÉSAR LÓPEZ – LORETO”**

Presentado por los sustentantes:

ROY ARTIDORO ALVA RUIZ y LIDER DAVID PEZO HONORIO

Como requisito para optar el título profesional de: **INGENIERO CIVIL.**

Luego de escuchar la sustentación y formuladas las preguntas las que fueron: **ABSUELTAS.**

El Jurado después de la deliberación en privado llegó a la siguiente conclusión:

La sustentación es: **APROBADA POR MAYORÍA CON LA NOTA DE QUINCE (15).**

En fe de lo cual los miembros del Jurado firman el acta.



Presidente



Miembro



Miembro

APROBACIÓN

Tesis sustentada en acto público el día 22 de diciembre del 2021 a las 06.00 p.m.



M.Sc. Ing. CALEB RÍOS VARGAS
PRESIDENTE DEL JURADO



M.Sc. Ing. LUIS ARMANDO CUZCO TRIGOZO
MIEMBRO DEL JURADO



Ing. ISAAC DUHAMEL CASTILLO CHALCO
MIEMBRO DEL JURADO



M.Sc. Ing. VICTOR EDUARDO SAMAMÉ ZATTA
ASESOR

ÍNDICE

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO	3
APROBACIÓN	4
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	11
1.1 Introducción	11
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	12
2.1 ANTECEDENTES DEL ESTUDIO.....	12
2.1.1 ANTECEDENTES INTERNACIONALES	12
2.1.2 ANTECEDENTES NACIONALES.....	14
2.1.3 ANTECEDENTES LOCALES.....	17
2.2 BASES TEÓRICAS.....	17
2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	37
CAPÍTULO III: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	41
3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	41
3.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	41
3.2.1 PROBLEMA GENERAL.....	41
3.2.2 PROBLEMAS ESPECIFICOS.....	42
3.3 OBJETIVOS.....	42
3.3.1 OBJETIVO GENERAL	42
3.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	42
3.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	42
3.5 LIMITACIONES	43
3.6 HIPÓTESIS.....	43
3.6.1 Hipótesis General.....	43
3.6.2 Hipótesis General.....	43
3.7 VARIABLES.....	43
3.7.1 Identificación de las variables.....	43
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA	44
4.1 TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.....	44
4.1.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN	44
4.1.2 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	44

4.2 POBLACIÓN Y MUESTRA.....	44
4.2.1 POBLACIÓN	44
4.2.2 MUESTRA.....	44
4.3 LOCALIZACIÓN Y UBICACIÓN DE LA ZONA DE EXTRACCIÓN	44
4.4 MÉTODOS, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	46
4.4.1 TÉCNICAS	46
4.4.2 INSTRUMENTO	46
4.4.3 PROCEDIMIENTO	46
4.4.4 CARACTERISTICAS DEL ESTABILIZANTE.....	48
4.5 PROCESAMIENTO, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS.....	49
4.5.1 ENSAYOS DE LABORATORIO	49
4.5.2 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO.....	50
4.5.3 ENSAYOS DE CONSISTENCIA: LÍMITES DE ATTERBERG	51
CAPÍTULO V: RESULTADOS.....	55
5.1 GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL SUELO NATURAL Y LA CAL.....	55
5.2 ENSAYOS DE GRANULOMETRÍA Y CONSISTENCIA DEL SUELO NATURAL.....	55
5.3 RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS CON 9% DE CAL	61
5.4 RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS CON 15% DE CAL	62
5.5 RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS CON 21% DE CAL	62
5.6 ANALISIS DE RESULTADOS.....	63
CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN DE RESULTADOS	68
6.1 DISEÑO SOBRE LA SUBRASANTE NATURAL CON UN CBR 3.3.....	68
6.2 DISEÑO SOBRE UNA SUBRASANTE MEJORADA CON UN CBR 5.9 %.....	69
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	71
7.1 CONCLUSIONES.....	71
7.2 RECOMENDACIONES.....	72
CAPÍTULO VIII: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Estabilización de suelos por combinación de material.....	20
Ilustración 2: Estabilización por sustitución de suelos.....	20
Ilustración 3: Moléculas de la cal	24
Ilustración 4: Cal	24
Ilustración 5: Estabilización de suelos con Cal.....	26
Ilustración 6: Compactación de suelos.....	27
Ilustración 7: Reacción puzolánica entre la cal y un suelo. Adaptado de “Materiales para base y subbase”	28
Ilustración 8: Aparato Casa Grande para ensayo de LL. Manual de Ensayo de Materiales	35
Ilustración 9: Localización de la zona de extracción de muestras.....	45
Ilustración 10: Carretera Shucshuyacu – Lago Cuipari	45
Ilustración 11: Excavación con la máquina excavadora	47
Ilustración 12: Calicata de 1.50 m de profundidad para extracción de suelo arcilloso	47
Ilustración 13: Recolección de muestras alteradas del suelo arcilloso.....	48
Ilustración 14: Cal de obra	49
Ilustración 15: Secado de la muestra en cocina eléctrica	50
Ilustración 16: Lavado de la muestra por la malla N°200	50
Ilustración 17: Reducción del tamaño de las partículas del suelo, para realizar el ensayo de consistencia	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características físicas de la cal.....	24
Tabla 2: Clasificación de subrasante según su valor CBR.....	37
Tabla 3: Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de Cal.	39
Tabla 4: Resultado del ensayo de gravedad especifica del suelo natural y cal	55
Tabla 5: Análisis mecánico por tamizado.....	56
Tabla 6: Resultados del ensayo de Limite Liquido.....	57
Tabla 7: Resultados del ensayo de Limite Plástico.....	58
Tabla 8: índice de Plasticidad.....	58
Tabla 9: CBR luego de la saturación.....	59
Tabla 10: Resultados del CBR al 95% y 100% de la MDS.....	60
Tabla 11: Resultados de ensayos del suelo natural.....	61
Tabla 12: Resultados de ensayos del suelo con cal al 9%.....	61
Tabla 13: Resultados de ensayos del suelo con cal al 15%.....	62
Tabla 14: Resultados de ensayos del suelo con cal al 21%.....	62
Tabla 15: Resumen Límite Líquido, Limite Plástico e Índice de Plasticidad.....	63
Tabla 16: Compactación Proctor y CBR.....	65
Tabla 17: Coeficiente estructural para el diseño de la estructura de la Carretera	68
Tabla 18: Diseño con un CBR 5.90.....	69
Tabla 19: Variación de la Máxima Densidad Seca y CBR para diferentes porcentajes de cal.....	72

RESUMEN

El presente trabajo de investigación está enfocado en estudiar el procedimiento de estabilización de suelos arcillosos con cal estructural y determinar el óptimo contenido del estabilizante que asegure un aumento significativo en la capacidad de soporte de la subrasante para la carretera Shucushuyacu – Lago Cuipari – Teniente César López.

La cal estructural como agente estabilizante tiene propiedades de absorción de agua y mejora la resistencia de suelos arcillosos mediante el encapsulamiento de partículas de arcilla. Es decir, al interactuar cal con partículas de arcilla se produce un efecto de floculación, creando una doble capa difusa que reduce el potencial de hinchamiento y expansión de los suelos finos y aumentando la resistencia a la penetración. Se realizaron ensayos de granulometría, límites de consistencia, gravedad específica, Proctor modificado y el ensayo de CBR para muestras del suelo en estado natural y con porcentajes de 9 %, 15% y 21% de cal. También, se realizó la clasificación de suelos mediante el método AASHTO Y SUCS para complementar los cálculos necesarios.

El porcentaje óptimo de cal hallado fue 15%, con lo que se logra incrementar el valor del CBR del suelo de 3.3% a 5.9%. Además, se realiza un análisis comparativo de costos del diseño de la estructura de pavimento. En donde, se modela el pavimento sobre una subrasante en estado natural y otra en estado mejorado con el óptimo porcentaje de cal hallado.

A partir de los resultados, se evidencia una mejora en el comportamiento mecánico del suelo por la adición de cal estructural, y además que en términos de resistencia sea la mejor opción de estabilización.

Palabras claves: estabilización; cal; arcilla; subrasante.

ABSTRACT

This research work is focused on studying the procedure for stabilizing clay soils with structural lime and determining the optimal stabilizer content that ensures a significant increase in the bearing capacity of the subgrade for the Shucushuyacu - Cuipari Lake - Teniente Cesar Lopez.

Structural lime as a stabilizing agent has water absorption properties and improves the strength of clay soils by encapsulating clay particles. In other words, when lime interacts with clay particles, a flocculation effect is produced, creating a diffuse double layer that reduces the potential for swelling and expansion of fine soils and increases resistance to penetration. Granulometry tests, consistency limits, specific gravity, modified Proctor and the CBR test were carried out for soil samples in the natural state and with percentages of 9%, 15% and 21% of lime. Also, the soil classification was carried out using the AASHTO AND SUCS method to complement the necessary calculations.

The optimum percentage of lime found was 15%, thereby increasing the CBR value of the soil from 3.3% to 5.9%. In addition, a comparative cost analysis of the pavement structure design is performed. Where, the pavement is modeled on a subgrade in a natural state and another in an improved state with the optimal percentage of lime found.

From the results, an improvement in the mechanical behavior of the soil is evidenced by the addition of structural lime, and also that in terms of resistance it is the best stabilization option.

Keywords: stabilization; lime; clay; subgrade.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

El Perú tiene por característica geológica diversa variedad de suelos, topografía agreste y variedad de climas, los suelos sedimentarios predominantes en esta área son de tipo arcilloso y al saturarse presentan cambios volumétricos que generan inestabilidad, también presentan baja capacidad de soporte y no pueden ser usados como capa sub rasante en pavimentos. Por ello, es prioridad la construcción de vías en buen estado que facilite el transporte en la región y para lograrlo se debe asegurar la estabilidad y resistencia de la sub rasante, la investigación pretende demostrar la influencia de la cal en suelos arcillosos, limosos de elevada plasticidad, mejorando las propiedades de la resistencia mecánica (CBR), la plasticidad y la expansión en los suelos.

Así, si la subrasante no es la adecuada y no asegura la estabilidad y la durabilidad que garantice el buen comportamiento de la estructura de la carretera tiene dos opciones, la primera siendo esta la más tradicional, es el de sustituir el suelo actual realizando grandes movimientos de tierra y la segunda opción es la de mejorar las características físicas de la subrasante haciendo uso de cal estructural con el fin de economizar y ser amigable con el medio ambiente.

Con el diseño y técnica de construcción apropiado, el tratamiento con cal transforma químicamente los suelos plásticos en materiales utilizables como estructura de pavimento, mejorando características y propiedades del suelo entre estas la resistencia a la compresión y capacidad portante.

La finalidad de esta investigación es mejorar las características físico – mecánicas, de los suelos de la subrasante mediante el uso de cal estructural, brindando una base estabilizada el cual formará parte de la estructura de la carretera.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

Una desventaja que tienen los pueblos aledaños a las ciudades cercanas, son el escaso medio de comunicación vial terrestre en los diferentes lugares de nuestro país, especialmente en la zona de selva y ceja de selva, que continuamente se ven involucrados en el mal estado de nuestras carreteras, esta problemática no solamente se da en este sector sino también en la zona de sierra y costa. La población de estos sectores se las ingenia para habilitar kilómetros de carreteras con el fin de tener un camino o vía de transporte que garantice la mejora de sus economías.

Por lo general, los proyectos de carreteras de conectividad a los pueblos, donde permitan platear desarrollo para su mejoramiento, ya que en la zona de selva los suelos son conocidos por ser arcillosos con alta plasticidad y capacidad de soporte bajo, la cual es uno de los grandes problemas para la construcción de caminos vecinales, se ven obligado a ejecutar estudios para realizar estos trabajos con materiales provenientes de las únicas canteras calificadas que existen dentro del tramo a estudiar.

Las siguientes investigaciones son artículos científicos, indexados y con alto factor de impacto, que muestran estudios sobre estabilización de suelos arcillosos con el fin de mejorar la capacidad de soporte de la misma. A continuación, se muestra la metodología y los resultados que se obtuvieron al realizar las investigaciones.

2.1.1 ANTECEDENTES INTERNACIONALES

- **(HUEZO MALDONADO & ORELLANA MARINEZ, 2009).** “La estabilización de suelos arcillosos y limosos con cal en la construcción tiene más de 5,000 años de antigüedad. Las Pirámides de Shersi en el Tíbet fueron construidas con mezclas compactadas de arcilla y cal, en la China y la India a lo largo de la historia, se ha utilizado de varias maneras la estabilización con cal sin

embargo, fue en los EE.UU, que a finales de los años 40 cuando se aplicaron a las mezclas de cal y suelo para ser utilizadas para la estabilización química de los suelos, para lo cual se utilizaron técnicas y ensayos de laboratorio de mecánica de suelos para determinar el porcentaje de cal óptimo para incrementar la resistencia del suelo, el tratamiento de arcillas con cal comenzó en los años 50 aumentando su popularidad con gran rapidez. Se han construido miles de kilómetros de carreteras, así como aeropuertos principales como el de Dallas Fort Worth en EE.UU, sobre arcillas estabilizadas.”

- **(IECA, ANCADE y ANTER, 2008)**, Aunque hace ya más de 50 años que en España empezaron a estabilizarse en algunos caminos agrícolas los suelos de los mismos, su aplicación masiva en carreteras y aeropuertos de España sólo data de mediados de la década final del siglo XX, gracias al empleo de las modernas estabilizadoras. Estos potentes equipos que son muy eficaces en la mezcla in situ del suelo con cal, consiguieron tener, con un rendimiento muy elevado, capas de gran espesor con un material uniforme. Muchos suelos naturales son de calidad mediocre, por lo que su aprovechamiento solo es posible mediante su mejora o estabilización con cal para conseguir una elevada capacidad de soporte.
- **(VÁSQUEZ, 2008)**, En el estudio titulado: **Estabilización de suelos cohesivos con cal, tuvo como objetivo dar a conocer la Cal como estabilizador de suelos en obras viales, analizando la influencia de este producto en un suelo de alta plasticidad.** El trabajo comienza con una investigación minuciosa de la estabilización de suelos con Cal. Así también se señalan los materiales y métodos utilizados para evaluar este producto por intermedio de ensayos de laboratorio, estudiando los efectos sobre las propiedades físicas y mecánicas del suelo. Este análisis, se realizó de acuerdo a un supuesto de diseño, en donde, se calcularon las características de la base estructural para un pavimento flexible de acuerdo a los datos obtenidos en laboratorio. Como conclusión general se puede validar el producto como una alternativa concreta para la estabilización de suelos, ya

que, debido a la capacidad de mejorar las características básicas del suelo, aportando capacidad de soporte al mismo.

