

# ESTABILIZACIÓN DE ARCILLAS EXPANSIVAS CON GEOMATERIALES DE LA REGIÓN

STABILIZATION OF EXPANSIVE CLAYS WITH GEOMATERIALS OF THE ZONE

Jorge Ordoñez <sup>1</sup>

## RESUMEN

*Se presentan los resultados de la investigación teórica y experimental realizada para la estabilización de arcillas expansivas del subsuelo de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Se abordan los conceptos de la mecánica de suelos para suelos saturados y no saturados. Se aplican métodos y criterios para identificar y clasificar los suelos expansivos. Se realizaron sondeos y ensayos experimentales para determinar las propiedades índice y mecánicas de los estratos de arcilla expansivas de la zona geotécnica A, y de los geomateriales para la estabilización. Los resultados de la investigación indican que estabilizar suelos expansivos con geomateriales naturales de la región contribuyen a mitigar los riesgos geotécnicos en la construcción de edificaciones y pavimentos, económicas y seguras.*

**Palabras Claves:** Estabilización, arcillas expansivas, caliche, granzón, arena.

## ABSTRACT

An investigation was performed theoretical and experimental for stabilization of expansive clay for subsoil in the city of Tuxtla Gutierrez, Chiapas. The application of the principles of the soil mechanics, for saturated soil and unsaturated soil. Geotechnical techniques and procedure were used to identify and classify the expansive

soils. Surveys and test were done to determine the property index and mechanics, the expansive clays strata found in geotechnical zone A and stabilization geomaterials. The information obtained of investigation indicate, that stabilization expansive soil with natural geomaterials to mitigate the geotechnical risks and engineering civil construction building and pavements, are safe and economics.

**Keywords:** Stabilization, expansive clays, caliche, granzón, sand.

## INTRODUCCIÓN

Los daños estructurales causados por las arcillas expansivas a las obras de ingeniería, cimentaciones o pavimentos, causan pérdidas económicas sustanciales y un inadecuado servicio de las construcciones. Este problema ha sido y es motivo de investigación experimental enfocada a la caracterización y mitigación de riesgos geotécnicos.

La geología del estado de Chiapas, está conformada por la presencia de rocas de origen sedimentario. El valle de Tuxtla Gutiérrez, está enmarcado geológicamente por sedimentos marinos del cretácico inferior- terciario medio. El subsuelo de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, predomina la presencia de estratos de arcillas de características expansivas y se ubican en la zona geotécnica A (Ordoñez, 2014). Con el objetivo de ampliar el conocimiento de las características del subsuelo de la ciudad y en particular de las arcillas de la zona geotécnica, se elaboró un nuevo programa de investigación experimental de campo y laboratorio, se determinaron las propiedades índice y mecánicas de los estratos de suelos. La investigación de campo se desarrolló en las Colonias: Las Palmas, Electricistas, Hospital 180 Camas y en el edificio del Poder Judicial de la Federación.

El entorno ambiental y los cambios importantes en el contenido de agua, causados en un ciclo hi-

<sup>1</sup> Profesor de tiempo completo, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chiapas.

drológico anual de lluvias y estiaje, la temperatura y con ello la evaporación, influyen sustantivamente en el comportamiento de los estratos de arcillas. Los estratos de arcillas expansivas de la capa superior, en épocas de lluvias se satura y se comporta como un suelo saturado y en épocas de estiaje se presenta el fenómeno de desecación y se comporta con un suelo no saturado.

En este artículo se presenta los resultados de la investigación teórica y experimental, para la estabilización de suelos expansivos con geomateriales naturales de la región.

Se aplican los métodos indirectos y directos para determinar el potencial y la presión de expansión de los estratos de arcillas. Se presentan los métodos y criterios para identificar y clasificar el grado y potencial de expansión de las arcillas. Se elaboran las mezclas de arcilla expansiva y de los geomateriales, caliche, granzón y arena, para la estabilización y mitigación de los riesgos geotécnicos. Se presentan las propuestas de estabilización de arcillas expansivas y la aplicación práctica a la construcción de obras de ingeniería de vías terrestres y cimentaciones.

