

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE
TOPOGRAFÍA Y VÍAS DE COMUNICACIÓN



**“EVALUACIÓN DE SALES EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS Y SU
EFECTO EN LA VEGETACIÓN CIRCUNDANTE”**

Por:

VELASQUEZ RODRIGUEZ EDWIN

Semestre II – 2022

TARIJA – BOLIVIA

DEDICATORIA

Dedico el presente proyecto a mis padres y hermanas por su comprensión y ayuda en todo momento. Me han enseñado a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi perseverancia y mi empeño, y todo ello con una gran dosis de amor y sin pedir nunca nada a cambio.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

| | Pág. |
|--|------|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1 Justificación | 2 |
| 1.2 Planteamiento del problema..... | 3 |
| 1.2.1 Situación problemática..... | 3 |
| 1.2.2 Problema | 4 |
| 1.3 Objetivos | 5 |
| 1.3.1 Objetivo general..... | 5 |
| 1.3.2 Objetivos específicos | 5 |
| 1.4 Hipótesis..... | 5 |
| 1.5 Definición de variable independiente y dependiente | 6 |
| 1.5.1 Variable independiente..... | 6 |
| 1.5.2 Variable dependiente..... | 6 |
| 1.6 Alcance del estudio | 6 |

CAPÍTULO II

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS PAVIMENTOS Y LA ESTABILIZACIÓN CON SALES

| | |
|-------------------------------|----|
| 2.1 Pavimentos | 9 |
| 2.2 Tipos de pavimentos | 10 |

| | |
|---|----|
| 2.2.1 Pavimentos asfálticos o flexibles | 10 |
| 2.2.1.1 Características de pavimento flexible | 11 |
| 2.2.1.2 Componentes de pavimento flexible | 12 |
| 2.2.2 Pavimentos de concreto o rígidos | 13 |
| 2.2.2.1 Características de pavimento rígido | 15 |
| 2.2.2.2 Componentes de pavimento rígido..... | 15 |
| 2.2.3 Pavimentos articulados | 17 |
| 2.2.3.1 Componentes de pavimento articulado | 19 |
| 2.3 Estabilización en pavimentos | 22 |
| 2.4 Tipos de estabilización | 25 |
| 2.4.1 Estabilización mecánica | 25 |
| 2.4.2 Estabilización física | 27 |
| 2.4.3 Estabilización química | 29 |
| 2.4.3.1 Con cemento | 29 |
| 2.4.3.2 Con asfalto | 30 |
| 2.4.3.3 Con sales | 31 |
| 2.5 Tipo de sales..... | 32 |
| 2.5.1 Cloruro de sodio (NaCl)..... | 32 |
| 2.5.2 Cloruro de calcio (CaCl ₂) | 35 |
| 2.5.3 Cloruro de potasio (KCl)..... | 36 |

| | |
|---|----|
| 2.6 Propiedades de los suelos a estabilizar..... | 38 |
| 2.6.1 Estabilidad volumétrica..... | 39 |
| 2.6.2 Resistencia | 39 |
| 2.6.3 Permeabilidad..... | 40 |
| 2.6.4 Compresibilidad | 40 |
| 2.6.5 Durabilidad..... | 41 |
| 2.7 Métodos de estabilización con sales | 41 |
| 2.7.1 Estabilización con cloruro de calcio (CaCl ₂) | 41 |
| 2.7.1.1 Aplicaciones del cloruro de calcio como estabilizador..... | 42 |
| 2.7.2 Estabilización con cloruro de sodio (NaCl) | 44 |
| 2.7.2.1 Aplicaciones del cloruro de sodio como estabilizador..... | 47 |
| 2.7.2.2 Comportamiento de suelos estabilizados con cloruro de sodio | 48 |
| 2.8 Efecto de las sales en la vegetación circundante..... | 49 |
| 2.8.1 Efectos de la salinidad en el suelo..... | 50 |
| 2.8.2 Efectos de la salinidad en las plantas | 51 |

CAPÍTULO III
APLICACIÓN PRÁCTICA

| | |
|--|----|
| 3.1 Ubicación | 52 |
| 3.2 Muestreo del suelo | 52 |
| 3.3 Vegetación circundante en el tramo en estudio..... | 54 |
| 3.4 Caracterización del material a estabilizar | 55 |