- **(Angulo, 2004)**, En el estudio titulado, estabilización de subrasantes con cal, esta tesis tuvo como objetivo mostrar las mejoras del comportamiento de un suelo de mala calidad, al incorporarle varios porcentajes de cal, en función de su peso seco, teniendo en cuenta que el suelo funcionará como subrasante dentro de la estructura del pavimento. Esta tesis se realizó en tres etapas, la primera fue la recolección de información, la segunda la fase de laboratorio, llevándose a cabo ensayos de Proctor (densidad – humedad), CBR (valor soporte), limite líquido, limite plástico, granulometría y absorción por capilaridad; y por último el análisis de los resultados. Se llegó a la conclusión que los porcentajes de cal disminuyeron la plasticidad, aumentaron su valor soporte y crearon una capa protectora contra el agua que sube por capilaridad, es decir, pasa de ser un suelo baja a uno de buena calidad como subrasante.

2.1.2 ANTECEDENTES NACIONALES

- **(MTC, PROYECTO, 2001)**, “**MEJORAMIENTO VIAL DE LA CARRETERA HUÁNUCO –TINGO MARÍA – PUCALLPA SECTOR: AGUAYTÍA – PUCALLPA**” el mismo se ejecutó en el año 2001, ubicada en los departamentos de Huánuco y Ucayali, teniendo esta como principal fin la conectividad entre los departamentos Huánuco y Ucayali. Los porcentajes de cal utilizados en la estabilización del suelo que compone la subrasante de la carretera, estuvieron dentro del rango 3.5% a 6%, esto debido a la variación de plasticidad que presentaba el suelo del lugar.
- **(MTC, PROYECTO, 2011)**, “**REHABILITACIÓN Y MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA CHONGOYAPE COCHABAMBA – CAJAMARCA TRAMO LLAMA – COCHABAMBA**”, en este proyecto se ha hecho el uso de la estabilización suelo-cal, por motivos que se ha verificado un pronto agotamiento de suelo aluvial que viene siendo utilizado en capa de subrasante para corregir la plasticidad de materiales excedentes de corte. Frente a esta problemática mediante Resolución Ministerial 878-2011.-MTC/02 se aprueba

el adicional de obra en la que consiste como alternativa de solución el empleo de la tecnología suelo-cal, con la finalidad de mejorar la plasticidad de los materiales que conforman la subrasante. El porcentaje de cal utilizado estuvieron dentro del rango de 4% a 5%.

- **Atarama (2015).** En su tesis titulada como “**Evaluación de la Transitabilidad para Caminos de Bajo Tránsito Estabilizados con Aditivo Proes**” tuvo como objetivo demostrar que el uso del aditivo PROES incrementa las propiedades mecánicas del suelo. Concluye que, evaluó un tramo de carretera y determinó los espesores de afirmado para diferentes sectores, luego, realizó los ensayos de Proctor Modificado y CBR en algunos puntos de la carretera. Finalmente, determinó que el valor de soporte relativo incrementa en un 300% respecto al material sin aditivo, superando las demás muestras ensayadas al 100% de CBR y la resistencia. De esta manera, queda demostrado que el aditivo PROES garantiza un adecuado nivel de serviciabilidad, es decir, mejora las propiedades físicas y mecánicas de una base de carretera.
- **Leite, R., Cardoso, R., Cardoso, C., Cavalcante, E., & de Freitas, O. (2016).** Realizaron un análisis de estabilización de suelos arcillosos con el objetivo de reducir su potencial de hinchamientos. Para esta finalidad se utilizó cal como estabilizante en cantidades de 3%, 6% y 9%. Para el análisis se realizaron ensayos de laboratorio como el CBR y Proctor modificado con el suelo natural y luego de la adición del estabilizante químico. Los resultados confirmaron la eficacia de la estabilización de la cal. Se observó que, a medida que aumentaba el contenido de cal, había una reducción de la fracción de arcilla y un incremento de la fracción de material granular, aumentando así la resistencia al corte del suelo. La curva de compactación fue desplazada y la presión de hinchamiento libre se redujo significativamente.
- **Decky, M., Remišová, E., Hájek, M., & Pitoňák, M. (2016).** Presentan el proceso de evaluación de suelos arcillosos mediante el ensayo de California Bearing Ratio (CBR) en laboratorio y en campo. Mediante el CBR realizó la evaluación de la capacidad de soporte de las estructuras de tierra, ya que la prueba California Bearing Ratio es una de las pruebas de laboratorio más

utilizadas en la calidad de las estructuras terrestres. Para realizar los ensayos de CBR se preparó el suelo usando Proctor Modificado. Los resultados obtenidos del ensayo Proctor permite correlacionar el nivel de humedad para cumplir con los requisitos recomendados para una subrasante de vías terrestres. El resultado de mediciones de campo del CBR sirve para garantizar condiciones objetivas de las estructuras de tierra.

- **Ekeocha, N. E., & Egesi, N. (2014).** Realizaron la evaluación de suelos arcillosos mediante el ensayo del California Bearing Ratio (CBR). Las muestras de suelo recogidas fueron llevadas al laboratorio para la prueba de (CBR) sumergida por 24 horas, compactación Proctor estándar al 100% de MDS, contenido de humedad próximo al OCH, debidamente clasificado según AASHTO 1993. Los resultados del estudio han establecido que las muestras son de mala calidad y, como tal, es necesaria la estabilización de suelos que se considera para su uso como subrasante mejorada. En vista de ello los autores, recomendaron opciones de mejora como la son sobre excavación y estabilización. Se podría excavar hasta 0.7m y hacer la sustitución con material de mejor calidad, podría ser adición química, mezcla suelo cal o suelo con asfalto.
- **Farooq K. et al. (2015).** Tienen como principal motivación a investigaciones anteriores en las que se predijeron las características de compactación de suelos de grano grueso y grano fino usando parámetros y propiedades de índice de suelos sin realizar ensayos de compactación en laboratorio, por lo que es necesario elaborar un modelo para el caso de suelos de grano fino a fin de predecir las características de compactación mediante el uso de límites de consistencia. Sin embargo, los autores afirman que es necesario realizar ensayos de laboratorio ya que la compactación de suelos es un procedimiento importante el que permite que las partículas de suelo se acoplen entre sí transmitiendo esfuerzo de compactación, dando como resultado el aumento significativo a la resistencia al corte, disminución de la compresibilidad y permeabilidad de la masa del suelo.

2.1.3 ANTECEDENTES LOCALES

No se encontraron a la fecha de la presente investigación, mejoramientos de la sub rasante empleando cal estructural u otro aditivo, por lo que esta investigación sería el inicio de un trabajo de mejorar los suelos y emplear dicho estudio para evitar daños en la plataforma de la carretera, perjudicando a la población que por intermedio de las carreteras sacan sus productos agrícolas.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 MEJORAMIENTO DE SUB RASANTES

Las subrasantes de poca resistencia son un problema común en la construcción de pavimentos. La existencia de una falla en la subrasante sobre la que esta cimentada el pavimento llevara a un deterioro rápido de la estructura del mismo.

Tradicionalmente, las subrasantes de poca resistencia u oscilantes deben retiradas y remplazada por rellenos de sustitución o estabilizadas químicamente. Ambas opciones son caras y consumen mucho tiempo.

La subrasante es la capa superficial, de terreno natural. Para construcción de caminos se analizará hasta 0.45 m de espesor. Su capacidad de soporte en condiciones de servicio, junto con el tránsito y las características de los materiales de construcción de la superficie de rodadura, constituyen las variables básicas para el diseño del pavimento. Se identificarán cinco categorías de subrasante:

S0: Subrasante muy pobre CBR < 3%

S1: Subrasante pobre CBR = 3% - 5%

S2: Subrasante regular CBR = 6 - 10%

S3: Subrasante buena CBR = 11 - 19%

S4: Subrasante muy buena CBR > 20%

Se considerarán como materiales aptos para la coronación de la subrasante suelos con CBR igual o mayor de 6%. En caso de ser menor se procederá a eliminar esa capa de material inadecuado y se colocará un material granular con CBR mayor a 6%; para su estabilización.

2.2.2 SUELOS

El suelo se define como una mezcla de varios minerales meteorizados y de materia orgánica en descomposición, se encuentra en una capa delgada que cubre la tierra y contiene grandes cantidades de agua y aire que sirven de sustento y soportes a las plantas y demás organismos. Desde la perspectiva de la ingeniería civil, el suelo se define como un material no consolidado compuesto por partículas líquidas, sólidas y vacíos que ocupan espacio entre ellas.

2.2.3 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Concepto por el cual se aplican una serie de métodos físicos y químicos para permitir el mejoramiento de una muestra de suelo y así lograr el uso adecuado de este. En el contexto de vías, la estabilización incluye aquellos métodos que permitan mejorar suelos para proporcionar o generar capas que sirvan a una estructura de pavimento, como pueden ser bases, capas de rodadura, sub bases y sub rasantes, llevándolas a condiciones óptimas de humedad y densidad que provean mejores propiedades en cuanto a durabilidad, economía y resistencia.

La estabilización de suelos se define como el mejoramiento de las propiedades físicas del suelo a través de procedimientos mecánicos e incorporación de productos químicos, naturales o sintéticos. Tales estabilizadores, por lo general se realizan en los suelos de subrasante inadecuado o pobre, en ese caso son conocidas como estabilización suelo cemento, suelo cal, suelo asfalto y otros productos diversos. En cambio, cuando se estabiliza una subbase granular o base granular, para obtener un material de mejor calidad se denomina como sub base o base granular estabilizada.

Con frecuencia los suelos, no son los más adecuados para ser utilizada en una obra determinada y cuyas características obligan a tomar decisiones las cuales mencionaremos a continuación:

- Aceptar el material tal como se encuentra, pero teniendo en cuenta en el diseño las restricciones impuestas por su calidad.
- Eliminar el material insatisfactorio o abstenerse de usarlo, sustituyendo por otro de características adecuadas.
- Modificar las propiedades del material existente para hacerlo capaz de cumplir en mejor forma los requisitos deseados o, cuando menos, que la calidad obtenida sea adecuada.

2.2.3.1 TIPOS DE ETABILIZACIÓN DE SUELOS

a) ESTABILIZACIÓN POR MEDIOS MECANICOS

Consisten en realizar el proceso de estabilización por compactación, se debe emplear este método en todas aquellas obras donde la materia prima es el suelo. También es frecuente las mezclas de suelos para mejorar las propiedades físicas del suelo.

Con este tipo de estabilización se pretende mejorar el material del suelo existente, sin cambiar la estructura y composición básica del mismo como herramienta para lograr este tipo de estabilización se utiliza la compactación, con la cual se reduce el volumen de vacíos presentes en el suelo.

b) ESTABILIZACIÓN POR COMBINACIÓN DE SUELO

La estabilización por combinación de suelo, considera la mezcla de dos o más materiales con la finalidad de obtener un material adecuado, cabe indicar que la combinación de suelos debe tener mayor incidencia los materiales de préstamo.

La estabilización por combinación de suelos consiste en remover el suelo existente en 15 cm para mezclarlo con otro suelo de préstamo

de mejor calidad, para ello se tiene que retirar las partículas menores a 75 mm y se pasará por un proceso de aireación y humedecimiento de tal forma que se cumplan los requerimientos de compactación.

Ilustración 1: Estabilización de suelos por combinación de material



Fuente: Brackel constructions products, 2015

c) ESTABILIZACIÓN POR SUSTITUCIÓN DE SUELOS

Implica la preparación del suelo con material totalmente de reemplazo; para ello, se debe remover el suelo natural según el nivel de excavación indicado, luego se coloca y compacta el suelo en capas hasta que se alcancen las cotas exigidas para la sub rasante.

Ilustración 2: Estabilización por sustitución de suelos



Fuente: Construir Nicaragua, 2016

d) ESTABILIZACIÓN POR MEDIOS QUÍMICOS

Este tipo de estabilización es generalmente lograda por la adición de agentes estabilizantes específicos tales, como el cemento, la cal el asfalto u otros agentes químicos.

Teniendo en cuenta la gran variedad de los suelos y la composición de los mismos, es de esperarse que cada método resulte solo aplicable a un número limitado de suelos.

e) ESTABILIDAD VOLUMÉTRICA

Este tipo de estabilización consiste en la expansión y contracción de muchos suelos, originadas por lo cambios de humedad, se pueden presentar en forma rápida o acompañado de variaciones estacionales o con la actividad. Por tanto, si las expansiones que se desarrollan debido a un incremento de humedad no se controlan de alguna forma, estas presiones pueden ocasionar graves deformaciones y rupturas en el pavimento.

2.2.3.2 FUNDAMENTOS DE ESTABILIZACIÓN SUELOS

El óptimo desarrollo en un funcionamiento de cualquier tipo de obra civil a un tiempo de largo plazo depende en las propiedades intrínsecas del suelo en desarrollo. Los suelos con algún tipo de inconsistencia aumentan una probabilidad de un riesgo significativo en la estructura tanto vertical como horizontal. El adecuado diseño, tratamiento y técnicas pertinentes en la construcción, mejorara desde su estructura química y física el suelo, para ser un material utilizable y aprovechable. Adicionalmente, la base estructural soportada de los suelos puede ser aprovechada en los pavimientos.