### MARCO TEÓRICO

La línea de investigación: el subsuelo de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, ha permitido avanzar en el conocimiento de las características geotécnicas del subsuelo de la ciudad y elaborar el mapa de zonificación geotécnica y la actualización del mismo (Ordóñez, 2008 y Ordóñez, 2014). En la zona geotécnica A, se localizan las arcillas expansivas y registran espesores de 0 a 9 m de profundidad. En la zona geotécnica B, se ubican los estratos de arcillas "lutitas" y le subyacen estratos de rocas "lutitas". En la zona geotécnica C, se ubican los estratos de rocas calizas y el caliche (suelo producto de la intemperización de las rocas calizas calcáreas). De la fabricación de agregados para elaboración de concreto y materiales de base, se deriva el granzón. La arena se extrae del río Santo Domingo, considerado como banco de materiales para la construcción de obras de ingeniería.

### GEOTECNIA

La mecánica de suelos tradicional hace énfasis en los principios que permiten resolver problemas relacio-

nados con los suelos saturados. En la naturaleza, una parte importante de la superficie de la tierra son áreas áridas y semiáridas por las condiciones climáticas y como resultado de estas condiciones ambientales, muchos de estos suelos se encuentran en condiciones no saturadas. La mecánica de suelos puede dividirse en: mecánica de suelos saturados y mecánica de suelos no saturados. Las diferencias básicas entre los suelos saturados y no saturados, están en su naturaleza y sus características ingenieriles. Un suelo saturado presenta dos fases: sólida y líquida; en estas condiciones de saturación, la presión de poro del agua es positiva en relación a la presión atmosférica.

### Concepto de esfuerzos efectivos para suelos saturados

El concepto de estado de esfuerzos ha sido muy aceptado y estudiado para el caso de suelos saturados, Terzaghi (1936) definió el concepto de esfuerzo efectivo con la expresión:  $\sigma' = \sigma - u_w$ . Los procesos de cambio de volumen y las características de resistencia al esfuerzo cortante de un suelo saturado están controlados por los esfuerzos efectivos. *El concepto de esfuerzos efectivos es la base fundamental para estudiar la mecánica de suelos saturados, todos los estudios y aspectos relacionados con el comportamiento de los suelos saturados, están referenciados a los esfuerzos efectivos.*

El comportamiento de los suelos expansivos está en función de los cambios cíclicos de su contenido de agua ( $w$ , %) y con el índice de plasticidad (PI), es necesario determinar la profundidad de la variación del contenido agua.

### Concepto de esfuerzos efectivos para suelos no saturados

En la estructura de los suelos no saturados generalmente se consideran tres fases (Lambe y Whitman, 1979). Recientemente, la capa contráctil, interfaz agua-aire, se introdujo como una cuarta fase independiente para el análisis teórico de esfuerzos al interior de la estructura del suelo (Fredlund y Morgenstern, 1977). En la Figura 1, se presenta un elemento de suelo parcialmente saturado con las tres fases: aire, agua, sólidos y la capa contráctil. La fase de aire consiste en la oclusión de bulbos de aire, el fluido es

significativamente compresible.

En los suelos parcialmente saturados la presión en el agua se considera negativa (succión) en relación a la presión del aire. El agua está sujeta a fenómenos de capilaridad y de absorción que, al combinarse, generan una matriz de esfuerzos al interior de la estructura del suelo, produciendo la succión matricial (figura 2). Bishop (1959) propuso la ecuación:  $\sigma' = (\sigma - u_a) - \chi(u_a - u_w)$ ,  $u_a$  es la presión de poro del aire,  $u_w$  es la presión de poro del agua. Cuando el valor de  $u_w$  se aproxime a  $u_a$ , la succión decrece y el grado de saturación se incrementa; cuando  $\chi(u_a - u_w)$  tiende a la unidad, entonces el suelo está saturado; el parámetro  $\chi$  es unitario para un suelo saturado y nulo para un suelo seco.

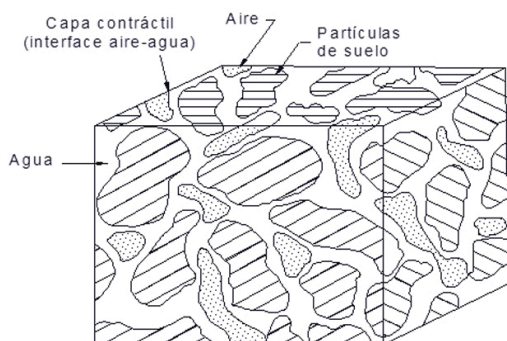


Figura 1. Elemento de suelo no saturado, Con las tres fases: aire, agua, sólidos y la capa contráctil. (Fredlund y Morgenstern, 1977).

