

REHABILITACIÓN DE SUELOS DE UNA ZONA DE ALTO RIESGO - BAJO LLOJETA - MEDIANTE LA APLICACIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO HIDRATADO

REHABILITATION OF SOILS IN A HIGH-RISK AREA - UNDER RAINFALL - BY APPLICATION OF HYDRATED ALUMINUM SULFATE

Ing. Valeria Jazmín Gómez Alcoreza ^{1 * §} ; Ing. Ronald Enrique Barrientos Porcel † ²

Recibido: Mayo 2, 2022; Aceptado: Julio 22, 2022

RESUMEN

La ciudad de La Paz se caracteriza por su variedad tanto geológica como geotécnica, lo que la permite clasificar al interior diferentes zonas según su grado de riesgo. Bajo Llojeta, se identifica dentro las zonas más inestables de la ciudad, la cual está compuesta por 9 barrios, de los cuales aproximadamente el 73.5 % son catalogados como zonas de alto riesgo, donde se han registrado deslizamientos y asentamientos a lo largo de los últimos años.

Sin embargo, en el año 2015, se ha estudiado las características de su suelo, determinando la existencia de arcillas dispersivas, las mismas que tienden a erosionarse en presencia de agua, debido a su propiedad electroquímica; formando cárcavas, canales, entre otros. Claramente este tipo de suelos, serían considerados como uno de los tantos factores que Bajo Llojeta presenta para ser considerada como una zona de Alto Riesgo, y a pesar de ser catalogada como tal, más del 50% de la zona se encuentra poblada, debido al desmedido crecimiento espacial, aumentando la vulnerabilidad de este lugar.

El barrio “Los Andes” de la zona de Bajo Llojeta, es un sector que actualmente se encuentra en proceso de poblamiento, donde se prevé urbanizaciones. Este barrio se localiza dentro las áreas donde se determinaron un cierto grado de dispersión en el suelo y además pertenece al 73.5% de la zona alto riesgo.

Si bien, este sector se urbanizará debido al crecimiento poblacional de la zona de Bajo Llojeta, existe la problemática de la inestabilidad dada por la dispersión de los suelos, siendo esta una limitante, imposibilitando en un cierto grado a futuros asentamientos urbanos.

Por tal motivo, se presenta una posible solución, con la rehabilitación de este tipo de suelos presentes en el sector nombrado, mediante la aplicación de Sulfato de Aluminio Hidratado, para ello, se procedió a realizar el estudio de suelos con la finalidad de obtener como producto un Mapa de Zonificación de suelos dispersivos del área de estudio, este mapa indica los grados de dispersión existentes, los cuales requirieron un porcentaje de aditivo para lograr la estabilización, lo que se traduce como la erradicación del fenómeno de la dispersión en estos suelos.

Analizándose y evaluándose además los efectos de la estabilización de los suelos con el Sulfato de Aluminio Hidratado, controlando en las mezclas de los suelos los Límites de Atterberg, reduciendo plasticidad e incrementando la cohesión y su capacidad de soporte, determinando resultados favorables de acuerdo a la variación de cantidades en el aditivo utilizado.

Palabras claves: Arcillas, dispersión, rehabilitación, inestabilidad, ionización, Sulfato de Aluminio hidratado.

ABSTRACT

The city of La Paz is characterized by both its geological and geotechnical variety, which allows it to classify different areas inland according to their degree of risk. Bajo Llojeta, the most unstable areas of the city are identified, which is made up of nine neighborhoods, of which approximately 73.5% are classified as high-risk areas, where landslides and settlements have been registered over the last years.

However, in 2015, the characteristics of its soil have been studied, determining the existence of dispersive clays, which tend to erode in the presence of water, due to their electrochemical property; forming gullies, channels, among others. Clearly, this type of soils would be considered one of the many factors that Bajo Llojeta presents to be considered a High Risk area, and despite being classified as such, more than 50% of the area is populated, due to the excessive spatial growth, increased the vulnerability of this place.

The “Los Andes” neighborhood in the Bajo Llojeta area is a sector that is currently in the process of being populated, where developments are expected. This neighborhood is located within the areas where a certain degree of dispersion in the soil was determined, and belongs to 73.5% of the high-risk area.

Although this sector will be urbanized due to the population growth of the Bajo Llojeta area, there is the problem of instability caused by the dispersion of the soils, this being a limitation, making it impossible to a certain degree for future urban settlements.

In order that reason, we present a possible solution with the rehabilitation of this type of soils present in the named sector, through the application of Hydrated Aluminum Sulfate. For this, the soil study was carried out with the purpose of Obtain as a product a Zoning Map of dispersive soils of the study area, this map indicates the existing degrees of dispersion, which required a percentage of additive to achieve stabilization, which translates as the eradication of the dispersion phenomenon in these soils.

Also analyzing and evaluating the effects of the stabilization of the soils with Hydrated Aluminum Sulfate, controlling the Atterberg Limits in the soil mixtures, reducing plasticity and increasing cohesion and its bearing capacity, determining favorable results according to the variation of quantities in the additive used.

Keywords: Clays, dispersion, rehabilitation, instability, ionization, Hydrated Aluminum Sulfate, Hydrated Aluminum Sulfate.

Citación: Gómez Alcoreza Valeria J., Barrientos Porcel Ronald E. **REHABILITACIÓN DE SUELOS DE UNA ZONA DE ALTO RIESGO - BAJO LLOJETA - MEDIANTE LA APLICACIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO HIDRATADO.** Revista Científica EMINENTE 2022, 6-1: 11-22.