| | |
|--|----|
| 3.4.1 Análisis granulometría (ASTM D422, AASHTO T88)..... | 55 |
| 3.4.2 Límites de atterberg (ASTM D4318, AASHTO T89-T90) | 59 |
| 3.4.3 Contenido de humedad y clasificación | 63 |
| 3.4.4 Compactación proctor estándar o modificado (AASHTO T-180)..... | 64 |
| 3.4.5 CBR (Relación de soporte de California) | 67 |
| 3.4.6 Permeabilidad..... | 70 |
| 3.5 Sales empleadas en la estabilización de suelos | 72 |
| 3.5.1 Porcentajes de sales..... | 72 |
| 3.6 Estabilización de suelo con cloruro de sodio (NaCl) | 73 |
| 3.6.1 Compactación proctor estándar o modificado (AASHTO T-180)..... | 73 |
| 3.6.2 CBR (Relación de soporte de California) | 75 |
| 3.6.3 Permeabilidad..... | 78 |
| 3.7 Estabilización de suelo con cloruro de calcio (CaCl ₂) | 78 |
| 3.7.1 Compactación proctor estándar o modificado (AASHTO T-180)..... | 78 |
| 3.7.2 CBR (Relación de soporte de California) | 80 |
| 3.7.3 Permeabilidad..... | 82 |
| 3.8 Estabilización de suelo con cloruro de potasio (KCl)..... | 83 |
| 3.8.1 Compactación proctor estándar o modificado (AASHTO T-180)..... | 83 |
| 3.8.2 CBR (Relación de soporte de California) | 85 |
| 3.8.3 Permeabilidad..... | 87 |
| 3.9 Análisis de regresión del CBR con adición de las sales..... | 87 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 3.9.1 | Análisis de regresión %CBR con cloruro de sodio (NaCl)..... | 87 |
| 3.9.2 | Análisis de regresión %CBR con cloruro de calcio (CaCl ₂)..... | 88 |
| 3.9.3 | Análisis de regresión %CBR con cloruro de calcio (KCl)..... | 89 |
| 3.10 | Ensayos de control | 90 |
| 3.10.1 | Límites de atterberg (ASTM D4318, AASHTO T89-T90) | 90 |
| 3.10.2 | Clasificación de suelo AASHTO y SUCS | 92 |
| 3.11 | Perdida de agentes estabilizadores por efecto de precipitaciones..... | 92 |
| 3.11.1 | Ensayos de control de pH en suelos de cultivos aledaño | 93 |
| 3.12 | Resumen de resultados..... | 95 |
| 3.13 | Análisis de resultados..... | 100 |
| 3.13.1 | Análisis de resultados de las propiedades de los suelos a estabilizar | 100 |
| 3.13.2 | Análisis de resultados de propiedades de los suelos con la adición de sales | 102 |
| 3.13.3 | Análisis de los resultados de CBR estabilizados con sales | 103 |
| 3.13.4 | Análisis de resultados regresión del %CBR - %sales | 104 |
| 3.13.5 | Análisis de los resultados de ensayos de control | 104 |
| 3.13.6 | Análisis de los resultados de permeabilidad | 105 |
| 3.13.7 | Análisis de resultados de efectos de las sales en la vegetación circundante..... | 105 |

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

| | | |
|-----|----------------------|-----|
| 4.1 | Conclusiones | 106 |
| 4.2 | Recomendaciones..... | 108 |

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

Anexo 1. Caracterización de suelos a estabilizar

Anexo 2. Caracterización de suelos con cloruro de sodio

Anexo 3. Caracterización de suelos con cloruro de calcio

Anexo 4. Caracterización de suelos con cloruro de potasio

Anexo 5. CBR (Relación de carga Californiana) con cloruro de sodio

Anexo 6. CBR (Relación de carga Californiana) con cloruro de calcio

Anexo 7. CBR (Relación de carga Californiana) con cloruro de potasio

Anexo 8. Permeabilidad

Anexo 9. Ensayo de pH

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|------|
| Figura 2.1: Pavimento flexible..... | 10 |
| Figura 2.2: Carpeta asfáltica | 11 |
| Figura 2.3: Sección transversal de pavimento flexible | 12 |
| Figura 2.4: Pavimento rígido | 14 |
| Figura 2.5: Losa de concreto..... | 14 |
| Figura 2.6: Sección transversal de pavimento rígido | 15 |
| Figura 2.7: Pavimento articulados..... | 17 |
| Figura 2.8: Capa de rodadura de adoquines de concreto | 19 |
| Figura 2.9: Sección transversal pavimento articulados..... | 20 |
| Figura 2.10: Estabilización mecánica | 26 |
| Figura 2.11: Distribución de cantidad de cemento..... | 30 |
| Figura 2.12: Estabilización química con cemento | 30 |
| Figura 2.13: Estabilización química con asfalto | 31 |
| Figura 2.14: Estabilización química con sales | 32 |
| Figura 2.15: Cloruro de sodio (sal común) | 33 |
| Figura 2.16: Cloruro de calcio | 35 |
| Figura 2.17: Cloruro de potasio | 37 |
| Figura 2.18: Evaporación producida en un suelo al extender cal | 43 |
| Figura 2.19: Salinidad en vegetación..... | 49 |
| Figura 3.1: Ubicación del tramo en estudio | 52 |
| Figura 3.2: Puntos de extracción..... | 53 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.3: Extracción del suelo..... | 53 |
| Figura 3.4: Método de lavado | 56 |
| Figura 3.5: Límites de atterberg..... | 62 |
| Figura 3.6: Proceso de compactación | 65 |
| Figura 3.7: Proceso de ensayo CBR..... | 68 |
| Figura 3.8: Ensayo de permeabilidad..... | 71 |
| Figura 3.9: Presentación de sales | 72 |
| Figura 3.10: Adición de sal para compactación | 73 |
| Figura 3.11: Adición de sal para CBR | 75 |
| Figura 3.12: Adición de sal para permeabilidad | 78 |
| Figura 3.13: Límites de atterberg con sales | 91 |
| Figura 3.14: Comprobación de pérdida de agentes estabilizadores | 93 |
| Figura 3.15: Extracción de suelo para pH..... | 94 |