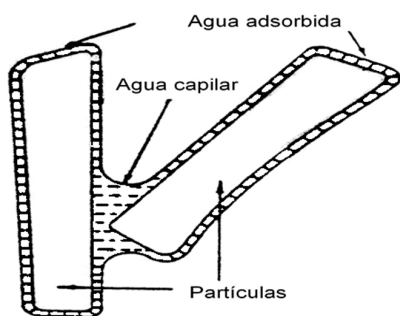


Figura 2. Partículas de arcilla sujeta a capilaridad y absorción (Ordóñez, 2014)

## Composición mineralógica de las arcillas

El comportamiento de los suelos expansivos con partículas menores de  $2\mu$  presentan una respuesta de tipo físico-químico. La forma de los minerales que conforman la estructura de las arcillas es plana o alargada, características geométricas que inducen a presentar una actividad eléctrica.

La composición mineralógica de las arcillas puede definirse a partir de las fuerzas en el interior de sus átomos o moléculas. Las fuerzas de valencia primaria se define como la unión entre átomos para formar moléculas y se debe a que los átomos comparten o intercambian los electrones de sus orbitas exteriores y son lo suficientemente fuertes para no romperse al someterlas a los esfuerzos normales aplicables a ingeniería. Las uniones de valencia secundaria son el producto de la unión de átomos con una molécula con átomos de otra molécula. A estas fuerzas se le conoce como fuerzas de Van der Waals. Estas fuerzas actúan con una intensidad de 1/100 de la correspondiente a las fuerzas de valencia primaria y se deben a la interacción entre moléculas dipolares y otros dipolos o campos eléctricos. Un dipolo es una partícula cargada y los centros de acción de las cargas positiva y negativa no coinciden (Figura 3).

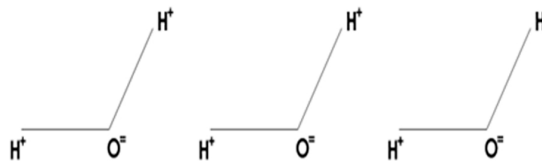


Figura 3. Polaridad en las partículas o moléculas (Ordóñez, 1994).

Las fuerzas de Van de Waals actúan en distancias mayores a  $5 \text{ \AA}$ . Las fuerzas de valencia primaria actúan en distancias de 1 a  $2 \text{ \AA}$ , esto induce a que este tipo de unión sea muy fuerte. Otro tipo de enlace en las moléculas es el hidrógeno, la unión de hidrógeno se presenta cuando un átomo ( $\text{H}^+$ ) es atraído igualmente a otros dos átomos, formando un puente entre ellos (Figura 4). La unión hidrógeno actúa en distancias del orden de 2 a  $3 \text{ \AA}$  y es aproximada-

mente 10 veces más fuerte que la unión de valencia secundaria o de Van der Waals. La unión catiónica se presenta cuando un catión ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ , etc.), es atraído por dos moléculas cargadas negativamente. Esta unión es similar a la unión hidrógeno, excepto que es mucho más inestable.

La unión Coulombica o electroestática, se presenta entre todas las partículas cargadas eléctricamente. Las estructuras de las moléculas pueden ser polares y en función de la orientación de sus partículas, pueden desarrollarse fuerzas de Van der Waals. El espaciamiento entre las partículas es uno de los factores críticos que afectan el comportamiento ingenieril de los suelos y aún más cuando entre las partículas predominan fuerzas eléctricas. Estas fuerzas dependen de la naturaleza del medio que separa a las partículas, a través de su constante dieléctrica, que es la relación de la fuerza de atracción en el vacío con respecto del medio particular en consideración. La constante dieléctrica en el agua está en función de las concentraciones iónicas que existen en ella.



Figura 4. Unión hidrógeno (Ordóñez, 1994).

En los suelos finos compuestos por minerales cristalinos predominan las fuerzas eléctricas; aunque pequeños en tamaño, tienen actividades superficiales muy bajas, por lo que no contribuyen a la generación a los efectos conocidos como plasticidad y cohesión (Mitchel, 1976). Estos minerales pueden referirse como no arcillosos, por ejemplo: el cuarzo y la calcita; son minerales no arcillosos que rara vez se presentan en tamaños menores a 2 micras.