¹ Ingeniera Civil – Carrera de Ingeniería Civil, Unidad Académica La Paz - Escuela Militar de Ingeniería – Docente Ingeniería Civil

* Corresponde al Autor (correo electrónico: valejaz97@gmail.com)

⁵ Dirección de contacto Investigador primer autor: Zona Alto Sopocachi C/Carlos Romero N°2161 - Telf.: (+591) 73256889 – La Paz – Bolivia.

² Ingeniero Geólogo Especialista en Geotecnia – Universidad Mayor de San Andrés, Docente de Geología y Laboratorio de Hormigones y Mecánica de Suelos - Unidad Académica La Paz - Escuela Militar de Ingeniería

INTRODUCCIÓN

El suelo, es una parte fundamental para toda obra civil y debe ser estudiado con la importancia correspondiente, ya que en este se construyen grandes invenciones ingenieriles hechas por el hombre. Esta tarea es de mayor cuidado cuando se estudian zonas de alto riesgo, que según la Memoria explicativa de la elaboración del Mapa de Riesgos, de los distritos urbanos del Municipio de La Paz, se entiende como zonas de Alto Riesgo, aquellas áreas donde los daños son elevados, donde se presenta relieve abrupto afectado por erosión superficial e interna, inestabilidad en varios sectores por: erosión de pie, presencia de arcillas plásticas y saturadas, presencia de arenas saturadas y sin cohesión, presencia de aguas subterráneas, grietas, pérdida de las propiedades físico mecánicas de los suelos, entre otros.

En este nivel de riesgo se encuentra el 21 % del área ocupada por la mancha urbana de la ciudad de La Paz, resumiendo a una característica que ha sido bastante relevante en los últimos años en nuestra ciudad, y es la inestabilidad de suelos.

En el año 2016, el geógrafo Javier Núñez Villalba desarrolló el estudio titulado "MONITOREO ESPACIAL DE DESASTRES CON IMÁGENES DE SATÉLITE" en el territorio urbano paceño, señalando la modificación del paisaje por los desastres, comprobándolo mediante fotografías aéreas e imágenes de satélite. Núñez, seleccionó las 3 zonas con mayor número de recurrencia de desastres para investigar la inestabilidad de los lugares de daños. Las tres zonas con mayor recurrencia según los datos clasificados fueron: Bajo Llojeta, Cotahuma y Río Seco.

Es así, que Bajo Llojeta, encontrándose al oeste de la ciudad de La Paz, es catalogada como una zona de alto riesgo, dado que el 73.5% de su área pertenece a este grado de riesgo, además de ser caracterizada por su recurrencia de diversos desastres. A la inestabilidad de los suelos de esta zona, se la puede atribuir a muchos factores, sin embargo, en esta ocasión se le atribuye a la presencia de suelos arcillosos dispersivos.

La ingeniera Laura Salcedo, con su estudio DETERMINACIÓN DE LA EXISTENCIA DE SUELOS DISPERSIVOS EN LA MACROZONA DE LLOJETA (2015) comprobó mediante ensayos de laboratorio, que en la macrozona, existían distintos porcentajes de suelos arcillosos dispersivos.

El término "arcilla dispersiva" se refiere a una arcilla con una composición fisicoquímica que puede causar que las partículas de arcilla se defloquen y se rechacen entre sí, en la presencia de agua. Las arcillas que se encuentran en este estado son altamente susceptibles a erosión o tubificación bajo el flujo de agua. (Gábor NAGY, Dr. László NAGY, 2015)

Por lo tanto, no son suelos recomendables para realizar obras de construcción, ya que este tipo de suelos provoca hundimientos, asentamientos, debido a la erosión, afectando a cimentaciones o a suelos destinados a la construcción de caminos.

Actualmente, Bajo Llojeta está conformada por 9 barrios, de los cuales, el barrio "Los Andes", está siendo previsto para satisfacer el desmedido crecimiento poblacional de la urbe paceña; sin embargo, Los Andes, destaca dentro de Bajo Llojeta, por ser un sector en estado crítico, debido a que se encuentra dentro de un grado de riesgo Alto y en el mismo se determinaron la presencia de suelos dispersivos, limitando la posibilidad de urbanización e inhabilitando este sector.

Las obras viales dentro una zona o un barrio, buscan mejorar el espacio público, ayudando a aumentar el suelo urbanizable, conectando comunidades, además de agregar valor a las propiedades adyacentes. Sin estas obras, un barrio se ve limitado en su proceso de poblamiento y más aún, cuando el mismo presenta características desfavorables en sus suelos, como es la dispersión.

Analizando el tipo de suelos existentes se buscó el tipo de solución a dar. Siendo así, la propuesta de solución para tratar suelos dispersivos, es la aplicación de sulfato de aluminio hidratado, desde un punto de vista electroquímico del suelo, destinando esta investigación al mejoramiento de sub rasantes, para lograr la recuperación de los mismos y rehabilitar el sector a la urbanización.

Fig. 1. Erosión en suelos área de estudio en Bajo Llojeta



Fuente: Elaboración propia.

OBJETIVO GENERAL

Rehabilitar los suelos dispersivos presentes en el barrio Los Andes, para dar paso a la urbanización del sector, mediante la aplicación de sulfato de aluminio.

METODOLOGÍA

Metodología

La metodología, para mejor entendimiento se dividió en cuatro fases. La primera fase consistió en el estudio del área de trabajo que es el barrio Los Andes, la clasificación de suelos, mediante ensayos, tanto de campo como de laboratorio, determinando el tipo de suelo predominante en el área y sus características, esta información permitió la agrupación de muestras que presentaban propiedades y características similares, dicha agrupación dio paso a la siguiente fase.