2.2.3.3 PROPIEDADES DE LOS SUELOS ESTABILIZADOS

Los suelos que se desean estabilizar deben tener ciertas propiedades físicas previamente establecidas para lograr un buen resultado a la hora de obtener una mejora en sus propiedades, estas son:

- **Resistencia:** Es una propiedad que se hace necesaria aumentar para lograr mayor cohesión entre las partículas del suelo, con la adición de cementantes o la compactación de tipo mecánica, vibratoria, por carga o estabilización química (cal), para evitar asentamientos. En el caso de suelos cohesivos (arcillas), se aumenta la resistencia evitando la entrada de humedad en las partículas con la adición de cementantes que, modifiquen la película de agua entre granos o partículas.
- **Compresibilidad:** Se debe tener especial cuidado con esta propiedad pues si no es controlada genera otros daños en el suelo que hacen que no sea apto para el uso; esto quiere decir que las fuerzas entre partículas son débiles lo que provoca desplazamientos o expansiones, esta propiedad se mejora cementando los granos con material rígido para rellenar poros.
- **Permeabilidad:** La permeabilidad se define como la propiedad que tienen los suelos de permitir el paso de un fluido a través de ellos, sin alterar las propiedades existentes. Teniendo en cuenta esto, es importante que el agua circundante tenga un buen medio filtrante para evitar problemas de bombeo y en general dañar el comportamiento del suelo, para esto, se puede adicionar un material impermeable o crear estructuras conglomeradas.
- **Retracción y expansión:** Estas dos propiedades se deben tener en cuenta ya que se producen por los cambios de humedad en el suelo, por lo que es importante adicionar un mineral arcilloso que pueda mantener la humedad, así como también cementantes que restrinjan la humedad.

- **Durabilidad:** Propiedad de los suelos que se refiere a la resistencia que tenga a procesos de erosión o absorción de cargas por tráfico. En vías, para evitar problemas de durabilidad, se deben construir las diferentes capas con sus respectivos espesores para evitar que se afecten tanto los materiales naturales como los estabilizados.

2.2.4 DEFINICIÓN DE LA CAL

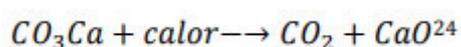
En un producto resultante de la descomposición de las rocas calizas (CaCO_3) por la acción del calor. Estas rocas calentadas a más de $900\text{ }^\circ\text{C}$ se obtiene el óxido de calcio (CaO), conocido con el nombre de cal, producto sólido de color blanco y peso específico de 3300 Kg/m^3 .

La cal reacciona violentamente en contacto con el agua, con desprendimiento de calor que alcanza los $90\text{ }^\circ\text{C}$, realizándose la hidratación obteniéndose una pasta blanca llamada cal hidratada o cal apagada. Se forma entonces hidróxido de calcio o $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

La cal es un término que designa todas las formas físicas en las que puede aparecer el óxido de calcio (CaO). Se obtiene como resultado de la calcinación de las rocas calizas.

Dice Cabo, “la cal es uno de los productos más conocidos desde la antigüedad y con más aplicaciones diversas, en la construcción se especifica en dos ramificaciones, en la infraestructura (donde se usa en la estabilización de suelos, para secar suelos húmedos, descongelar los helados y mejorar las propiedades de los suelos arcillosos) y en la edificación (en la fabricación de prefabricados de cal, hormigón celular, ladrillos y bloques)”.

La cal, de diversos usos en construcción y vías, es un producto sólido de color blanco y amorfo, resultado de la descomposición mediante calor (900°C) de roca caliza que se refleja en la siguiente reacción:



La cal es uno de los productos con la capacidad de proveer una gran variedad de beneficios, los cuales se mencionan a continuación:

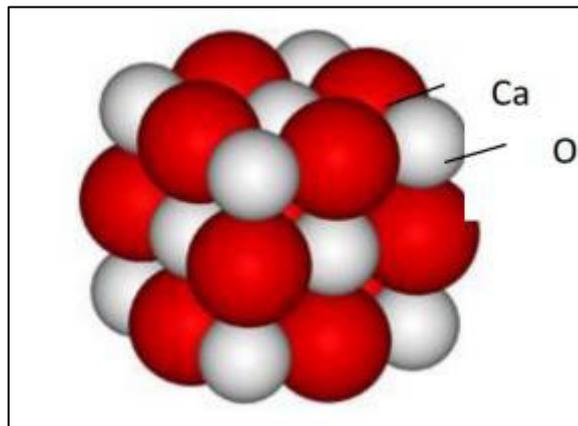
- Secar
- Modificar
- Estabilizar

Tabla 1: Características físicas de la cal

<i>Fórmula</i>	<i>CaO</i>
<i>Color</i>	<i>Blanco</i>
<i>Densidad</i>	<i>3300 Kg/cm³</i>
<i>Estado de agregación</i>	<i>Sólido</i>
<i>Masa molar</i>	<i>56.10 g/mol</i>
<i>Punto de fusión</i>	<i>2927°C</i>
<i>Solubilidad en agua</i>	<i>Reacciona</i>

Fuente: ICG – Gerencia, 2010

Ilustración 3: Moléculas de la cal



Fuente: ICG – Gerencia, 2010

Ilustración 4: Cal



2.2.5 ESTABILIZACIÓN DEL SUELO CON CAL

La estabilización del suelo cambia considerablemente las características del mismo, produciendo resistencia y estabilidad a largo plazo, en forma permanente, en particular en lo que concierne a la acción del agua. La cal, sola o en combinación con otros materiales, puede ser utilizada para tratar una gama de tipos de suelos. Las propiedades mineralógicas de los suelos determinarán su grado de reactividad con la cal y la resistencia final que las capas estabilizadas desarrollarán.

Por diferencia con la mejora, la estabilización de suelos con cal es el proceso que persigue la alteración del comportamiento mecánico de un material para conseguir una resistencia estructural que podría decirse es impropia de dicho tipo de material.

Dado que en la mejora de suelos también produce alguna ganancia en consistencia, en ocasiones se establece la frontera entre estos procesos en función de un límite de incremento. Así algunos autores establecen la diferencia en una ganancia mínima de resistencia a la compresión simple sobre el valor inicial del suelo de 3,5 kg/cm².

La estabilización de suelos con cal persigue los que se derivan de la reacción puzolánica entre la cal y los suelos arcillosos, que se producen siempre a largo plazo. En este proceso es crítico el comportamiento y mantenimiento de las condiciones de curado del material para asegurar la producción de la reacción en su totalidad.

Los tratamientos de estabilización de suelos suelen requerir porcentajes altos de cal, dado que las primeras dosis de la misma se emplean en los mecanismos de mejora y que es indispensable la disposición de cal libre en cantidad suficiente para mantener las reacciones puzolánicas perseguidas. Se suelen proyectar así tratamientos de estabilización con valores siempre superiores al 3 por ciento de cal, llegando incluso a valores del 8 y 10 %.

Para este proceso se emplean dos tipos de cal: Óxido cálcico (Cal Anhidra o cal viva) y el hidróxido cálcico (Cal hidratada o cal apagada), la cal que se utilice deberá cumplir con las especificaciones dadas en el Manual de Carreteras “Especificaciones Técnicas para la Construcción”.

La mezcla del suelo con cal produce una reacción química llamado el proceso de floculación en donde las partículas de cal se desplazan sobre la superficie del suelo arcilloso y se realiza un intercambio iónico, haciendo que el suelo aumente su resistencia a la penetración y mitigue su expansión ante la presencia de agua. Asimismo, una de las características más importantes de la cal en el suelo, es el cambio en la plasticidad, aumentando o disminuyendo su límite líquido y límite plástico; también produce un aumento en la humedad óptima de compactación.

Ilustración 5: Estabilización de suelos con Cal



Fuente: National Lime Association, 2006

2.2.6 ESTABILIZACIÓN POR COMPACTACIÓN

La estabilización por compactación parte de un principio básico de mecánica de suelos, que es el de aumentar la densificación del suelo con un contenido de humedad determinado para obtener una disminución en el porcentaje de vacíos, reducción de agua por infiltración y aumento de fricción interna; como consecuencia de todos estos cambios, se logra el aumento en las propiedades de resistencia. Este tipo de estabilización

está en función de la energía de compactación. En la actualidad se emplea en los laboratorios geotécnicos la energía propia del ensayo Proctor Modificado con el fin de remodelar las muestras, considerando las condiciones de campo a las que estará sometida.

Ilustración 6: Compactación de suelos



Fuente: Yepes, 2014

2.2.7 REACCIÓN QUÍMICA ENTRE SUELO Y LA CAL

La acción de la cal en el suelo a corto plazo se caracteriza por los intercambios catiónicos. Tal como explica Leite, R. et al (2011) que “la adición de cal a los suelos arcillosos proporciona una abundancia de iones de calcio y magnesio, que tienden a desplazar otros cationes monovalentes comunes, como sodio y potasio presentes en las placas minerales de arcilla” (p. 3). Esto conduce a una reducción del espesor de la doble capa difusa de agua que rodea partículas de suelo.

Después de intercambios catiónicos, “Se produce un cambio aparente de la textura del suelo, por cuanto a las partículas de arcilla se aglomeran formando otras de mayor tamaño. Como resultado de ello se produce mejoras de plasticidad, debido a la capa de agua absorbida”.

Esto es, debido a que la cal tiene la capacidad mejorar las propiedades físicas y químicas de las arcillas, acercándolas a propiedades similares de suelos granulares. Esto se da mediante el encapsulamiento de partículas de arcilla, de esta manera, también se evita la expansión del material, a este proceso se le llama floculación.

Si el suelo se compacta, también se produce una reacción a largo plazo entre la cal y los minerales sílico aluminosos del suelo fino, formándose complejos compuestos de silicatos aluminatos de calcio hidratados que son agentes cementantes que incrementan la resistencia de la mezcla y su durabilidad.

Ilustración 7: Reacción puzolánica entre la cal y un suelo. Adaptado de “Materiales para base y subbase”



Fuente: Sánchez 2016

2.2.8 LA MODIFICACIÓN DE LOS SUELOS ARCILLOSOS CON CAL

La adición de cal a un suelo con una fracción de partículas finas relevante modifica su comportamiento por una conjunción de sus propiedades. En este apartado se describen los mecanismos que intervienen en este proceso, que se resume fundamentalmente en dos manifestaciones típicas:

- Una modificación de la textura del suelo.
- Un incremento de su resistencia

Estos hechos se producen en mayor o menor medida según el tipo de suelos, su granulometría y mineralogía, y el de la cal empleada, en función de su riqueza y actividad. Su justificación está en la alteración del estado

natural de ambos materiales por las reacciones químicas que se producen en la interacción de sus estructuras.

Si bien es cierto que no existe unanimidad entre los técnicos sobre la totalidad de los mecanismos que intervienen en la reacción entre la cal y las partículas arcillosas de un suelo, sí es posible describir, y así se hace a continuación, los esquemas más generalmente aceptados y que justifican el comportamiento final obtenido.

2.2.9 MECANISMOS DE INTERACCIÓN DE LA CAL SOBRE UN SUELO

En la mezcla de la cal con un suelo arcilloso se producen dos tipos de reacción que se pueden agrupar según sus manifestaciones en:

- a) Una modificación “inmediata” de las condiciones de granulometría, textura y compacidad originada por:
 - Intercambio de iones entre la arcilla y la cal
 - Floculación de las partículas de arcilla
 - Reducción de la cantidad de agua adsorbida por la arcilla
- b) Una mejora de las características resistentes del suelo a medio y largo plazo, producida por:
 - Reacción puzolánica de cementación.
 - Carbonatación

2.2.10 REACCIÓN PUZOLÁNICA

Como se ha descrito, las arcillas son minerales que contienen en su estructura importantes cantidades de sílice y alúmina y otros elementos de sustitución como el hierro, magnesio, etc. En estas circunstancias es posible decir que las arcillas son productos naturales con propiedades puzolánicas. Estas propiedades se basan en que bajo condiciones de pH

altos pueden provocar un efecto consistente en la reacción de la cal con la sílice y alúmina para producir productos cementantes.

En el caso de la mezcla de arcilla y cal, la sílice y alúmina procedentes de las partículas de arcilla al entrar en contacto con la cal, que proporciona el medio básico, lleva a formar silicatos y aluminatos de calcio hidratados. Estos productos son parecidos a los que se generan durante el fraguado del cemento portland.

Pero existe otro factor condicionante para la producción de las reacciones químicas descritas: La fuente de sílice y alúmina. En función de la mineralogía de las arcillas su disponibilidad será mayor o menor, así como también su capacidad de disolución. Por tanto, no todas las arcillas son susceptibles de manifestar estas reacciones en la misma proporción y, como consecuencia, el efecto de ella dependerá del tipo de material presente.

Otro aspecto a considerar de esta reacción es la intervención del factor tiempo, a diferencia de los mecanismos inmediatos que se han descrito en los apartados anteriores. La producción de la reacción puzolánica es un proceso lento y que avanza con los días, siendo necesarias varias semanas para que se alcance un efecto sustancial o casi completo. Con ello se introduce además un nuevo factor condicionante no contemplado a la fecha y que se estudiará más adelante: Las condiciones de humedad y temperatura en que se desarrolla la reacción a lo largo de los primeros días. Es lo que se conoce como las condiciones de curado.

La manifestación o consecuencia de la reacción puzolánica en una arcilla es la aparición de unos productos cementantes que se establecen entre las partículas de las arcillas que implican unos enlaces físicos mucho más fuertes que los eléctricos descritos hasta ahora. Por ello, el efecto se manifiesta no ya sólo en mejoras de valores tales como el ángulo de rozamiento interno o la resistencia a la penetración, sino incluso en

cambios drásticos en la resistencia a compresión de los materiales, que pasan de ser suelos o materiales sueltos a conglomerados.

2.2.11 CARBONATACIÓN DE LA CAL

Un fenómeno que, si bien no está asociado a la interacción del suelo con la cal es preciso mencionar como un efecto final de la mezcla es la carbonatación de la cal sobrante en el tratamiento.

Tan sólo cabe en este punto mencionar que, como se describió al tratar las propiedades de la cal, el proceso de su formación es una reacción reversible. Por ello, la exposición de los hidróxidos de calcio al dióxido de carbono puede dar lugar a la reconstrucción de los carbonatos de los que se originó la cal. Evidentemente, esta posibilidad de reacción de los hidróxidos resta actividad a la cal ya que detrae de la misma parte del principio activo que debe reaccionar con las arcillas.

2.2.12 EFECTOS DE LA APLICACIÓN DE LA CAL

Como consecuencia de la combinación de los mecanismos descritos en el apartado anterior, la aplicación de cal a un suelo arcilloso origina una modificación en las propiedades físicas características de su comportamiento inicial.