Los minerales cristalinos cuya actividad superficial presentan cohesión y plasticidad, se definen como arcillosos. Se conocen aproximadamente 15 minerales principales de este tipo, pero en general se tienen tres grupos dominantes: caolinita, ilita y montmorilonita.

El comportamiento de los suelos expansivos está en función de los cambios cíclicos de su contenido de agua ( $w$ , %) en su estructura interna. De los tres minerales citados, tienen mayor capacidad de contraerse y expandirse, al someterse a los procesos cíclicos de secado y humedecido, la ilita y la montmorilonita. Estos minerales arcillosos presentan en época de estiaje un comportamiento de suelo no saturado y en época de lluvias de un suelo saturado. Los minerales arcillosos que conforman la fórmula estructural es  $(\text{OH})_8 \text{Si}_4 \text{Al}_4 \text{O}_{10}$ . Las ilitas cuya formación estructural es  $(\text{OH})_4 \text{K}_2 (\text{Si}_6 \text{Al}_{12}) \text{Al}_4 \text{O}_{20}$  y los minerales arcillosos conocidos como montmorilonita su composición teórica estructural es  $(\text{OH})_4 \text{Si}_8 \text{Al}_2$ . De las tres estructuras descritas, los minerales arcillosos de la montmorilonita, presentan la mayor capacidad para los cambios de volumen, porque registran mayor capacidad de absorción de agua en su estructura molecular y mayor superficie específica. Las ilitas están en un grado intermedio y las caolinitas los cambios de volumen ante la presencia de agua en su estructura molecular son relativamente nulos.

El caliche y el granzón, son materiales producto de la intemperización de las rocas calizas calcáreas. La composición estructural de las rocas calizas calcáreas es de 95% a 99% de carbonato de calcio  $\text{CaCO}_3$  y de 45.65% de carbonato de magnesio  $\text{MgCO}_3$ . El granzón es producto del proceso de fabricación de agregados para la elaboración de concreto y materiales de base y sub-base para la construcción de vías terrestres.

Los minerales arcillosos tienen la propiedad de cambiar los cationes adsorbidos en su película superficial. Este fenómeno se le conoce como intercambio catiónico. La unidad fundamental de la partícula de la montmorilonita presenta uniones débiles entre dos unidades con el hidrógeno, como consecuencia el agua penetra entre ellas ocasionando la expansión.

Para alcanzar la estabilidad volumétrica de las arcillas es necesario mezclar suelos con minerales que generen el intercambio de cationes para equilibrar la unión de hidrógeno. La estabilización de arcillas expansivas con caliche, se efectúa por que posee iones de magnesio  $\text{Mg}^{2+}$  y cationes de calcio  $\text{Ca}^{2+}$ , ambos con dos valencias positivas, que permite la sustitución isomorfa. Las partículas de arcilla registran minerales con cargas negativas. El caliche no

está sometido a procesos de secado a altas temperaturas, esto implica que al realizar la mezcla: arcilla-caliche, se elaboren con porcentaje del 25 % a 50%. El granzón por su proceso de elaboración del agregado pétreo, contiene porcentaje mayores de finos, esto genera mayor intercambio de cationes. La investigación registra que al aplicar los mismos porcentajes en las mezclas de: 1). arcilla-caliche y 2). arcilla-granzón. La mezcla 2, presenta porcentajes de expansión menores (Ordóñez, 2013).

La estructura molecular de las arenas, está conformada por minerales de sílice ( $\text{Si}_4\text{O}_{10}$ )<sup>4-</sup> y cuarzo  $\text{SiO}_2$ . En la mezcla de arcilla-arena, no se genera intercambio catiónico; sin embargo, al realizar la mezcla 1:1, se registran porcentajes bajos de expansión, que permiten mitigar los riesgos geotécnicos, al disminuir la presencia de partículas de arcilla.

## INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

Los trabajos de campo se realizaron en la zona geotécnica A-Oriente Sur de la ciudad, colonias: Las Palmas y Electricistas, Hospital 180 camas y Poder Judicial de la Federación. Se realizaron sondeos tipo pozo a cielo abierto (PCA), sondeos profundos tipo mixtos (SPM) combinado con la prueba de penetración estándar (SPT). Se recuperaron muestras alteradas y se realizaron los ensayos para determinar las propiedades índice y mecánicas.