La segunda fase, procede con la determinación de suelos dispersivos en el área de estudio. Los ensayos pertenecientes a esta fase, clasificaron las muestras en grados de dispersión, que analizando con otras características se la zona, se obtuvo como producto final de la fase, el Mapa de Zonificación de suelos dispersivos, en el área no poblada de la Zona de Alto riesgo de Bajo Llojeta.

La tercera fase, siendo la más importante, consistió en realizar la estabilización con el Sulfato de Aluminio Hidratado de acuerdo a los grados de dispersión presentes en el área de estudio. Los porcentajes utilizados para la estabilización fueron de 5, 10 y 20%, analizando con cuál de estos porcentajes de Sulfato de Aluminio hidratado se lograba la correcta estabilización en cada grado de dispersión, una vez concluida esta fase, se procedió a la siguiente y última fase.

En la cuarta fase se analizó las características mecánicas del suelo de las calles y avenidas del área, es decir que se estudió el efecto de la estabilización del Sulfato de Aluminio Hidratado sobre la capacidad de soporte (CBR) del suelo del área de estudio, además se corroboró el efecto de la estabilización en el índice de plasticidad, que es una propiedad importante en los suelos dispersivos.

Materiales

- Muestras de suelos del sector en estudio, obtenidas mediante el ensayo de campo de

muestra, se requirieron de 15 pozos los cuales tuvieron una profundidad de 1.5m.

- Sulfato de Aluminio hidratado.

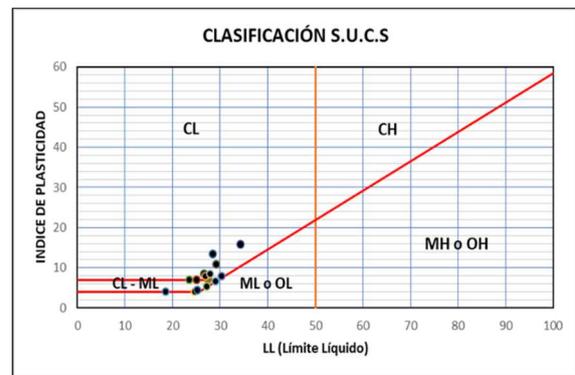
Desarrollo

1. Clasificación de suelos

Para poder clasificar el tipo de suelo presente en el sector de estudio obtenido de 15 pozos, se realizaron los ensayos de:

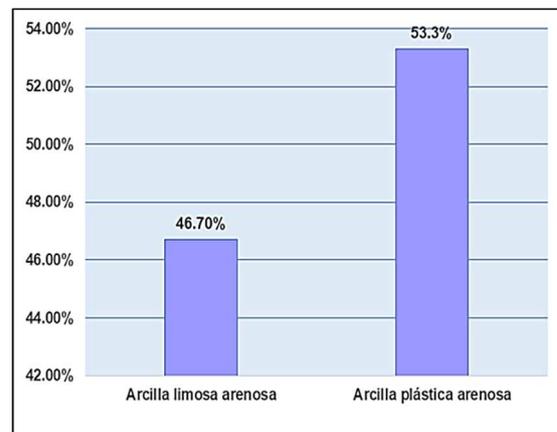
- **Granulometría (AASHTO T – 27):** Donde se obtuvieron suelos finos, ya que 10 de 15 pozos, en el tamiz N° 200 los porcentajes sobrepasaban el 50%.
- **Límites de Atterberg:** Realizando los Límites líquido (AASHTO T – 89), plástico (AASHTO T – 90) y la diferencia de estos valores, el Índice de plasticidad.
- **Clasificación S. U. C. S.:** Con los datos del ensayo anterior, aplicando la carta de plasticidad se obtuvo la siguiente gráfica donde se puede apreciar los 15 pozos:

Fig. 1. Clasificación S.U.C.S.



Fuente: Elaboración propia.

Fig. 2. Porcentajes de tipo de arcillas analizadas



Fuente: Elaboración propia.

El anterior gráfico, muestra los resultados de la clasificación de suelos, obteniendo un 46.70% de arcillas CL – ML y un 53.3% de arcilla CL.

De acuerdo a los resultados de índice de plasticidad y límites de Atterberg, se agruparon las muestras de suelo, para que en la segunda fase se obtuvieran 5 muestras representativas, las cuales serían ensayadas para la determinación de los suelos dispersivos.

2. Ensayos de determinación de suelos dispersivos

2.1. Ensayo Crumb test

Este ensayo consiste en preparar un espécimen de suelo en forma de cubo, de unos 15mm de arista, secado al aire y temperatura ambiente. Se sumerge en un recipiente con agua destilada. Pasados 5 a 10 minutos, se observa la tendencia de las partículas de arcilla a formar una suspensión coloidal, enturbiando el agua. La dispersividad de la muestra se valora según la siguiente guía:

- Grado 1: No Dispersivo. La muestra se desmorona y esparce en el fondo del recipiente sin enturbiar el agua. Sin reacción.
- Grado 2: Dispersivo intermedio. Débil turbulencia en el agua. Reacción ligera.
- Grado 3: Dispersivo. Turbulencia coloidal en suspensión. Reacción moderada.
- Grado 4: Altamente dispersivo. Reacción fuerte.

Fig. 3. Crumb - muestras Bajo Llojeta



Fuente: Elaboración propia.