Si bien ya se ha mencionado que en función de la mineralogía del suelo y de la proporción y forma de aplicación de cal se producen unos u otros procesos en mayor o menor medida, es posible resumir y englobar los efectos más genéricos de la mejora en los que siguen:

- Reducción de la humedad natural del suelo.
- Modificación de la granulometría.
- Aumento de la permeabilidad.
- Mayor trabajabilidad.
- Reducción del índice de plasticidad.

- Reducción del potencial de cambios volumétricos.
- Modificación de las características de compactación.
- Aumento inmediato de la consistencia.
- Mayor resistencia a medio y largo plazo

2.2.13 REDUCCIÓN DE LA HUMEDAD NATURAL DEL SUELO

Es evidente que este efecto sólo se produce cuando la cal se aplica en forma de cal viva en polvo. El proceso, ya descrito en las propiedades de la cal se basa en que, para la hidratación de los óxidos de calcio existentes en la adición y su conversión en hidróxidos cálcicos, se toma el agua precisa de la presente en la masa del suelo. Además, y dado que la reacción que se produce es exotérmica, el propio calor producido en la hidratación facilita la evaporación del exceso de humedad. Es, al fin y al cabo, la producción del apagado de la cal en el suelo húmedo que se quiere secar.

2.2.14 TIPOS DE MODIFICACIÓN DE SUELOS MEDIANTE CAL

A esta altura del documento, conocidos ya los efectos que la adición de cal origina sobre un suelo arcilloso y los mecanismos que provocan dichos efectos, es importante diferenciar dos grandes grupos de posibles tratamientos en función de dichos efectos.

2.2.14.1 LA MEJORA DE SUELOS

Se entiende como mejora de suelos con cal al proceso que persigue la obtención de un material con un rango de clasificación mayor dentro de una escala dada mediante la aplicación de dicha cal.

La mejora de suelos con cal persigue sólo el aprovechamiento de las modificaciones y efectos que la cal produce sobre el suelo de manera inmediata o, en todo caso, a corto plazo. Este aprovechamiento puede sin embargo requerir una durabilidad en los efectos o, sencillamente, ser preciso durante una parte de la vida de la obra.

Ejemplos de aplicación de los procedimientos de mejora de suelos con cal se pueden reconocer en las siguientes ocasiones:

- Secado de suelos húmedos en fondos de excavación.
- Reducción de polvo en pistas sin pavimentar.
- Empleo de materiales plásticos en núcleos de terraplenes.
- Aumento del C.B.R. de un suelo para su uso en capas de coronación.
- Reducción del potencial expansivo de capas de asiento.
- Refuerzo temporal de pis tas de obra para permitir el tránsito de vehículos.

En el diseño y control de la mejora de suelos con cal es suficiente la realización de ensayos básicos de los usuales en el ámbito de la construcción. Los efectos y utilidad del tratamiento se cuantifican mediante el control de características indirectas con puede ser la realización de los límites de Atterberg, la determinación del C.B.R. o el ensayo de compactación proctor.

2.2.14.2 FACTORES CONDICIONANTES EN EL TRATAMIENTO CON CAL

En la aplicación de cal a un suelo con el objeto de conseguir una mejora o una estabilización del mismo existen una serie de factores de los que depende el éxito del tratamiento. La mayoría de ellos se deducen de los propios mecanismos de la interacción de la cal con las arcillas, pero hay otros factores que se pueden denominar externos cuya relevancia es preciso también considerar.

2.2.15 ENSAYOS DE LABORATORIO

2.2.15.1 ENSAYO DE GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO

Es una clasificación granulométrica, el cual realiza la medición y gradación que se lleva acabo de los granos de los suelos. El objetivo de este análisis

es la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de suelo. Entre las normas existentes para la correcta ejecución del ensayo se encuentran la Norma ASTM D-422 y la Norma Técnica Peruana NTP 339. 128. Estas, describen el método para determinar los porcentajes de suelos que pasan por los distintos tamices de la serie empleada en el ensayo, hasta el de 75 μ m (N°200).

Si el material contiene gran porcentaje de arcillas y limos es recomendable realizar el lavado con el uso de la malla N°200, posteriormente secar al horno y clasificar el material retenido.

El análisis por tamizado o granulometría es recomendable para suelos granulares, en el caso de suelos con alto contenido de finos se recomienda realizar en ensayo del hidrómetro.

2.2.15.2 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR MEDIO DEL HIDRÓMETRO

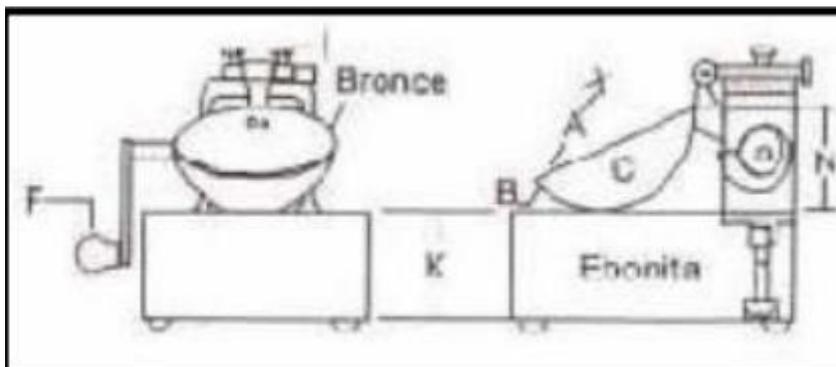
Este ensayo se basa en el principio de la Ley de Stokes, que hace referencia a la fuerza de fricción que experimentan los objetos esféricos (partículas de suelo dispersados de distintas formas y tamaños) que se mueven dentro de un fluido viscoso de régimen laminar; se usará como instrumento de medición un Hidrómetro para determinar la cantidad de partículas dispersadas (pasantes del tamiz N°200) que permanecerán en suspensión durante un tiempo determinado.

2.2.15.3 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DEL SUELO

El límite líquido de un suelo es el porcentaje de humedad que sucede cuando éste pasa de un estado plástico a un estado líquido, estos parámetros son usados en varios sistemas de clasificación de suelos y para establecer correlaciones con las propiedades del suelo.

Como instrumento de medición se usa la Copa de Casagrande, en el que se mide el contenido de humedad de un surco separador de 13mm al dejar caer la copa 25 veces desde una altura de caída de 1cm, con una velocidad de 2 caídas por segundo.

Ilustración 8: Aparato Casa Grande para ensayo de LL. Manual de Ensayo de Materiales



Fuente: ICG – EM2000

2.2.15.4 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO DEL SUELO

El límite plástico se determina cuando un suelo pasa de un estado semisólido a un estado plástico, este se determina con un porcentaje de humedad que corresponde al obtenido cuando unas barras de suelo al ser amasadas con la mano sin fisurarse alcanzan un diámetro de 3.2mm.

2.2.15.5 PRÓCTOR MODIFICADO

Este es un ensayo de compactación de suelos que se utiliza en suelos con un 30% o menos en peso de partículas retenidas en el tamiz $\frac{3}{4}$ ". La finalidad del ensayo es determinar el contenido óptimo de humedad y la máxima densidad seca del suelo que será sometido a una energía de compactación de 2 700 kN-m/m³ (56 000 pie-lbf/pie³), en un molde de 4" o 6" con un pistón de 10lbf, con una altura de caída de 18 pulg.

2.2.15.6 ENSAYO DE CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)

Este ensayo se usa para determinar la capacidad de soporte de bases, subbases y subrasantes de suelos mediante un índice de resistencia denominado valor de la relación de soporte, previamente a la realización del ensayo se debe de conocer la humedad óptima y la máxima densidad seca del suelo. En términos generales, la condición de humedad más desfavorable se presenta cuando el suelo está saturado; por ello se debe sumergir las muestras en agua durante 4 días, confinados en un molde con una sobrecarga que simula el peso del pavimento.

“Este método fue propuesto en 1929 por los ingenieros T.E. Stanton y O. J. Porter del departamento de carreteras de California. Desde esa fecha tanto en Europa como en América, el método CBR se ha generalizado y es una forma de clasificación de un suelo para ser utilizado como subrasante o material de base en la construcción de carretera.”

“El CBR de un suelo es la carga unitaria correspondiente a 0.1” ó 0.2” de penetración, expresada en por ciento en su respectivo valor estándar. El ensayo permite obtener un número de la relación de soporte, que no es constante para un suelo dado, sino que se aplica solo al estado en el cual se encontraba el suelo durante el ensayo.”

Por lo tanto, el valor CBR se obtiene del esfuerzo de penetración de un pistón de 44.5 KN para penetrar 0.1” y 0.2” en la muestra con respecto al esfuerzo que se tiene para penetrar la misma profundidad en una muestra de piedra chancada de california; por especificaciones de la norma peruana este valor debe ser como mínimo de 6% para que se considere un suelo óptimo para uso en proyectos viales.

2.2.15.7 CATEGORÍAS DE SUBRASANTE SEGÚN SU VALOR CBR

El suelo destinado como capa subrasante de la estructura de pavimento se clasifica de acuerdo a su capacidad de soporte, las cuales son hallados mediante el ensayo del CBR. Según el manual de carreteras, sección suelos y pavimento, el CBR del suelo donde se construirá el pavimento debe ser mayor o igual a 6% para ser considerado apto como capa subrasante.

Tabla 2: Clasificación de subrasante según su valor CBR

CBR	CATEGORIA DE SUBRASANTE
CBR <3%	Subrasante Inadecuada
$3\% \leq \text{CBR} < 6\%$	Subrasante Pobre
$6\% \leq \text{CBR} < 10\%$	Subrasante Regular
$10\% \leq \text{CBR} < 20\%$	Subrasante Buena
$20\% \leq \text{CBR} < 30\%$	Subrasante Muy Buena
$30\% \leq \text{CBR}$	Subrasante Extraordinaria

Fuente: Manual de carreteras “Suelos, Geología, geotecnia y pavimento” MTC, 2013

2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

2.3.1 SUELOS ARCILLOSOS

Los suelos arcillosos están conformados principalmente por silicato de aluminio hidratado, sus partículas son de aproximadamente 0.005mm de diámetro y posee una textura plástica. La arcilla se origina por la alteración hidrotermal de rocas ígneas (granito, riolita, diorita y basalto) que bajo condiciones de presión, temperatura y acidez.

La clasificación de las arcillas principalmente se divide en primarias o residuales de origen hipogénico, es decir aquellas que permanecieron en su mismo lugar de formación, y secundarias, las que fueron acarreadas de lugares distintos a los de su formación. De esta clasificación a su vez se desprende las arcillas fluviales, aquellas que fueron depositadas por ríos; lacustres, asentadas en lagos; marinas, arcillas con mayor uniformidad; en delta, arenosas y de composición irregular y glacial, las que fueron formadas debido a la acción de grandes masas de suelo.

2.3.2 SUELO NATURAL

Puede definirse, como el material mineral no consolidado en la superficie de la tierra, que ha estado sometido a la influencia de factores genéticos

y ambientales (material parental, clima, macro y microorganismos y topografía), actuando durante un determinado periodo. Es considerado también como un cuerpo natural involucrado en interacciones dinámicas con la atmósfera y con los estratos que están debajo de él, que influye en el clima y en el ciclo hidrológico del planeta, y que sirve como medio de crecimiento para diversos organismos.

2.3.3 SUBRASANTE EN VÍAS TERRESTRES

La subrasante es la capa superior del terraplén o el fondo de las excavaciones en terreno natural, que soportará la estructura del pavimento, y está conformada por suelos seleccionados de características aceptables y compactados por capas para constituir un cuerpo estable en óptimo estado, de tal manera que no se vea afectada por la carga de diseño que proviene del tránsito. Su capacidad de soporte en condiciones de servicio, junto con el tránsito y las características de los materiales de construcción de la superficie de rodadura, constituyen las variables básicas para el diseño de la estructura del pavimento que se colocará encima. En la etapa constructiva, los últimos 0.30m de suelo debajo del nivel superior de la subrasante, deberán ser compactados al 95% de la máxima densidad seca obtenida del ensayo Proctor modificado.

Los suelos por debajo del nivel superior de la subrasante, en una profundidad no menor de 0.60 m, deberán ser suelos adecuados y estables con $\text{CBR} \geq 6\%$. En caso el suelo, debajo del nivel superior de la subrasante, tenga un $\text{CBR} < 6\%$ (subrasante pobre o subrasante inadecuada), corresponde estabilizar los suelos.

2.3.4 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.

Tabla 3: Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de Cal.

MATERIAL	VENTAJAS	DESVENTAJAS
CAL HIDRATADA EN POLVO	Puede ser aplicada más rápidamente que la lechada. La cal hidratada en polvo puede ser utilizada para secar arcillas, pero no es tan eficaz como la cal viva.	Las partículas hidratadas de cal son finas, por lo que el polvo puede ser un problema. Este tipo de uso generalmente es inadecuado en áreas pobladas.
CAL VIVA EN SECO	Económica. Posee entre 20 y 24 % más de óxido de calcio disponible que la cal hidratada. Tamaños de partículas más grandes, es excelente para secar suelos.	Requiere 32% de su peso en agua para convertirse en cal hidratada y puede haber pérdida adicional debido al calor de hidratación. Puede requerir mayor cantidad de mezcla.
LECHADA DE CAL	Aplicación libre de polvo. Es más fácil lograr la distribución. Se aprovecha la aplicación por rociado. Se requiere menos agua adicional para la mezcla final.	Velocidad lenta de aplicación. Costos más altos debido al equipo extra requerido. Puede no ser práctico en suelos muy mojados. No es práctico para secar.

Fuente: "Manual de Estabilización de suelos con Cal"

2.3.5 SUB RASANTE

El suelo preparado para sostener una estructura o un sistema de pavimento. Es la fundación de la estructura del pavimento. El suelo de subrasante es llamado a veces suelo de fundación.

2.3.6 GRANULOMETRÍA

Representa la distribución de los tamaños que posee el agregado mediante el tamizado según especificaciones técnicas.

2.3.7 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO O MECÁNICO

Procedimiento para determinar la granulometría de un material o la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños.