Con las propiedades índice se determina el grado y potencial de expansión de los estratos de suelos. Con las muestras inalteradas se realizaron los ensayos de consolidación, para determinar los módulos de deformación y la presión de expansión de las arcillas.

Con los resultados obtenidos de los ensayos experimentales de campo y laboratorio, se realiza la caracterización del subsuelo y se propone la clasificación de los tipos de riesgos geotécnicos. Para la clasificación de riesgos, se aplica el criterio para identificar y clasificar los tipos de riesgos geotécnicos en arcillas expansivas (Ordóñez, 2013).

### Mitigación de riesgos

Se presentan las alternativas geotécnicas para la mitigación de riesgos, para las zonas urbanas ubicadas en la zona geotécnica A (Tabla 1).

**Tabla 1. Criterio para identificar y clasificar, tipos de riesgos geotécnicos en arcillas expansivas (Ordóñez, 2013).**

| Clasificación de riesgo geotécnico | Parámetros geotécnicos ( $\Delta w$ , %) | Parámetros geotécnicos ( $\Delta s_r$ , %) | Parámetros geotécnicos ( $\Delta e_{cv}$ , %) |
|------------------------------------|--|--|---|
| Bajo                               | 0-2 %                                    | 0-4 %                                      | 0-1 %   |
| Medio                              | 2-5 %                                    | 4-8 %                                      | 1-2 %   |
| Alto                               | > 5 %                                    | > 8 %                                      | > 2 %   |

Se presentan los resultados de cada una de las mezclas propuestas; así como la comparación de los resultados entre las mezclas de arcilla con geomaterial estabilizado.

Con los datos obtenidos de los sitios: Hospital 180 camas (Tablas 2 y 3), edificio del Poder Judicial de la Federación (Tablas 4 y 5), los resultados son para época de estiaje y de lluvias.

**Tabla 2. Hospital 180 camas, época de estiaje.**

| Profundidad | Hospital 180 Camas Estiaje |      |      |      |      |      |
|-------------|----------------------------|------|------|------|------|------|
|             | A102                       |      |      | A103 |      |      |
|             | w                          | PI   | w/PI | w    | PI   | w/PI |
| 0.25        | 20.0                       | 27.8 | 0.72 | 20.0 | 32.2 | 0.62 |
| 0.50        | 20.0                       | 27.8 | 0.72 | 20.0 | 32.2 | 0.62 |
| 0.75        | 23.0                       | 29.5 | 0.78 | 20.4 | 32.9 | 0.62 |
| 1.00        | 23.0                       | 29.5 | 0.78 | 20.4 | 32.9 | 0.62 |
| 1.25        | 23.0                       | 27.8 | 0.83 | 23.0 | 30.7 | 0.75 |
| 1.50        | 23.0                       | 27.8 | 0.83 | 23.0 | 30.7 | 0.75 |
| 1.75        | 22.0                       | 29.3 | 0.75 | 22.0 | 29.4 | 0.75 |
| 2.00        | 22.0                       | 29.3 | 0.75 | 22.0 | 29.4 | 0.75 |
| 2.25        | 23.0                       | 29.9 | 0.77 | 22.0 | 29.8 | 0.74 |
| 2.50        | 23.0                       | 29.9 | 0.77 | 22.0 | 29.8 | 0.74 |
| 2.75        | 23.0                       | 29.4 | 0.78 | 23.0 | 28.7 | 0.80 |
| 3.00        | 23.0                       | 29.4 | 0.78 | 23.0 | 28.7 | 0.80 |

### Determinación de la zona activa

Con los parámetros geotécnicos obtenidos se procede a determinar la zona activa de los dos sitios investigados. En la zona donde se ubica el Hospital de 180 camas, en época de estiaje la zona activa se presenta a los 2.5 a 3 m de profundidad. En época de lluvias la zona activa se ubica de 5 a 7 m de pro-