ÍNDICE DE TABLA

| | Pág. |
|--|------|
| Tabla 3.1 Distribución de partículas | 55 |
| Tabla 3.2 Resultados de granulometría P1-P3 | 56 |
| Tabla 3.3 Resultados de granulometría P4-P6 | 57 |
| Tabla 3.4 Resultados de granulometría P7-P10 | 57 |
| Tabla 3.5 Resultados de límites de atterberg P1 – P3 | 62 |
| Tabla 3.6 Resultados de límites de atterberg P4 – P6 | 62 |
| Tabla 3.7 Resultados de límites de atterberg P7 – P10 | 63 |
| Tabla 3.8 Resultados de contenido de humedad P1 – P3 | 63 |
| Tabla 3.9 Resultados de contenido de humedad P4 – P6 | 63 |
| Tabla 3.10 Resultados de contenido de humedad P7 – P10 | 63 |
| Tabla 3.11 Clasificación de los suelos según AASHTO Y SUCS P1 – P3 | 64 |
| Tabla 3.12 Clasificación de los suelos según AASHTO Y SUCS P4 – P6 | 64 |
| Tabla 3.13 Clasificación de los suelos según AASHTO Y SUCS P7 – P10 | 64 |
| Tabla 3.14 Resultados de compactación P1 – P3 | 66 |
| Tabla 3.15 Resultados del ensayo de CBR P1 – P3 | 68 |
| Tabla 3.16 Resultados del ensayo permeabilidad | 71 |
| Tabla 3.17 Resultados de compactación con cloruro de sodio (NaCl) | 74 |
| Tabla 3.18 Resultados del ensayo de CBR con cloruro de sodio (NaCl) | 76 |
| Tabla 3.19 Resultados del ensayo permeabilidad con cloruro de sodio (NaCl) | 78 |
| Tabla 3.20 Resultados de compactación con cloruro de calcio (CaCl ₂) | 79 |
| Tabla 3.21 Resultados del ensayo de CBR con cloruro de calcio (CaCl ₂) | 80 |

| | |
|--|----|
| Tabla 3.22 Resultados del ensayo permeabilidad con cloruro de calcio (CaCl ₂)..... | 82 |
| Tabla 3.23 Resultados de compactación con cloruro de potasio (KCl) | 83 |
| Tabla 3.24 Resultados del ensayo de CBR con cloruro de potasio (KCl) | 85 |
| Tabla 3.25 Resultados del ensayo permeabilidad con cloruro de potasio (KCl) | 87 |
| Tabla 3.26 Resultados de variación del CBR con cloruro de sodio NaCl | 87 |
| Tabla 3.27 Resultados de regresión del CBR con cloruro de sodio NaCl | 88 |
| Tabla 3.28 Resultados de variación del CBR con cloruro de calcio CaCl ₂ | 88 |
| Tabla 3.29 Resultados de regresión del CBR con cloruro de calcio CaCl ₂ | 89 |
| Tabla 3.30 Resultados de variación del CBR con cloruro de potasio KCl | 89 |
| Tabla 3.31 Resultados de regresión del CBR con cloruro de potasio KCl | 90 |
| Tabla 3.32 Resultados del ensayo de límites de atterberg con sales | 91 |
| Tabla 3.33 Resultados de clasificación AASHTO y SUCS con sales | 92 |
| Tabla 3.34 Resultados del ensayo de pH | 94 |
| Tabla 3.35 Resultados de los ensayos de caracterización de suelos a estabilizar | 95 |
| Tabla 3.36 Resultados de los ensayos de caracterización de suelos en estudio | 95 |
| Tabla 3.37 Resultados de los ensayos de límites de atterberg con adición de cloruro de sodio (NaCl)..... | 96 |
| Tabla 3.38 Resultados de los ensayos de límites de atterberg con adición de cloruro de potasio (KCl) | 96 |
| Tabla 3.39 Resultados de los ensayos de límites de atterberg con adición de cloruro de calcio (CaCl ₂)..... | 96 |
| Tabla 3.40 Resultados de clasificación de suelos con adición de sales | 96 |
| Tabla 3.41 Resultados de los ensayos de compactación con adición de cloruro | |