Aplicando la metodología del ensayo según la norma ASTM, se obtuvieron los siguientes resultados:

Pozo	Grado de Dispersión			Descripción
	10 min	1 hora	12 horas	
4	1	3	4	Suelo dispersivo
6	2	3	4	Suelo dispersivo
8	1	3	3	Suelo dispersivo intermedio
10	1	1	2	Suelo No dispersivo
12	1	2	2	Suelo No dispersivo

Fuente: Elaboración propia

2.2. Ensayo Pinhole test

Consiste en hacer pasar agua destilada a través de un orificio de 1mm de diámetro, abierto a lo largo de una muestra cilíndrica, de 25,4mm de longitud. El agua se hace pasar con cuatro cargas hidráulicas diferentes: 50mm, 180mm, 380mm y 1020mm, comenzando por la menor, y sostenidas durante un intervalo de tiempo.

Los resultados del ensayo dependerán de la turbidez del agua, la velocidad del flujo y el tamaño final del orificio de la muestra, al finalizar el ensayo.

Clasificación de suelos dispersivos para Ensayo Pinhole

Clasificación de resultados	Clasificación de suelo
D1 y D2	Suelos dispersivos: fallan rápidamente bajo una carga de 50mm
ND4 y ND3	Suelos Intermedios: se erosionan lentamente bajo una carga de 50mm
ND2 y ND1	Suelos no dispersivos: erosión no coloidal bajo cargas de 380 mm y 1020mm

Fig. 4. Pinhole - muestras Bajo Llojeta



Fuente: Elaboración propia.

Porcentaje de dispersión (%)	Grado de dispersión
< 30	No dispersivo
30 a 50	Intermedio
> 50	Dispersivo

Aplicando la metodología del ensayo se obtuvieron los siguientes resultados:

Pozo	Clasificación	
	Símbolo	Descripción
4	D2	Suelo dispersivo
6	ND4	Suelo dispersivo Intermedio
8	D1	Suelo dispersivo
10	ND2	Suelo No dispersivo
12	ND2	Suelo No dispersivo

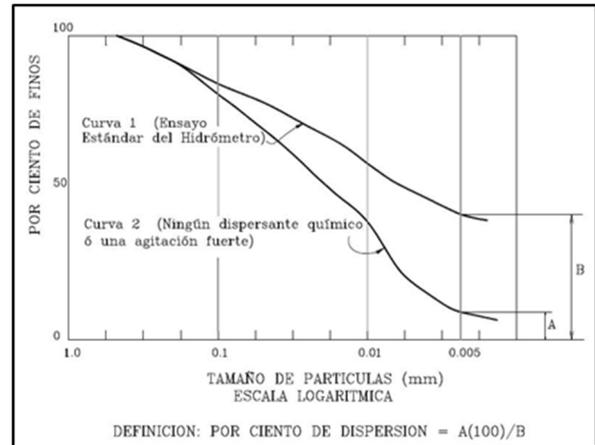
Fuente: Elaboración propia.

2.3. Ensayo de Doble hidrometría

Consiste en determinar los tamaños de las partículas del suelo, mediante el Ensayo Normado de Hidrómetro y un segundo ensayo de hidrómetro a una muestra idéntica, pero sin agitación mecánica ni dispersante químico. A partir de los resultados, con

ayuda de las curvas granulométricas de ambos hidrómetros, se calcula el “porcentaje de dispersión” obteniendo de ambas curvas los porcentajes de partículas de 0,005mm de diámetro (A y B) ambos resultados obtendrán el porcentaje de dispersión.

Clasificación de suelos dispersivos para Ensayo Doble Hidrometría



Fuente: Identificación y Estabilización de Suelos Dispersivos: Estado del Arte, González Y., 2008.

Aplicando la metodología del ensayo se obtuvieron los siguientes resultados:

Pozo	Clasificación	
	Porcentaje	Descripción
4	71.3	Dispersivo
6	48.9	Dispersivo Intermedio
8	88.5	Dispersivo
10	23.7	No Dispersivo
12	47.5	Dispersivo Intermedio

Fuente: Elaboración propia.