2.3.8 CBR (California Bearing Ratio)

Valor relativo de soporte de un suelo o material, que se mide por la penetración de una fuerza dentro de una masa de suelo.

2.3.9 CURVA DE COMPACTACIÓN (CURVA DE PROCTOR)

Representación gráfica que relaciona el peso unitario seco (densidad) y el contenido de agua del suelo para un determinado esfuerzo de compactación.

2.3.10 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Proceso físico y/o químico por el que se mejoran las propiedades físico-mecánicas del suelo natural en corte o de los materiales de préstamo en relleno, con el objeto de hacerlos estables.

CAPÍTULO III: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Uno de los problemas que tenemos en nuestras carreteras a nivel de subrasante, es que encontramos arcillas expansivas de alta plasticidad, las mismas que tienen una gran capacidad de acumulación de agua, ya que cuando sucede esto, es un proceso largo para que vuelvan a perderlas, por lo que ocasiona expansiones en la zona de la calzada por donde es casi imposible transitar, estas carreteras a nivel de subrasante llamadas trochas carrozables e incluso las que tienen afirmado y tratamientos superficiales, son las más afectadas más aún si se encuentran en zonas donde llueve regularmente.

En nuestro país, más de la mitad de las vías son vecinales, las cuales sin duda merecen una atención adecuada, sobre todo ahora que se está trabajando por niveles de servicio, entonces requerimos vías cada vez más eficientes y mejor construidas.

En la zona de nuestra investigación, provincia de Alto Amazonas, distrito de teniente Cesar López, es una zona eminentemente de suelo arcillo y de lluvias regulares todo el año, lo que origina estos problemas con las arcillas que es realmente preocupante para los productores de la zona, ya que cuando llueve, sobre todo la zona que no tiene afirmado, es muy difícil desplazarse en vehículos motorizados, esto sin duda genera una pérdida de tiempo y perjudica la economía para los usuarios de la vía, donde el factor clima prima para la transitabilidad.

3.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

3.2.1 PROBLEMA GENERAL

¿Cómo influye la cal estructural en el mejoramiento de la subrasante y su Influencia en la Capacidad Portante de la Carretera Shucushuyacu - Lago Cuipari – Teniente César López – Loreto?

3.2.2 PROBLEMAS ESPECIFICOS

¿De qué manera una propuesta de innovación ayudará en la disminución del costo para la mejora de la subrasante de la carretera Yurimaguas – Munichis, provincia de Alto Amazonas, departamento de Loreto?

¿De qué manera la propuesta de innovación ayudará en la durabilidad de la subrasante de la carretera Yurimaguas – Munichis, provincia de Alto Amazonas, departamento de Loreto?

3.3 OBJETIVOS

3.3.1 OBJETIVO GENERAL

Elaborar una propuesta de innovación y su influencia para mejorar la sub rasante de la carretera Yurimaguas – Munichis, Provincia de Alto Amazonas, Departamento de Loreto.

3.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar la resistencia de la subrasante al incorporar cal estructural en porcentajes de 9%,15% y 21%.
- Determinar la variación del índice de plasticidad cuando se utiliza cal estructural en porcentajes de 9%,15% y 21%.
- Determinar la variación de la densidad máxima cuando se incorpora cal estructural en porcentajes de 9%,15% y 21%.

3.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación se justifica porque nos permitirá conocer si la adición de cal estructural en una subrasante arcillosa mejora la subrasante y por consiguiente capacidad de soporte de esta (CBR) y de esta manera podremos optimizar los diseños al respecto y podamos tener una alternativa más en la solución de este tipo de problemática.

3.5 LIMITACIONES

- Realizar más ensayos de CBR ya que los moldes disponibles eran limitados debido al uso continuo de otros tesis y estudiantes.
- Insuficiente espacio y tiempo en el Laboratorio de Suelos, para realizar los ensayos, ya que existen horarios limitados para trabajar.

3.6 HIPÓTESIS

3.6.1 Hipótesis General

El uso de la cal estructural en porcentajes de 9%,15% y 21% incrementa la resistencia de la subrasante en el suelo limo arcilloso.

3.6.2 Hipótesis General

- La resistencia de la subrasante varía significativamente al incorporar cal estructural en porcentajes de
- El índice de plasticidad varía significativamente cuando se utiliza cal estructural en porcentajes de 9%,15% y 21%.
- La densidad máxima varía significativamente cuando se incorpora cal estructural en porcentajes de 9%,15% y 21%.

3.7 VARIABLES

3.7.1 Identificación de las variables

Variable Independiente:

Cal Estructural.

Variable dependiente:

Resistencia de la Subrasante (CBR).

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA

4.1 TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

4.1.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación pertenece a un Tipo de Investigación Experimental.

4.1.2 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

El Diseño de investigación es Experimental, en función a las pruebas que se realizarán en la investigación.

4.2 POBLACIÓN Y MUESTRA

Cal Estructural para mejoramiento de sub rasante.

4.2.1 POBLACIÓN

Suelo de la Carreteras Shucushuyacu del Distrito de teniente Cesar López – Loreto.

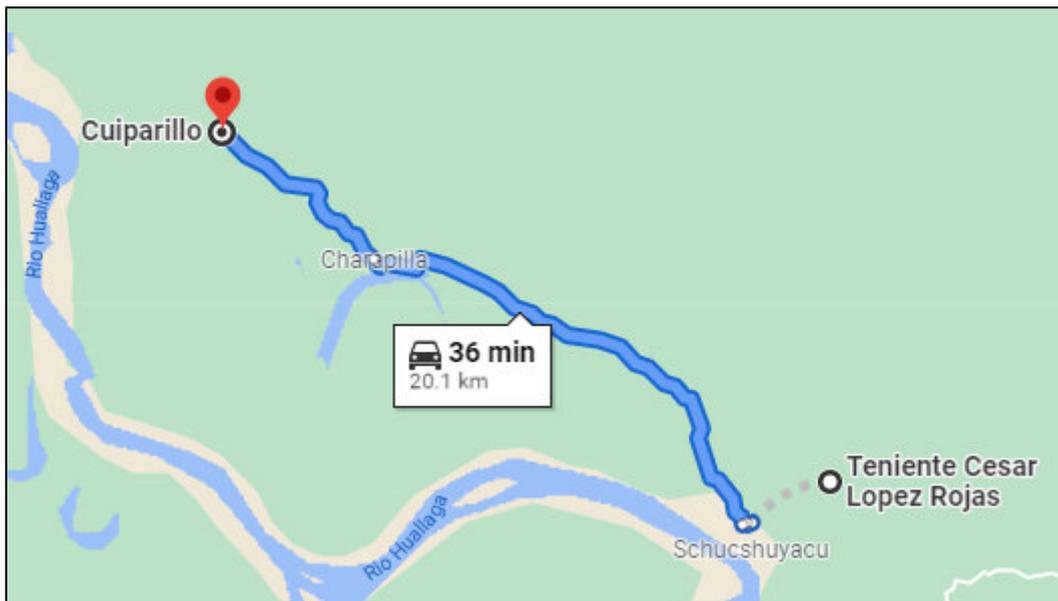
4.2.2 MUESTRA

Carretera Shucushuyacu – Lago Cuipari.

4.3 LOCALIZACIÓN Y UBICACIÓN DE LA ZONA DE EXTRACCIÓN

La carretera seleccionada para esta investigación se encuentra ubicada en el departamento de Loreto, provincia de Alto Amazonas, distrito de Teniente Cesar López.

Ilustración 9: Localización de la zona de extracción de muestras



Fuente: Adaptado de Google Earth, 2021

Ilustración 10: Carretera Shucushuyacu – Lago Cuipari



Fuente: Fotografía Propia

4.4 MÉTODOS, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

4.4.1 TÉCNICAS

Se empleará en la recolección de datos la técnica de Experimentación.

4.4.2 INSTRUMENTO

Para la técnica de Experimentación se utilizará una Ficha de experimentación como instrumento.

4.4.3 PROCEDIMIENTO

- Se realizarán las pruebas correspondientes en la carretera Shucushuyacu – Lago Cuipari – Teniente Cesar López - Loreto.
- Desarrollo de ensayos de laboratorio especiales para la recolección de Datos.
- Validación de los ensayos de Laboratorio y de tal manera validar la información obtenida.
- Procesamiento de Datos obtenidos en Laboratorio.
- Organización de los datos en cuadros.
- Representación de los datos mediante tablas y gráficas.
- Análisis e interpretación de los datos.
- Elaboración de los informes respectivos en el Proyecto de Tesis.

Ilustración 11: Excavación con la máquina excavadora



Fuente: Fotografía propia

Ilustración 12: Calicata de 1.50 m de profundidad para extracción de suelo arcilloso



Fuente: Fotografía propia

Ilustración 13: Recolección de muestras alteradas del suelo arcilloso



Fuente: Fotografía propia

4.4.4 CARACTERÍSTICAS DEL ESTABILIZANTE

El estabilizante que se usó para realizar los ensayos de laboratorio como el Proctor Modificado y CBR fue Cal de Obra la marca Martell con las siguientes características.

- Color : Blanco Humo o grisáceo
- Aspecto : Polvo
- %Ca (OH)₂ : 3-15%
- Olor : Inodoro
- Densidad Relativa : 2.73 g/cm³

Compuesto formado de trazas de carbonato de calcio, hidróxido de calcio o bien una mezcla de carbonato de calcio y partículas de rocas disgregadas. Es un aportante de calcio. El producto se encuentra disponible en la mayoría de las tiendas del rubro materiales de construcción.

Ilustración 14: Cal de obra



Fuente: Adaptado de Sodimac.com.pe, 2018

4.5 PROCESAMIENTO, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS

La información será procesada en forma computarizada a través del Programa de Software: Excel (para la base de Datos) y en Gabinete con cálculos respectivos. De tal manera el procesamiento de la información nos permitirá elaborar la matriz de datos con la que se diseñará las tablas y gráficos

4.5.1 ENSAYOS DE LABORATORIO

Con las muestras extraídas de campo se procedió a realizar los ensayos de laboratorio. Los ensayos de granulometría y ensayos de consistencia servirán para justificar el tipo de estabilización elegido, ya que el MTC recomienda diversos tipos de estabilización según la clasificación SUCS y el Índice de Plasticidad del suelo ensayado.

Luego se procederá a realizar ensayos de Proctor modificado y CBR para muestras de suelo en estado natural, 9%, 15% y 21% de cal, en donde se evaluará el comportamiento de sus características físicas de los suelos

tales como su densidad seca, óptimo contenido de humedad y resistencia a la penetración.

4.5.2 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO

Este ensayo se realizará según las indicaciones de la Norma Técnica Peruana NTP 339.128 “SUELOS. Método de ensayo para el análisis granulométrico “. Debido a que la muestra en estudio presenta gran cantidad de finos según antecedentes de la zona se realizará la clasificación por tamizado y por medio del hidrómetro. A continuación, se muestran algunos de los procedimientos en laboratorio del ensayo.

Ilustración 15: Secado de la muestra en cocina eléctrica



Fuente: Fotografías propia de laboratorio

Ilustración 16: Lavado de la muestra por la malla N°200



Fuente: Fotografías propias de laboratorio

4.5.3 ENSAYOS DE CONSISTENCIA: LÍMITES DE ATTERBERG

Estos ensayos se realizaron según las indicaciones de la Norma Técnica Peruana NTP 339.129 “SUELOS. Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico, e índice de plasticidad”

4.5.3.1 LÍMITE LÍQUIDO

Los procedimientos realizados en el laboratorio se elaboraron de acuerdo a la norma mencionada. Inicialmente es recomendable reducir el tamaño de las partículas del suelo.

Ilustración 17: Reducción del tamaño de las partículas del suelo, para realizar el ensayo de consistencia



Fuente: Fotografías propias de laboratorio

4.5.3.2 LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLÁSTICIDAD

El índice de plasticidad es el rango de humedad entre límite líquido y el límite plástico.

4.5.3.3 ENSAYO PROCTOR MODIFICADO DEL SUELO NATURAL

Se realizó según la Norma Técnica Peruana (NTP 339.141); “Suelos. Método de ensayo para la compactación del suelo en laboratorio utilizando energía modificada (2,700 kNm/m³ (56,000 pie-lbf/pie³))”.

Tipo de procedimiento

Según la clasificación granulométrica cumple con el requerimiento de uso del procedimiento "A".

Procedimiento del método A

- Molde de 101.6 mm (4 pulg) de diámetro.
- Material que pasa la malla N° (4.75mm).
- Capas: 5
- Golpes por capas: 25.
- Uso: Se utiliza, si la malla N°4(4.75–mm) retiene 20% o menor del peso del material.

4.5.3.4 ENSAYO DE CBR DEL SUELO NATURAL

Se realizó según la Norma Técnica Peruana (NTP 339.145); "Suelos. Método de ensayo de CBR (Relación de Soporte de California) de suelos compactados en el laboratorio.

Resumen del Método de Ensayo

"Para ensayos realizados sobre materiales compactados a un contenido de agua se preparan tres especímenes. Los especímenes se compactan usando tres diferentes esfuerzos de compactación para obtener pesos unitarios, tanto por encima como por debajo del peso unitario deseado. Después de permitir que los especímenes se cubran de agua para humedecerse, u otro tratamiento específico como curado, cada espécimen estará sujeto a la penetración por un vástago cilíndrico. Los resultados de esfuerzo (carga) versus la profundidad de penetración se plotean para determinar el CBR de cada espécimen. El CBR a densidad especificada se determina con un gráfico de CBR versus el peso unitario seco.

4.5.3.5 ENSAYO DE COMPACTACIÓN CBR

- Se Preparó la muestra con el contenido óptimo de humedad determinado en el ensayo de compactación Proctor modificado.
- Se ensambló los moldes cilíndricos con sus placas de base, collares de extensión, discos espaciadores y papeles filtro.
- Se Compactó la muestra en los 3 CBR en cada uno de ellos en 5 capas, el primero con 12 golpes, el segundo con 25 golpes y el tercero con 56 golpes por capa.
- Se determinó la humedad de las muestras de cada molde.
- Se determinó la densidad seca de las muestras de cada molde

4.5.3.6 CLASIFICACIÓN SUCS

Se realizó según la Norma Técnica Peruana (NTP 339.134); “Suelos. Método para la clasificación de suelos con propósitos de ingeniería (sistema unificado de clasificación de suelos, SUCS)”.