| | |
|--|-----|
| de sodio (NaCl) | 97 |
| Tabla 3.42 Resultados de los ensayos de compactación con adición de cloruro de calcio (CaCl ₂) | 97 |
| Tabla 3.43 Resultados de los ensayos de compactación con adición de cloruro de potasio (KCl) | 97 |
| Tabla 3.44 Resultados de los ensayos de CBR con adición de cloruro de sodio (NaCl)..... | 97 |
| Tabla 3.45 Resultados de los ensayos de CBR con adición de cloruro de calcio (CaCl ₂)..... | 98 |
| Tabla 3.46 Resultados de los ensayos de CBR con adición de cloruro de potasio (KCl) | 98 |
| Tabla 3.47 Resultados de los ensayos de permeabilidad con adición de las sales..... | 98 |
| Tabla 3.48 Resultados de los ensayos de pH | 98 |
| Tabla 3.49 Resumen de la estabilización de suelos con sales..... | 99 |
| Tabla 3.50 Resumen del efecto de sales a los límites de atterberg | 99 |
| Tabla 3.51 Resultados de regresión del CBR con cloruro de sodio (NaCl)..... | 100 |
| Tabla 3.52 Resultados de regresión del CBR con cloruro de calcio (CaCl ₂)..... | 100 |
| Tabla 3.53 Resultados de regresión del CBR con cloruro de potasio (KCl)..... | 100 |

ÍNDICE DE GRÁFICAS

| | Pág. |
|---|------|
| Gráfica 3.1 Granulometría del suelo a estabilizar P1-P3 | 58 |
| Gráfica 3.2 Granulometría del suelo a estabilizar P4-P6 | 58 |
| Gráfica 3.3 Granulometría del suelo a estabilizar P7-P10 | 59 |
| Gráfica 3.4 Curva de compactación punto N°1 | 66 |
| Gráfica 3.5 Curva de compactación punto N°2 | 66 |
| Gráfica 3.6 Curva de compactación punto N°3 | 67 |
| Gráfica 3.7 Curva tensión – penetración punto N°1 | 69 |
| Gráfica 3.8 Curva tensión – penetración punto N°2 | 69 |
| Gráfica 3.9 Curva tensión – penetración punto N°3 | 70 |
| Gráfica 3.10 Curva de compactación con 3% cloruro de sodio (NaCl)..... | 74 |
| Gráfica 3.11 Curva de compactación con 4% cloruro de sodio (NaCl)..... | 74 |
| Gráfica 3.12 Curva de compactación con 5% cloruro de sodio (NaCl)..... | 75 |
| Gráfica 3.13 Curva tensión – penetración 3% de sodio (NaCl)..... | 76 |
| Gráfica 3.14 Curva tensión – penetración 4% de sodio (NaCl)..... | 77 |
| Gráfica 3.15 Curva tensión – penetración 5% de sodio (NaCl)..... | 77 |
| Gráfica 3.16 Curva de compactación con 3% cloruro de calcio (CaCl ₂)..... | 79 |
| Gráfica 3.17 Curva de compactación con 4% cloruro de calcio (CaCl ₂)..... | 79 |
| Gráfica 3.18 Curva de compactación con 5% cloruro de calcio (CaCl ₂)..... | 80 |
| Gráfica 3.19 Curva tensión – penetración 3% de calcio (CaCl ₂)..... | 81 |
| Gráfica 3.20 Curva tensión – penetración 4% de calcio (CaCl ₂)..... | 81 |
| Gráfica 3.21 Curva tensión – penetración 5% de calcio (CaCl ₂)..... | 82 |

| | |
|--|----|
| Gráfica 3.22 Curva de compactación con 3% cloruro de potasio (KCl)..... | 83 |
| Gráfica 3.23 Curva de compactación con 4% cloruro de potasio (KCl)..... | 84 |
| Gráfica 3.24 Curva de compactación con 5% cloruro de potasio (KCl)..... | 84 |
| Gráfica 3.25 Curva tensión – penetración 3% de potasio (KCl)..... | 85 |
| Gráfica 3.26 Curva tensión – penetración 4% de potasio (KCl)..... | 86 |
| Gráfica 3.27 Curva tensión – penetración 5% de potasio (KCl)..... | 86 |
| Gráfica 3.28 Curva CBR 100% - porcentaje de cloruro de sodio (NaCl)..... | 88 |
| Gráfica 3.29 Curva CBR 100% - porcentaje de cloruro de calcio (CaCl ₂) | 89 |
| Gráfica 3.30 Curva CBR 100% - porcentaje de cloruro de potasio (KCl)..... | 90 |