3. Zonificación de los suelos dispersivos en la zona de Alto Riesgo de Bajo Llojeta – Área no poblada

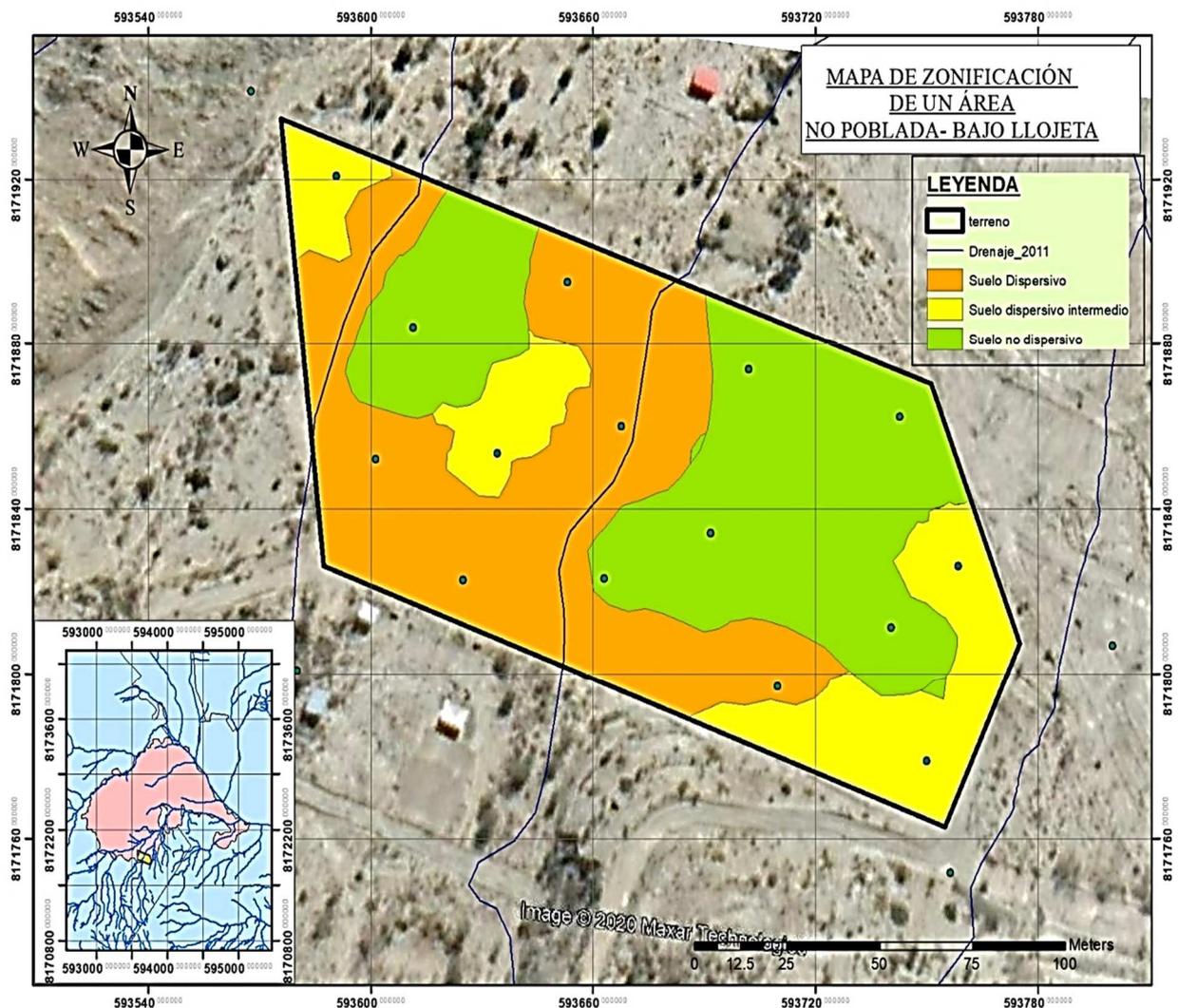
Para el siguiente análisis, se recopiló los resultados de cada ensayo de determinación de dispersión de suelos, para obtener un producto final, observando la propiedad de la dispersión y resaltando el grado predominante para grupo de muestras.

Pozo	Resultado final
4	Dispersivo
6	Dispersivo Intermedio
8	Dispersivo
10	No dispersivo
12	No dispersivo

Fuente: Elaboración propia.

Con los resultados finales anteriores, se procedió a realizar el mapa de zonificación del sector estudiado (barrio Los Andes) tomando en cuenta también las corrientes de agua subterráneas que pasan por el sector, identificando los mismos como áreas críticas, que el peor de los casos podría presentar suelos dispersivos.

Fig. 5. Zonificación de suelos dispersivos según ensayos - Zona de estudio Bajo Llojeta



Fuente: Elaboración propia.

4. Estabilización con sulfato de aluminio de acuerdo a la zonificación del área no poblada

Gracias al Mapa de Zonificación de área de estudio, se tiene en conocimiento la situación del terreno respecto a la dispersión de los suelos, habiendo clasificado en dos grados de dispersión: Suelos dispersivos y Suelos dispersivos intermedios.

Aplicando el ensayo de compactación Proctor modificado (AASHTO T – 180), se obtuvo para los suelos dispersivos una densidad seca de 1.865 g/cm³ y humedad óptima de 10%, y para los suelos dispersivos intermedios una densidad seca de 1.78 g/cm³ y humedad óptima de 10.7%.

Estos datos ayudan a la obtención de las cantidades requeridas de agua y de sulfato de aluminio hidratado.

Para suelos dispersivos al 5%:

Se requirió una porción de suelo de 500 gr, para luego multiplicar a este valor por su correspondiente porcentaje de humedad, de los suelos dispersivos:

$$\text{Cantidad de agua requerida} = 500\text{gr} * 10\% = 50 \text{ ml}$$

Los 50 ml de agua, se multiplicaron por el porcentaje de aditivo a usar, en este caso 5% de Sulfato de Aluminio Hidratado, a su vez, se multiplicó por el peso específico del aditivo químico (2.67 gr / cm³):

$$\text{Cantidad de Aditivo} = 50 \text{ ml} * 5\% * 2.67 \text{ gr/ml} = 6.68 \text{ gr}$$

Por lo tanto para 500 gr de muestra se requirió una solución de 50 ml de agua con 6.7 gr de Sulfato de Aluminio Hidratado, es decir una solución al 5%.

De esta forma se prepararon las demás soluciones con los porcentajes respectivos de 10% y 20%

Con los componentes necesarios, se preparó la muestra con las soluciones y se dejó reposar durante 3 días, el tiempo requerido para proceder a la curación, es decir el intercambio iónico del Sodio por el Aluminio, dando paso a la estabilización de los suelos dispersivos.

Pasados los tres días de curación, se realizó la verificación de la estabilización, mediante los ensayos de determinación de suelos dispersivos, que en teoría estos deben señalar a las muestras estabilizadas dentro su clasificación como suelos no dispersivos, asegurando que se cumplió el objetivo marcado.

De esta forma, se determinó los porcentajes del Sulfato de Aluminio Hidratado que lograron

estabilizar los dos tipos de suelos, presentes en el área de estudio.