El procedimiento general se menciona a continuación:

- Para la clasificación por este ensayo se necesitan los resultados de los ensayos de consistencia.
- EL primer paso es clasificar si son suelos granulares o suelos finos con el porcentaje de suelo que pasa la malla N° 200.
- Seguidamente se clasifica según el porcentaje del límite líquido, puede ser un ML, CL u OL si el LL es inferior al 50% y puede ser MH, CH u OH si el LL es mayor al 50%.
- Finalmente se ingresa a la tabla con los valores exactos del Límite Líquido e Índice de plasticidad.

4.5.3.7 CLASIFICACIÓN AASHTO

Se realizó según las Normas de la American Association of State Highway and Transportation Officials “ASHTO” 1993.

- Para la clasificación por este ensayo se necesitan los resultados de los ensayos de granulometría y consistencia y del ensayo de granulometría.

4.5.3.8 ENSAYOS DEL SUELO ARCILLOSO CON ADICIÓN DE 9%,15% Y 21% DE CAL

Los ensayos anteriores son para muestras de suelos en estado natural. Para comprobar la hipótesis es necesario realizar ensayos de laboratorio con diferentes porcentajes de cal, los porcentajes seleccionados son 9%,15% y 21%. Los ensayos a realizar con estas dosificaciones son; Ensayos de consistencia, Proctor modificado y el ensayo de California Bearing Ratio (CBR).

CAPÍTULO V: RESULTADOS

5.1 GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL SUELO NATURAL Y LA CAL

Los resultados del ensayo de gravedad específica se aprecian en la tabla N° 4, en donde se puede concluir que la gravedad específica de la cal es mayor a la del suelo natural. Estos valores ayudaran a la interpretación de los resultados de futuros ensayos.

Tabla 4: Resultado del ensayo de gravedad específica del suelo natural y cal

SONDAJE		SUELO NATURAL		CAL	
Profundidad(m)		1.5		1.5	
Muestra		M-1		M-1	
Tipo de muestra		MAB		MAB	
N° Fiola		25	26	27	28
1	Peso de fiola + suelo seco (g)	85.15	85.27	74.87	75
2	Peso de fiola (g)	55.12	55.25	54.81	54.93
3	Peso del suelo seco (g)	30.03	30.02	20.06	20.07
4	Peso de fiola + agua + suelo (g)	173.25	173.38	167.08	167.24
5	Peso de fiola + agua (g)	154.68	154.79	154.38	154.49
6	Volumen del suelo (cm ³)	11.46	11.43	7.36	7.32
7	Temperatura (°C)	27	27	27	27
8	Corrección por Temperatura	0.9983	0.9983	0.9983	0.9983
9	Gs	2.62	2.62	2.72	2.74
10	Gs Promedio	2.62		2.74	
11	Diferencia	0.23%		0.60%	
12	Calificativo	Bien		Bien	

Fuente: Los resultados obtenidos fueron obtenidos directamente del laboratorio de mecánica de suelos

5.2 ENSAYOS DE GRANULOMETRÍA Y CONSISTENCIA DEL SUELO NATURAL

5.2.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Los resultados del análisis granulométrico por tamizado se muestran en la tabla 5. Este análisis se realizó en dos etapas, la primera el tamizado de la muestra entre la malla de 3" y la malla N°10 y la segunda fue el tamizado del sedimento, luego del lavado, entre la malla N°10 y la malla N°200.

Tabla 5: Análisis mecánico por tamizado

Tamiz	Abertura(mm)	Porcentaje Acumulado que pasa (%)
3"	76.2	100
2"	50.8	99.66
1 1/2"	38.1	99.56
1"	25.4	99.46
3/4"	19.05	98.77
1/2"	12.7	97.79
3/8"	9.53	96.36
Nº 004	4.75	91.57
Nº010	2	88.65
Nº020	0.85	85.24
Nº040	0.43	81.13
Nº060	0.25	76.62
Nº140	0.11	71.22
Nº200	0.06	68.42

Fuente: Los resultados fueron obtenidos directamente del laboratorio de mecánica de suelos

Uno de los valores importantes de esta tabla es el porcentaje de suelo que pasa la malla N°10 de 88.65%, ya que este porcentaje pasa a ser el 100% de la muestra para la realización del ensayo de sedimentación por medio del hidrómetro.

También, según los resultados de la tabla N°5, se puede cuantificar porcentualmente los tipos de suelos, siendo 8.43% gravas, 23.15% arenas y 68.42% finos (arcillas y limos).

5.2.2 LÍMITE LÍQUIDO

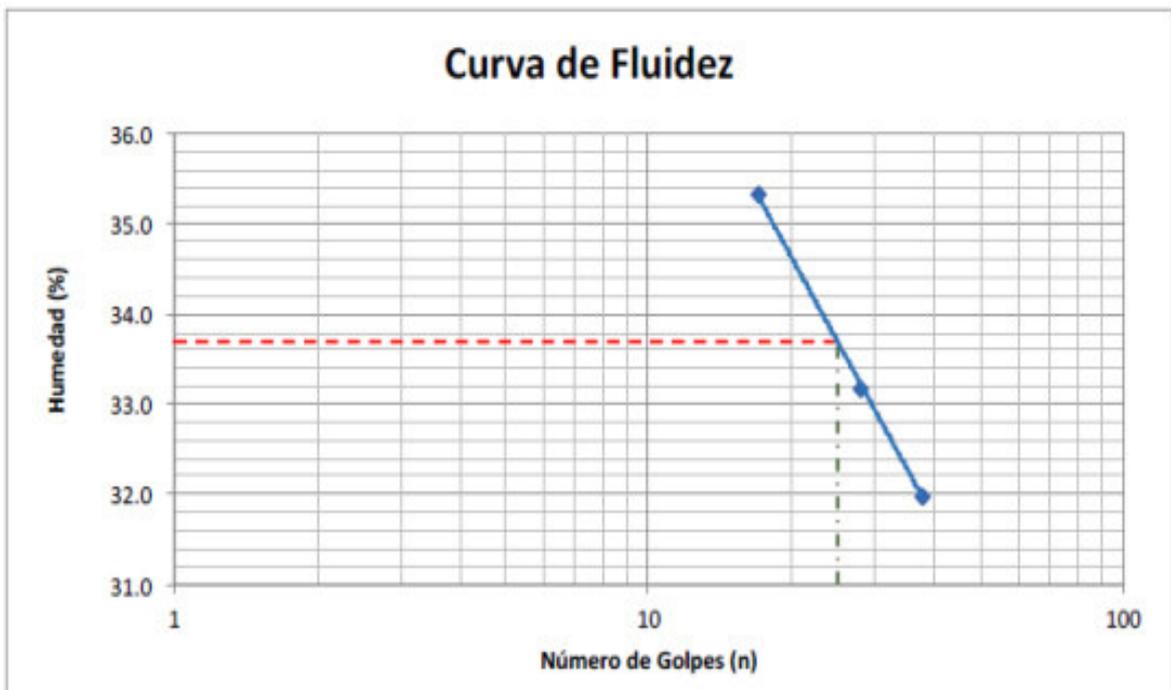
Los resultados del ensayo de límite líquido se muestran en la tabla 6. El límite líquido obtenido de la muestra fue de 33.7 %

Tabla 6: Resultados del ensayo de Limite Liquido

Recipiente	1	2	3
Peso de tara (g)	18.32	18.00	23.9
Peso del suelo húmedo + tara (g)	28.51	29.08	34.54
Peso del suelo seco + Recipiente gr	25.85	26.32	31.97
Peso del agua gr	2.66	2.76	2.57
Peso del suelo seco gr	7.53	8.32	8.04
% de humedad	35	33	32
Numero de golpes	17	28	38

Fuente: Los resultados fueron obtenidos directamente del laboratorio de mecánica de suelos

Gráfico 1: Gráfico de Fluidez



Fuente: Resultados de Laboratorio

5.2.3 LÍMITE PLÁSTICO

Del ensayo realizado se obtuvo un Limite Plástico de 19.79%.

Tabla 7: Resultados del ensayo de Limite Plástico

Recipiente	1	2
Peso de tara (g)	23.35	21.33
Peso del suelo húmedo + tara (g)	29.42	27.49
Peso del suelo seco + tara (g)	28.41	26.48
Peso del agua (g)	1.01	1.01
Peso del suelo seco gr	5.06	5.15
% de humedad	19.96	19.61
% Promedio	19.79	

Fuente: Los resultados fueron obtenidos directamente del laboratorio de mecánica de suelos

5.2.4 ÍNDICE DE PLÁSTICIDAD

El índice de plasticidad de la muestra ensayada resultó 13.7%.

Tabla 8: índice de Plasticidad

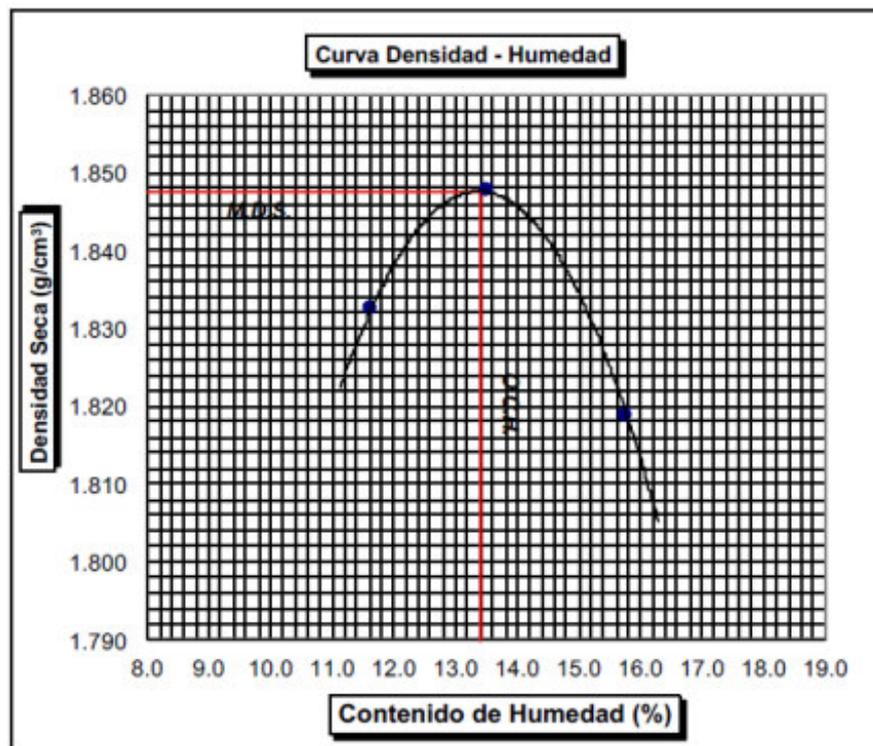
Límite Líquido (%)	33.70
Límite Plástico (%)	20
Índice de Plasticidad IP (%)	13.7

Fuente: Los resultados fueron obtenidos directamente del laboratorio de mecánica de suelos

5.2.5 RESULTADOS DEL ENSAYO PROCTOR MODIFICADO Y CBR DEL SUELO NATURAL

Según el ensayo Proctor Modificado, para el suelo natural, el óptimo contenido de humedad es 13.4 %, con el cual se logra la máxima densidad seca (MDS) igual a 1.85 g/cm³. En el gráfico 2 se puede apreciar la máxima densidad seca que se obtiene para el valor del óptimo contenido de humedad.

Gráfico 2: Curva de compactación de Proctor Modificado



Fuente: Los resultados fueron obtenidos directamente del laboratorio de mecánica de suelos

Luego de obtener el óptimo contenido de humedad y la máxima densidad seca se procedió a saturar los moldes con la muestra, por 96 horas, que servirán para calcular el CBR.

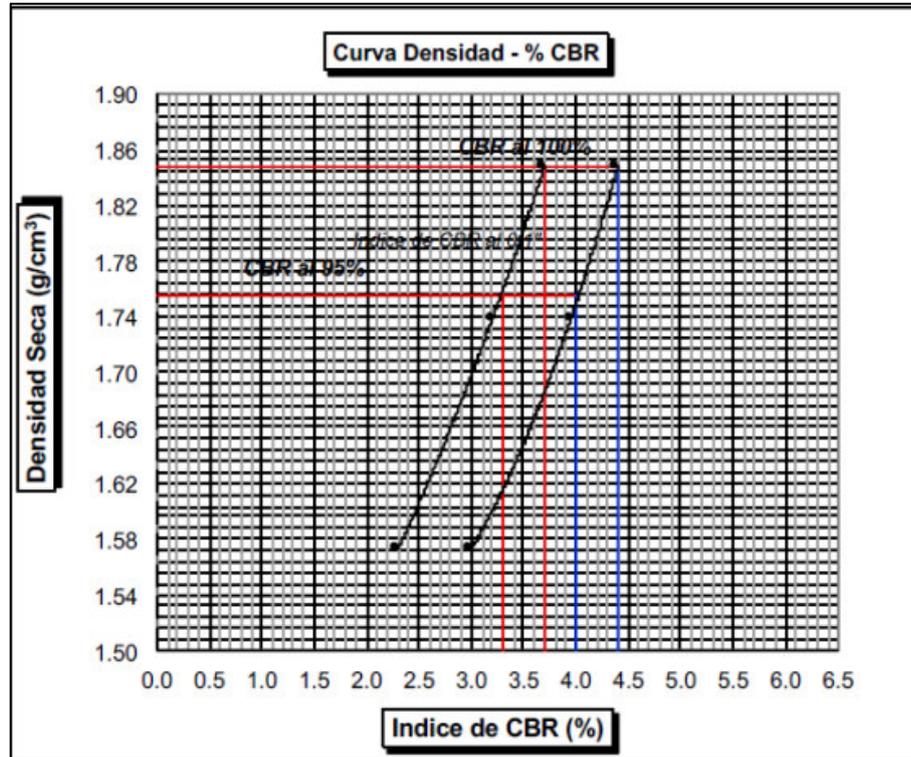
Tabla 9: CBR luego de la saturación

	MOLDE 1	MOLDE 2	MOLDE 3
DENSIDAD SECA (g/cm ³)	1.85	1.74	1.57
CBR (0.1" de Penetración)	3.7	3.2	2.3
CBR (0.2" de Penetración)	4.4	3.9	3
GOLPES	56	25	10
% DE EXPANSIÓN	3.99	5.15	5.54

Fuente: Los resultados fueron obtenidos directamente del laboratorio de mecánica de suelos

Con los valores del CBR para diferentes contenidos de humedad menores al óptimo se procede a graficar las curvas para cada perforación 0.1" y 0.2" para calcular el CBR del suelo al 95% de la MDS y al 100% de la MDS. Gráfico 3 y los resultados se muestran en la tabla N° 10.