RESULTADOS

Una vez realizada la estabilización con el sulfato de aluminio hidratado, se procedió a la verificación con los ensayos de determinación, donde los resultados deben indicar respecto al porcentaje que no son suelos dispersivos.

Para ensayo doble hidrometría y Pinhole test:

Estabilización de Suelos Dispersivos	
Porcentaje Aditivo	Grado de Dispersión
5%	Dispersivo
10%	No Dispersivo
20%	No Dispersivo
Estabilización de Suelos Dispersivos Intermedios	
Porcentaje Aditivo	Grado de Dispersión
5%	No Dispersivo
10%	No Dispersivo
20%	No Dispersivo

Fuente: Elaboración propia.

Donde se puede observar, la estabilización según estos ensayos, para los suelos dispersivos se da con una solución de sulfato de aluminio hidratado al 10% de concentración y para los suelos dispersivos intermedios, se requiere una solución de sulfato de aluminio hidratado al 5%.

Para ensayo de Crumb test:

Recopilando los resultados se obtuvo, indican, que para las soluciones de sulfato de aluminio hidratado requiere, 20% de concentración para estabilizar suelos dispersivos y 10% para suelos dispersivos intermedios.

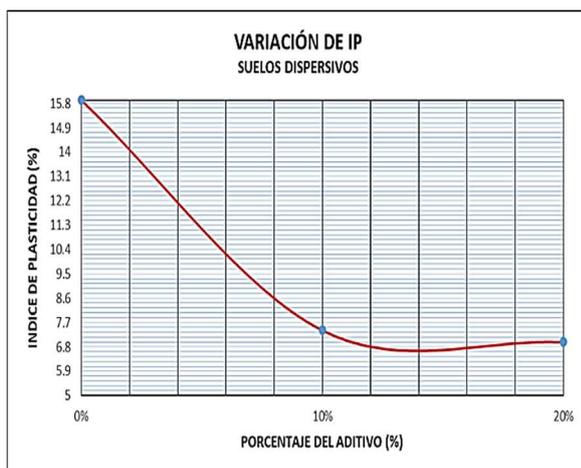
Estabilización de Suelos Dispersivos	
Porcentaje Aditivo	Grado de Dispersión
5%	Dispersivo
10%	Dispersivo
20%	No Dispersivo
Estabilización de Suelos Dispersivos Intermedios	
Porcentaje Aditivo	Grado de Dispersión
5%	Dispersivo
10%	No Dispersivo
20%	No Dispersivo

Fuente: Elaboración propia.

1. Resultados de variación de CBR e índice de plasticidad

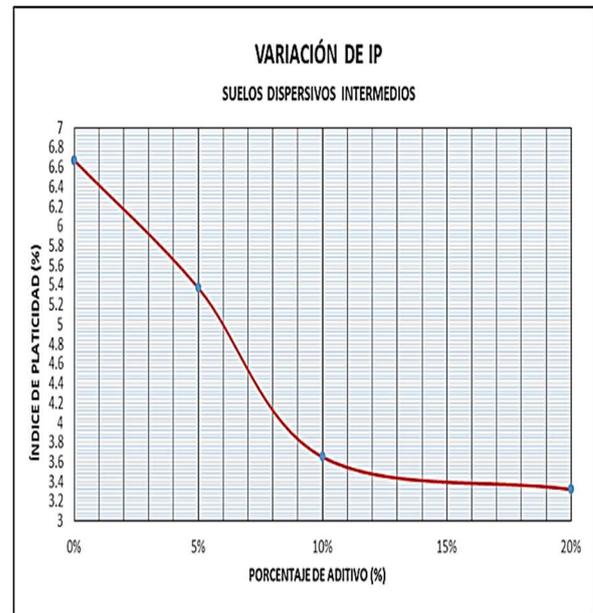
Una de las características principales de las arcillas dispersivas, es tener un alto Límite Líquido, e Índice de plasticidad. Según teoría, tras realizar la estabilización con el aditivo químico estos valores deberían reducir, dado a que el Sulfato de Aluminio Hidratado busca reducir la cantidad de las partículas de finas, como son los coloides, que se encargan de la absorción del agua.

Fig. 6. Resultados en IP en suelos dispersivos



Fuente: Elaboración propia.

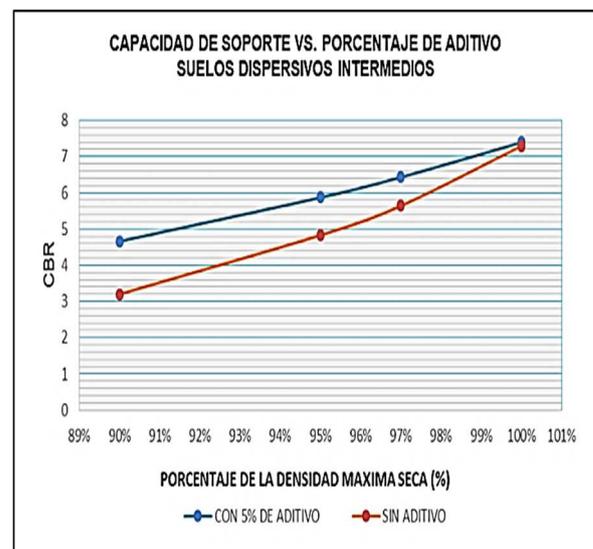
Fig. 7. Resultados en IP en suelos dispersivos intermedias



Fuente: Elaboración propia.

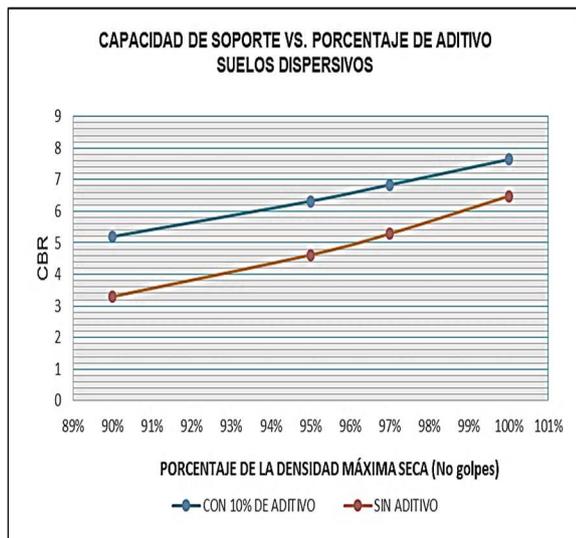
Tras la estabilización del área de estudio, donde a futuro se prevé una urbanización, es importante tomar en cuenta las calles y avenidas que tendrá este lugar, ya que por estas transitarían vehículos con cargas a la hora de la construcción. Se ha visto que la zona es bastante crítica, por la erosión de suelos, debido a los suelos dispersivos, si bien la estabilización fue para erradicar la propiedad de la dispersión, también se analizó las mejoras de las propiedades físico mecánicas, del aditivo.

Fig. 8. Resultados CBR suelos dispersivos intermedios



Fuente: Elaboración propia.

Fig. 9. Resultados CBR suelos dispersivos



Fuente: Elaboración propia.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Tras realizar la estabilización, se lograron encontrar los dos porcentajes de Sulfato de Aluminio Hidratado requeridos para rehabilitar los suelos del área de estudio, estos porcentajes son de 5% y 10%.

Es importante analizar el comportamiento del suelo en contacto con la solución del aditivo, y es que se pudo observar como este floculante, aglutina las partículas coloidales o finas, modificando el tamaño de partículas presentes en la muestra. A medida que el porcentaje de aditivo subía, las partículas se aglutinaban más, y pasado el tiempo de reposo y curación, donde se daba el intercambio iónico, estas agrupaciones lograban una consistencia dura, y a su vez claramente se reducía la capacidad de permeabilidad, ya que cuando estas muestras estabilizadas entraban en contacto con el agua, se mantenían agrupadas, y muy pocas lograban disolverse, este efecto, claramente ratifica la estabilización, eliminando la dispersión de las arcillas.

El Sulfato de Aluminio Hidratado evitó el lavado de los finos, aglutinándolos, incrementando la cohesión. Cuando se forma esta matriz, el suelo se transforma de un material granular, a una capa dura relativamente impermeable, con una capacidad de carga significativa, como se pudo observar en el análisis con relación al CBR. El aumento de esta propiedad, para suelos dispersivos, es significativa, esto nos indica que para el uso en sub rasante ayudará a disminuir los espesores del paquete estructural,

además de dar un mejoramiento al suelo, de ser pobre a regular.

Si se da un análisis desde el punto químico, se sabe que en las arcillas dispersivas predominan los cationes de Sodio (Na^+), mientras que en las ordinarias predominan los cationes de Calcio (Ca^{2+}), Potasio (K^+) y Magnesio (Mg^{2+}). Los cationes de Sodio (Na^+) tienen valencia 1+, por lo que la fuerza electrostática que lo fija a la partícula sólida de arcilla es menor que la que ocurre en el caso de los cationes de Calcio (Ca^{2+}), y Magnesio (Mg^{2+}), con valencia 2+. Además, se necesita un mayor número de cationes de Sodio para satisfacer la carga electrostática de la partícula de arcilla. Por tal razón, tras la rehabilitación de estos suelos en el área de estudio, se puede interpretar que el Aluminio reemplazó al Sodio aumentando esta forma las fuerzas electroestáticas entre las partículas de las arcillas (aglutinación), reduciendo de esta forma la interacción ion – dipolo con el agua (dispersión).

Conclusiones:

Con la ejecución de los ensayos específicos para la determinación de suelos dispersivos, se determinó que del total de 15 muestras dentro el área de estudio, el 40% indica un suelo No Dispersivo, 26.67% un suelo Dispersivo intermedio y finalmente, con 33.33% un suelo Dispersivo.

Para la estabilización de los grados de dispersión presentes en el área de estudio de la zona mediante la aplicación de

Sulfato de Aluminio Hidratado, se trabajó con las muestras que presentaron resultados desfavorables y críticos respecto a la dispersión. De este estudio, se puede concluir que:

- Con una solución de concentración al 5% de Sulfato de Aluminio Hidratado, se logra la neutralización del fenómeno de la dispersividad en un suelo clasificado como DISPERSIVO INTERMEDIO.
- Con una solución de concentración al 10% de Sulfato de Aluminio Hidratado, se logra la neutralización del fenómeno de la dispersividad en un suelo clasificado como DISPERSIVO.
- Con la estabilización, se puede concluir que el aditivo logra optimiza las propiedades mecánicas, y de esta forma se lograría un mejoramiento de sub rasantes.

- Con la variación del índice de plasticidad, se pudo concluir que tras la estabilización con el Sulfato de Aluminio Hidratado, se logra una adherencia entre partículas el área de superficie disponible para la iteración con el agua y de esta forma reduce el límite líquido al secarse reduciendo el área de superficie disponible para la iteración con el agua y de esta forma reduce el límite líquido al secarse.