Gráfico 3: Índice CBR vs Densidad Seca (g/cm³)



Fuente: Los resultados fueron obtenidos directamente del laboratorio de mecánica de suelos

Tabla 10: Resultados del CBR al 95% y 100% de la MDS

MAXIMA DENSIDAD SECA (g/cm³):	1.85	
HUMEDAD OPTIMA:	13.40%	
PENETRACIÓN (pulg.)	0.1"	0.2"
CBR al 95% de la MDS:	3.3	4.0
CBR al 100% de la MDS:	3.7	4.4
CONDICIÓN DE LA MUESTRA	4 días de Saturación	
SOBRECARGAR	10 libras (4.55)	

Fuente: Los resultados fueron obtenidos directamente del laboratorio de mecánica de suelos

5.2.6 RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS DEL SUELO NATURAL

Tabla 11: Resultados de ensayos del suelo natural

Límite Líquido (%)	34
Límite Plástico (%)	20
Índice de Plasticidad IP (%)	14
Clasificación SUCS	CL
Clasificación AASHTO	A-6(8)
Proctor modificado	
Dsmáx	1.85 g/cm ³
Wop	13.40%
Ensayo CBR	
CBR de diseño al 95% de MDS	3.3%
CBR de diseño al 100% de MDS	3.7%

Fuente: Los resultados fueron obtenidos directamente del laboratorio de mecánica de suelos

5.3 RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS CON 9% DE CAL

Tabla 12: Resultados de ensayos del suelo con cal al 9%

Límite Líquido (%)	30.18
Límite Plástico (%)	23.91
Índice de Plasticidad IP (%)	6.27
Proctor modificado	
Dsmáx	1.87 g/cm ³
Wop	14.60%
Ensayo CBR	
CBR de diseño al 95% de MDS	3.8%
CBR de diseño al 100% de MDS	5.1%

Fuente: Los resultados fueron obtenidos directamente del laboratorio de mecánica de suelos

5.4 RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS CON 15% DE CAL

Tabla 13: Resultados de ensayos del suelo con cal al 15%

Límite Líquido (%)	27.86
Límite Plástico (%)	24.57
Índice de Plasticidad IP (%)	3.29
Proctor modificado	
Dsmáx	1.89 g/cm ³
Wop	14%
Ensayo CBR	
CBR de diseño al 95% de MDS	5.9%
CBR de diseño al 100% de MDS	6.4%

Fuente: Los resultados fueron obtenidos directamente del laboratorio de mecánica de suelos

5.5 RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS CON 21% DE CAL

Tabla 14: Resultados de ensayos del suelo con cal al 21%

Límite Líquido (%)	26.43
Límite Plástico (%)	24.65
Índice de Plasticidad IP (%)	1.78
Proctor modificado	
Dsmáx	1.88 g/cm ³
Wop	13.60%
Ensayo CBR	
CBR de diseño al 95% de MDS	4.1%
CBR de diseño al 100% de MDS	5.1%

Fuente: Los resultados fueron obtenidos directamente del laboratorio de mecánica de suelos

5.6 ANALISIS DE RESULTADOS

5.6.1 LIMITE LÍQUIDO, LIMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD

Tabla 15: Resumen Límite Líquido, Limite Plástico e Índice de Plasticidad

% de Cal	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de plasticidad	% que decae IP
Suelo natural	33.70	19.79	13.73	
9%	30.18	23.91	6.27	55.21%
15%	27.86	24.87	2.99	78.64%
21%	26.43	24.65	1.78	87.29%

Fuente: Los resultados fueron obtenidos directamente del laboratorio de mecánica de suelos

Gráfico 4: Comportamiento del Límite Líquido frente a diferentes porcentajes de cal

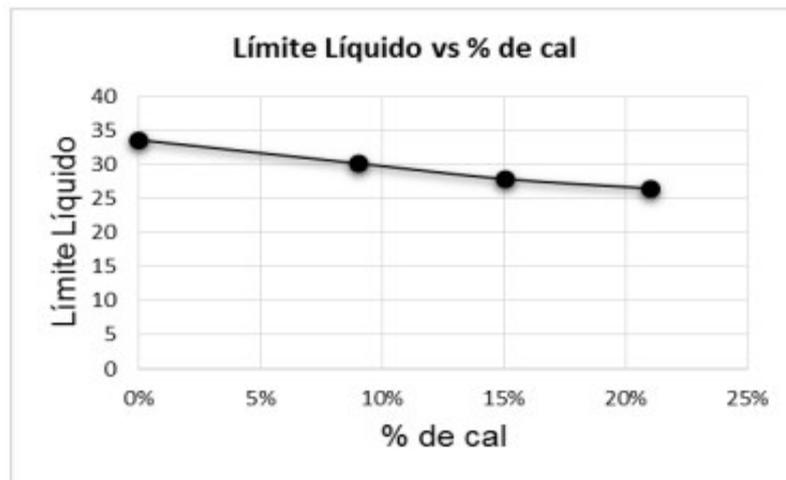
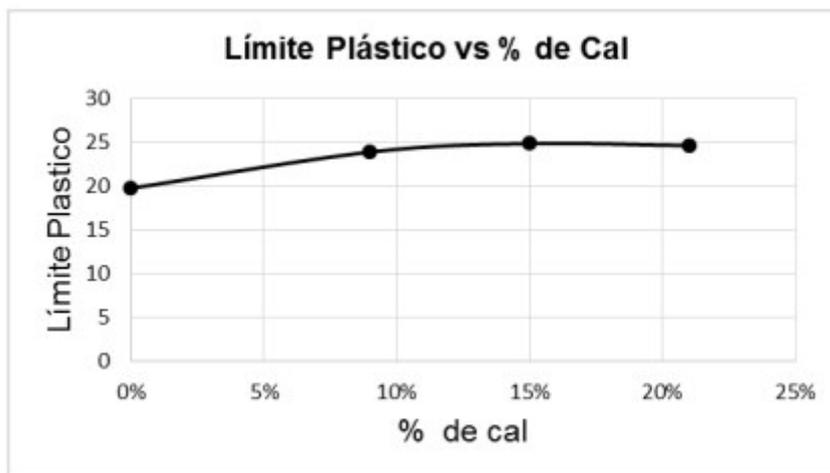
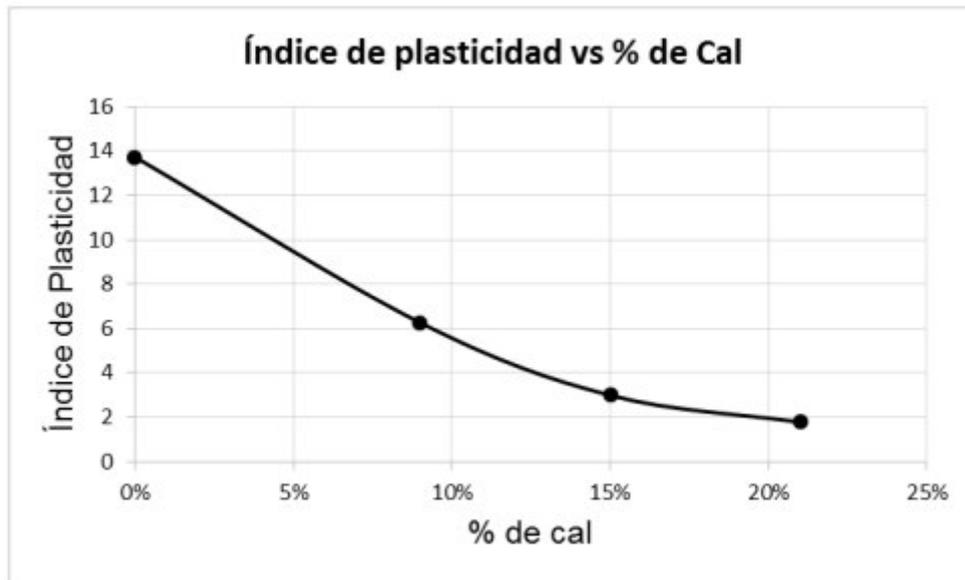


Gráfico 5: Comportamiento del Límite Plástico frente a diferentes porcentajes de cal



Fuente: Los resultados fueron obtenidos directamente del laboratorio de mecánica de suelos

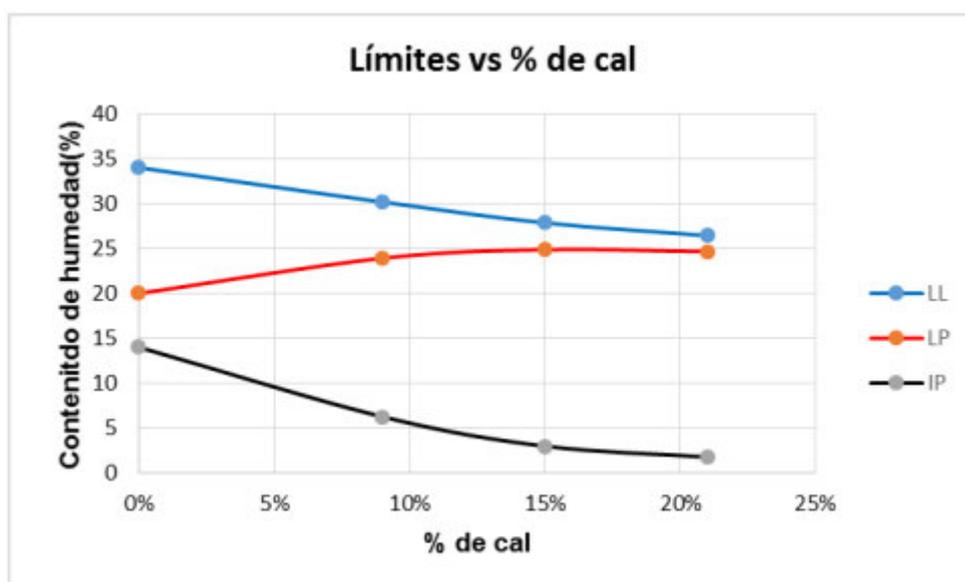
Gráfico 6: Comportamiento del Índice de Plasticidad frente a diferentes porcentajes de cal



Fuente: Comportamiento del Índice de Plasticidad frente a diferentes porcentajes de cal

El Límite Líquido sufrió un decremento progresivo y significativo con el incremento de los porcentajes de cal, esto se debe al sellamiento que realiza el catión calcio de los espacios entre las partículas de arcilla, obstaculizando el ingreso del agua. La frontera superior del estado plástico tuvo un incremento apreciable y el índice de plasticidad decreció considerablemente.

Gráfico 7: Comportamiento de los límites de consistencia al variar la dosis de ca



5.6.2 COMPACTACIÓN PROCTOR Y CBR

Tabla 16: Compactación Proctor y CBR

% de Cal	Dsmax (gr/cm ³)	W%	CBR (0.1'') al 95% de la MDS	CBR (0.1'') al 100% de la MDS	% de variación de CBR
0%	1.85	13.4	3.3	3.7	10.81%
9%	1.87	14.6	3.8	5.1	34.21%
15%	1.89	14	5.9	6.4	8.47%
21%	1.88	16.6	4.1	5.1	24.39%

Fuente: Comportamiento del Índice de Plasticidad frente a diferentes porcentajes de cal

Gráfico 8: Comportamiento de la Dsmax sobre los porcentajes de cal.

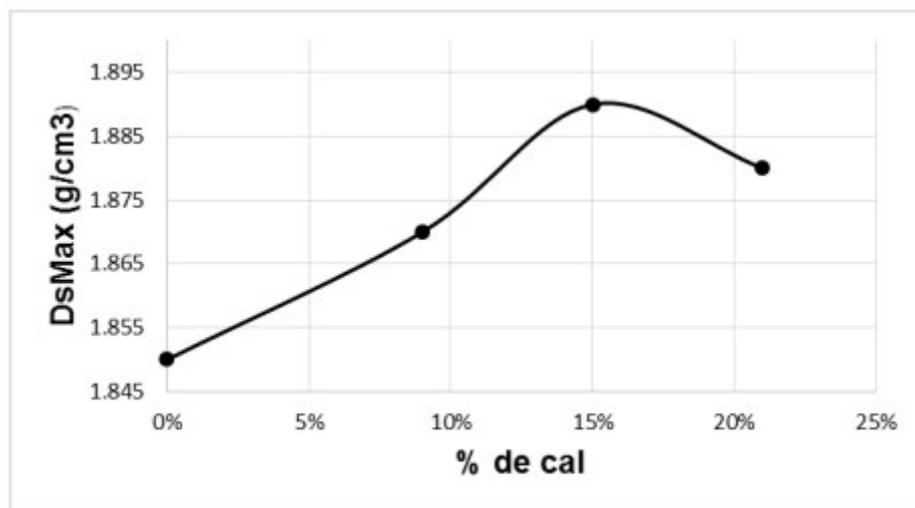
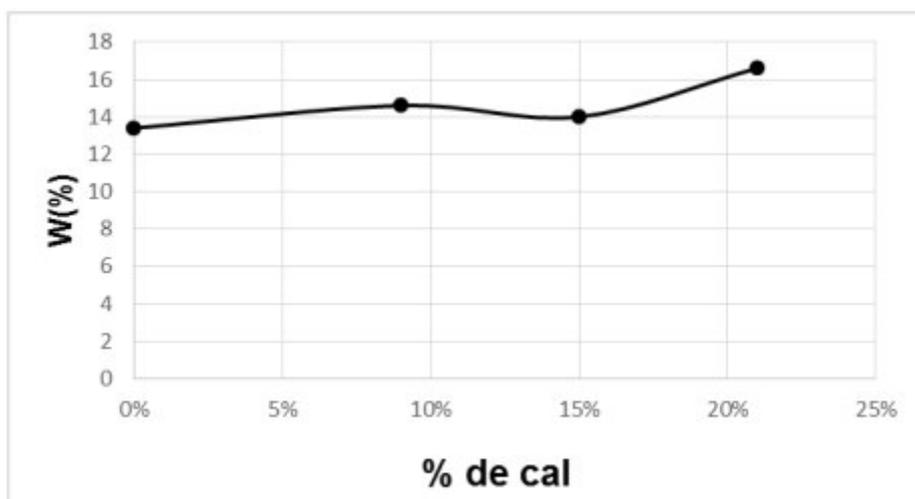
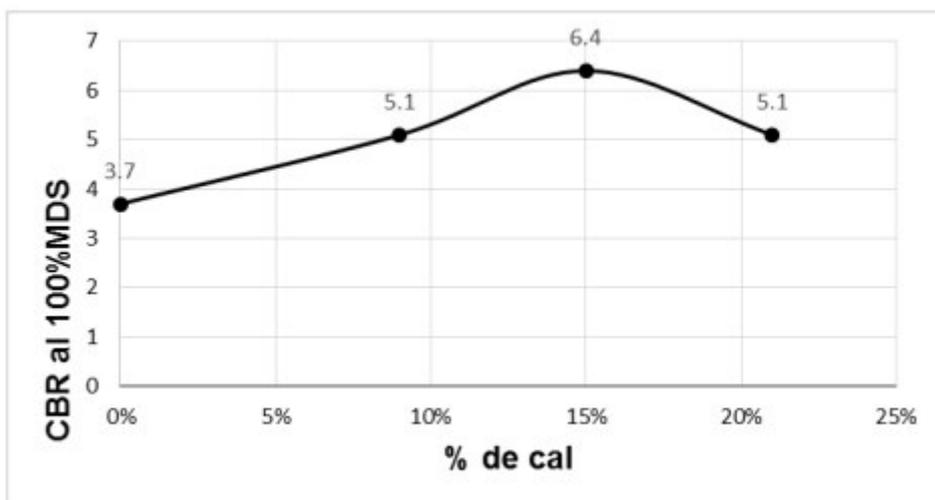


Gráfico 9: Contenido de humedad (W%) vs porcentajes de cal



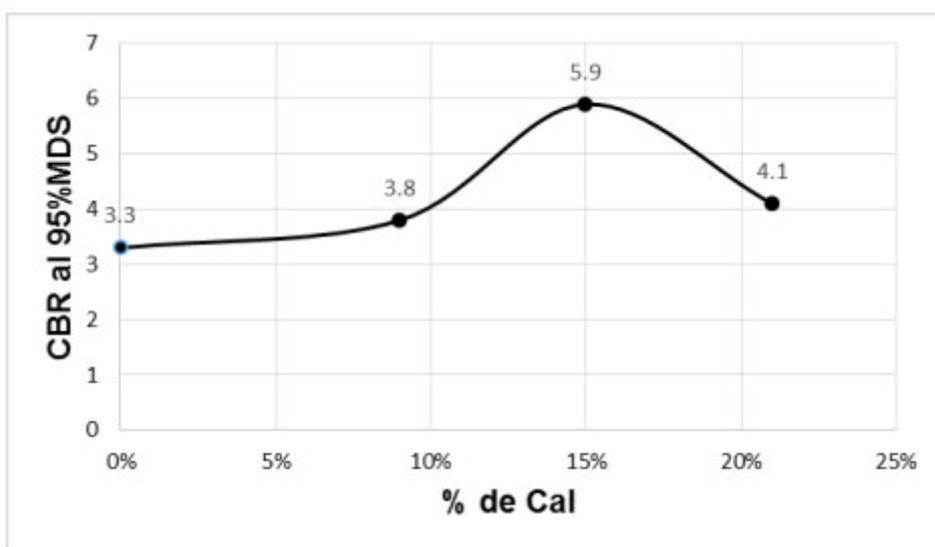
Fuente: Resultados de Laboratorio

Gráfico 10: Comportamiento del CBR al 100% de la MDS vs porcentajes de cal



Fuente: Resultados de Laboratorio

Gráfico 11: Comportamiento del CBR al 95% de la MDS vs porcentajes de cal



Fuente: Resultados de Laboratorio

- Según los resultados del ensayo de compactación la máxima densidad seca aumenta al incrementar dosis de cal. Esto ocurre debido a que la gravedad específica de la cal es mayor que la del suelo ensayado. (Gráfico 8).
- El contenido de humedad del suelo aumenta al incrementar porcentajes de cal al suelo, es decir a mayor dosis de cal mayor contenido de agua. (Gráfico 9).

- Para dosis mayores al 15% el valor del CBR decrece, ya que el elemento se comporta como un nuevo material y con características diferentes. (Grafico 10).
- El CBR de diseño al 100% de la MDS aumenta desde 3.7 hasta un máximo de 6.4 y luego comienza a decrecer el valor.
- El CBR de diseño al 95% de la MDS aumenta desde 3.3 hasta un máximo de 5.9 y luego comienza a decrecer el valor.

CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 DISEÑO SOBRE LA SUBRASANTE NATURAL CON UN CBR 3.3

Al obtener los resultados de los ensayos puedo afirmar que el uso de la cal en porcentajes de 9%, 15% y 21% incrementa la resistencia de la subrasante en un suelo limo arcilloso.

Para el valor del coeficiente a_1 se considera 0.44 para un módulo de mezcla a una temperatura de 20°C de acuerdo con lo estipulado en la guía AASHTO y según se indica en el gráfico 11.

Tabla 17: Coeficiente estructural para el diseño de la estructura de la Carretera

Datos para el diseño	
Confiability =	0.95
CBR =	3.3
$a_1 = 0.0052 \times E^{0.555} =$	0.44
$a_2 =$	0.14
$a_3 =$	0.11
$Z_r =$	-1.65
$S_o =$	0.45
PSI (4.2-2.2)	2.20
$p_t =$	2.00
$M_r (\text{psi}) = 2555 \times \text{CBR}^{0.64} =$	5,486
Inicial =	4.20

Fuente: Los coeficientes fueron obtenidos del Manual de Suelos.

6.2 DISEÑO SOBRE UNA SUBRASANTE MEJORADA CON UN CBR 5.9 %

Tabla 18: Diseño con un CBR 5.90

Datos para el diseño	
Confiabilidad =	0.95
CBR =	5.90
a₁ =	0.44
a₂ =	0.14
	0.11
Z_r =	-1.65
So =	0.45
PSI (4.2-2.2)	2.20
pt =	2.00
Mr(psi) = 2555xCBR^{0.64} =	7,957
Inicial =	4.20

Fuente: Los coeficientes fueron obtenidos del Manual de Suelos

Luego de haber realizado los ensayos de mecánica de suelos en el laboratorio, a continuación, se procede a realizar el análisis de los resultados obtenidos.

Para la obtención de cal necesaria para estabilizar el suelo, se ha realizado el ensayo, el cual consiste en la elaboración de especímenes de suelo cal en distintos porcentajes de cal con la finalidad de incrementar el pH de suelo y así obtener el porcentaje de cal que se aproxime a un pH de 13.4, siendo este porcentaje el necesario para estabilizar químicamente al suelo

Mientras que, para obtención de la cantidad de cal óptima para mejorar las características físicas del suelo, han realizado los siguientes ensayos de laboratorio para distintos porcentajes de suelo cal que a continuación se mencionan los ensayos realizados:

- Análisis granulométrico (MTC E 107)
- Límite Líquido /MTC E 110)
- Índice de plasticidad (MTC E 111)
- Clasificación de suelos
- Proctor modificado (MTC E115)
- Valor relativo de soporte (CBR) (MTC E 132)

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- Se realizó el estudio de sus propiedades físicas y se concluye que las características físicas del suelo en estudio son: gravedad específica 2.63, porcentaje de grava 8.43%, porcentaje de arena 23.15% y cantidad de finos 68.42% e índice de plasticidad de 13%.
- Se realizó la clasificación de los suelos por el método AASHTO Y SUCS y se concluye que la muestra en estudio fue una arcilla de baja plasticidad CL según SUCS y un suelo arcilloso plástico con índice de grupo 8; A-6(8) según AASHTO. Como terreno de fundación para obras viales está clasificado como regular a malo.
- Se determinó la máxima densidad seca (MDS) y el óptimo contenido de humedad del suelo con diferentes dosis de cal aplicando Proctor Modificado Método A. La MDS fue de 1.85 g/cm³ que se logra con un óptimo contenido de humedad de 13.40%.
- Con los valores obtenidos del ensayo de Proctor se procedió a estimar el valor del CBR, en la condición de suelo natural, el cual fue igual a 3.3% al 95% de la máxima densidad seca, por lo que cualitativamente es de baja capacidad de soporte.
- De los estudios realizados se comprobó que con una adición del 15% de cal al suelo natural, el CBR se incrementó en 78.8%, esto significaba que el nuevo valor de CBR al 95% de la MDS para este suelo estabilizado fue de 5.9%.

Tabla 19: Variación de la Máxima Densidad Seca y CBR para diferentes porcentajes de cal

% de cal	Máxima Densidad Seca (MDS) (gr/cm³)	CBR (0.1") al 95% de la MDS
Suelo natural	1.85	3.3
9%	1.87	3.8
15%	1.89	5.9
21%	1.88	4.1

Fuente: Los resultados obtenidos fueron obtenidos directamente del laboratorio de mecánica de suelos

7.2 RECOMENDACIONES

- Dada la condición de suelo parcialmente saturado, es recomendable tomar las muestras en épocas oportunas considerando como menos favorable la época lluviosa, ya que las arcillas tienden a expandirse.
- Es recomendable hacer un cuarteo adecuado para obtener muestras alteradas (Ma) representativas, para límites de Atterberg se recomienda utilizar el suelo que pase la malla número 40 que corresponde a la fracción fina.
- Es recomendable utilizar cal de cantera o cal viva, dado que este material contiene un mayor % de CaO₂ y se emplearía un menor porcentaje de cal para lograr un incremento considerable de CBR.
- Es recomendable considerar un tiempo de curado adecuado (4 días) para realizar en ensayo de CBR, ya que, al haber mayor tiempo de curado, la expansión de las arcillas es mayor por lo que el valor de CBR disminuye.
- Es recomendable utilizar el 15% de cal para estabilizar el suelo con las condiciones dadas según el tipo de material utilizado para garantizar un incremento de 5.9 % en el valor de CBR.

- Durante la prueba de lavado para la clasificación granulométrica, es recomendable realizarlo de manera cuidadosa para evitar perder partículas de muestra en el agua.
- La Norma CE.020 recomienda utilizar como máximo 8% de cal, estos deben cumplir con los requisitos de la NTP 334.125: 2002 “Cal viva y cal hidratada para estabilización de suelos”. Esta norma especifica que la cal debe contener óxido de Calcio y Magnesio como mínimo en 90%. Esta investigación, se realizó con cal que contiene como máximo 15% de Ca (OH)₂, es por ello que los porcentajes usados superan el 8% siendo 21% el máximo utilizado.
- Según el MTC “Manual de carreteras de bajo volumen de tránsito” se recomienda que cuando las subrasantes presenten valores de CBR menores a 6% se proceda a eliminar el material y colocar como remplazo un material granular con CBR mayor a 10% y un índice de plasticidad menor a 10%. En esta investigación el CBR obtenido de la subrasante mejorada es de 5.9%, por lo que no se recomienda construir una estructura de pavimento sobre esta y se sugiere para futuras investigaciones trabajar con dosificaciones cercanas a lo especificado en la norma.

CAPÍTULO VIII: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Altamirano, G. y Díaz, A. (2015). Estabilización de suelos cohesivos por medio de Cal en las Vías de la comunidad de San Isidro del Pegón, municipio Potosí-Rivas. Universidad Nacional Autónoma De Nicaragua.
- Arenas, A. (2017). Análisis Comparativo De Los Métodos (AASHTO 93, Boussinesq, Ábacos De Colorado), Para El Cálculo Del Espesor De Mejoramiento De Subrasante En La Carretera Dv. Las Vegas-Tarma, Provincia De Tarma – Región Junín”. Universidad Nacional de San Martin.
- Chávez, D. y Odar, G. (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. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
- Gavilanes, E. (2015). Estabilización y Mejoramiento de Sub-Rasante Mediante Cal Y Cemento Para Una Obra Vial en el Sector de Santos Pamba Barrio Colinas del Sur. Universidad Internacional Del Ecuador.
- García, A. (2015). “Determinación de la Resistencia de la subrasante incorporando Cal estructural en el Suelo Limo Arcilloso del Sector 14 Mollepampa De Cajamarca, 2015”. Universidad Privada del Norte.
- Jara, R. (2014). Efecto de la Cal como Estabilizante de una Subrasante de Suelo Arcilloso. Universidad Nacional de Cajamarca.
- NTP 339.128 (1999) – Método de ensayo para el análisis granulométrico.
- NTP 339.141 (1999) – Método de ensayo para la compactación del suelo en laboratorio utilizando una energía modificada.
- NTP 339.145 (1999) – Método de ensayo de CBR (Relación de soporte de California) de suelos compactados en laboratorio.

- Manual de carreteras – especificaciones técnicas generales para la construcción – EG-2013.
- López, J. Y Ortiz, G. (2018). “Estabilización de suelos arcillosos con Cal para el tratamiento de la subrasante en las calles de la Urbanización San Luis de la Ciudad de Abancay”. Universidad Tecnológica de Los Andes.
- Palli, E. (2015). Guía básica para estabilización de Suelos con Cal en Caminos de Baja Intensidad Vehicular en la Provincia de San Román”. Universidad Nacional del Altiplano.
- Silva, J. (2019). Influencia De La Adición De La Mezcla Ceniza Volante De Cascarilla De Cebada Con Cal En Las Propiedades Físicas Y Mecánicas En El Suelo De Buenos Aires Distrito De Víctor Larco Herrera - Trujillo – La Libertad – 2018. Universidad Privada de Trujillo.