CONFLICTO DE INTERES

Los autores declaran que no tienen conflictos de interés con la presente investigación.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue posible gracias al apoyo de la Escuela Militar de Ingeniería, Dirección Nacional de Investigación Ciencia y Tecnología – DNICYT y la Carrera de Ingeniería Civil – EMI La Paz, por incentivar al desarrollo de nuevos conocimientos. Finalmente, un especial agradecimiento al Ing. Ronald Barrientos por su constante apoyo, que Dios lo guarde en su gloria.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] American Society Testing Materials. ASTM D4221-11, Standard Test Method for Dispersive Characteristics of Clay Soil by Double Hydrometer, ASTM International, West Conshohocken, EE.UU. 2011. Recuperado de <http://www.astm.org/>
- [2] American Society Testing Materials. ASTM D4647-06: Standard Test Method for Identification and Classification Dispersive Clay Soils by the Pinhole Test. EE.UU. 2013. 11 p. Recuperado de <http://www.astm.org/>
- [3] American Society Testing Materials. ASTM D6572-13e1: Standard Test Methods for Determining Dispersive Characteristics of Clayey Soils by the Crumb Test, ASTM International, West Conshohocken, EE.UU. 2013. Recuperado de <http://www.astm.org/>
- [4] Claros Vargas, H. y Salinas Pereira, M. (Sin año): Identificación de una zona compuesta de arcilla dispersiva en la ciudad de Cochabamba por medio de estudios geotécnicos, teledetección y sistemas de información geográfica. Recuperado de <http://www.sbcs.com.bo/>
- [5] Echemendía, M. A., García, D. C. y otros (1993): Identificación de suelos dispersivos en obras hidráulicas al norte de Guáimaro, provincia de Camagüey. (I Parte). EIPH. Camagüey, Cuba.
- [6] Elges, H.F.W.K. (1985): Dispersive soils. The Civil Engineer in South Africa. Recuperado de <https://studylib.net/>
- [7] Garay Porteros, H.; Alva Hurtado, J. E. (1999): Identificación y Ensayos en Suelos Dispersivos, XII Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Huanuco, México.
- [8] Gobierno Autónomo Municipal De La Paz Dirección Especial De Gestión Integral De Riesgos Sistema De Alerta Temprana (2011): Mapa de riesgos de los distritos urbanos del municipio de La Paz.
- [9] González Haramboure, Y. (2008): Identificación y Estabilización de Suelos Dispersivos: Estado del Arte, Facultad de Ingeniería Civil del ISPJAE, Ciudad de La Habana, Cuba.
- [10] Guzmán, E. (2010): Estabilización de un Suelo Dispersivo mediante Zeolita Micronizada. Recuperado de <https://www.researchgate.net/>
- [11] Hernández, J. L. & Gómez, J. A. (2012): Estudio y caracterización de Suelos Dispersivos – Implementación del Ensayo para identificación y clasificación de suelos dispersivos por el método de Pinhole. Recuperado de <https://es.scribd.com/>
- [12] Indraratna, B., Muttuvel, T., Khabbaz, H., (2008): Investigating Erosional Behaviour of Chemically Stabilised Erodible Soils, Papers of the Faculty of Engineering of Wollongong. Research Gate, 115(2008), 1 – 10, doi: 10.1061/40971(310)83
- [13] Knodel, P. C., (1991): Characteristics and Problems of Dispersive Clay Soils, Bureau of Reclamations, Denver Office, Research al Laboratory Service Division Materials Engineering Branch, U.S.
- [14] Mahmoud H., Mehran R., Mohamadreza H., & Akbar B. (2017): Dispersive Clay Stabilised by Alum and Lime. International Journal of Geomate, 12(29), 156 – 162, doi: 10.21660/2017.29.93287
- [15] Nagy G.; Dr. Nagy L. (2015): Identification and Treatment of Erodible Clays in Dikes.

Repository Tu Delft, 535 – 539, doi: 10.3233/978-1-61499-580-7-535

- [16] Nuñez-Villalba, J. (2016): Monitoreo espacial de desastres y riesgos a través de imágenes de satélite – MEDYRATIS, La Paz, Bolivia: Plural Editores.
- [17] Ouhadi V. R., y Goodarzi A. R. (2006): Assessment of the stability of a dispersive soil treated by alum. Engineering Geology, 85 (1 - 2) 91–101.
- [18] Porteros G, H., Y Hurtado A., J. E. (1999): Identificación y Ensayos en Suelos Dispersivos, XII Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Huanuco, México.
- [19] Reza Jafar H. (2012): Evaluating Chemical Stabilization of Dispersive Clay by Aluminum Sulfate (Alum). World Applied Sciences Journal, 18 (5), 613-616, doi: 10.5829/idosi.wasj.2012.18.05.2561
- [20] Salcedo Fladine L. C. (2015): Determinación de la existencia de suelos dispersivos en la macrozona de Llojeta, La Paz, Bolivia. Tesis. Lic. Escuela Militar de Ingeniería.



Valeria Jazmín Gómez Alcoreza.

Nació en La Paz - Bolivia, es Ingeniera Civil egresada de la Escuela Militar de Ingeniería – Unidad Académica La Paz, con

postgrado en Supervisión y Dirección de Obras Civiles.



Ronald Enrique Barrientos Porcel †.

Nació en La Paz - Bolivia, Ingeniero Geólogo egresado de la Universidad Mayor de San Andrés, con especialización en Geotecnia. Fue docente

en la Escuela Militar de Ingeniería – Unidad Académica La Paz, de las materias de Geología, Mecánica de Suelos. Laboratorios de Hormigones y Mecánica de Suelos.