Tabla 3. Hospital 180 camas, época de lluvias

| Hospital 180 Camas Lluvia |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Profundidad               | A084 |      |      | A085 |      |      |
|                           | w    | PI   | w/PI | w    | PI   | w/PI |
| 0.25                      | 27.0 | 48.0 | 0.56 | 28.0 | 43.0 | 0.65 |
| 0.50                      | 27.0 | 48.0 | 0.56 | 28.0 | 43.0 | 0.65 |
| 0.75                      | 29.0 | 48.0 | 0.60 | 30.0 | 43.0 | 0.70 |
| 1.00                      | 29.0 | 48.0 | 0.60 | 30.0 | 43.0 | 0.70 |
| 1.25                      | 30.0 | 48.0 | 0.63 | 31.0 | 43.0 | 0.72 |
| 1.50                      | 30.0 | 48.0 | 0.63 | 31.0 | 43.0 | 0.72 |
| 1.75                      | 28.0 | 47.0 | 0.60 | 29.0 | 44.0 | 0.66 |
| 2.00                      | 28.0 | 47.0 | 0.60 | 29.0 | 44.0 | 0.66 |
| 2.25                      | 29.0 | 47.0 | 0.62 | 30.0 | 44.0 | 0.68 |
| 2.50                      | 29.0 | 47.0 | 0.62 | 30.0 | 44.0 | 0.68 |
| 2.75                      | 30.0 | 47.0 | 0.64 | 32.0 | 44.0 | 0.73 |
| 3.00                      | 30.0 | 47.0 | 0.64 | 32.0 | 44.0 | 0.73 |
| 3.25                      | 33.0 | 50.0 | 0.66 | 31.0 | 44.0 | 0.70 |
| 3.50                      | 33.0 | 50.0 | 0.66 | 31.0 | 44.0 | 0.70 |
| 3.75                      | 31.0 | 50.0 | 0.62 | 31.0 | 44.0 | 0.70 |
| 4.00                      | 31.0 | 50.0 | 0.62 | 31.0 | 44.0 | 0.70 |
| 4.25                      | 33.0 | 50.0 | 0.66 | 33.0 | 35.0 | 0.94 |
| 4.50                      | 33.0 | 50.0 | 0.66 | 33.0 | 35.0 | 0.94 |
| 4.75                      | 31.0 | 50.0 | 0.62 | 30.0 | 35.0 | 0.86 |
| 5.00                      | 31.0 | 50.0 | 0.62 | 30.0 | 35.0 | 0.86 |
| 5.25                      | 32.0 | 50.0 | 0.64 | 32.0 | 35.0 | 0.91 |
| 5.50                      | 32.0 | 50.0 | 0.64 | 32.0 | 35.0 | 0.91 |

Tabla 4. Poder Judicial de la Federación, época de estiaje

| Judicatura Federal Estiaje |      |      |      |      |      |      |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Profundidad                | A119 |      |      | A123 |      |      |
|                            | w    | PI   | w/PI | w    | PI   | w/PI |
| 0.25                       | 16.0 | 33.0 | 0.48 | 15.0 | 29.0 | 0.52 |
| 0.50                       | 16.0 | 33.0 | 0.48 | 15.0 | 29.0 | 0.52 |
| 0.75                       | 19.0 | 33.0 | 0.58 | 16.0 | 30.0 | 0.53 |
| 1.00                       | 19.0 | 33.0 | 0.58 | 16.0 | 30.0 | 0.53 |
| 1.25                       | 20.0 | 33.0 | 0.61 | 16.0 | 31.0 | 0.52 |
| 1.50                       | 20.0 | 33.0 | 0.61 | 16.0 | 31.0 | 0.52 |
| 1.75                       | 21.0 | 33.0 | 0.64 | 17.0 | 25.0 | 0.68 |
| 2.00                       | 21.0 | 33.0 | 0.64 | 17.0 | 25.0 | 0.68 |
| 2.25                       | 20.0 | 35.0 | 0.57 | 17.0 | 21.5 | 0.79 |
| 2.50                       | 20.0 | 35.0 | 0.57 | 17.0 | 21.5 | 0.79 |
| 2.75                       | 23.0 | 35.0 | 0.66 | 19.0 | 23.0 | 0.83 |
| 3.00                       | 23.0 | 35.0 | 0.66 | 19.0 | 23.0 | 0.83 |
| 3.25                       | 22.0 | 35.0 | 0.63 | 19.0 | 21.0 | 0.90 |
| 3.50                       | 22.0 | 35.0 | 0.63 | 19.0 | 21.0 | 0.90 |
| 3.75                       | 20.0 | 35.0 | 0.57 | 20.0 | 22.0 | 0.91 |
| 4.00                       | 20.0 | 35.0 | 0.57 | 20.0 | 22.0 | 0.91 |
| 4.25                       | 21.0 | 35.0 | 0.60 | 20.0 | 24.0 | 0.83 |
| 4.50                       | 21.0 | 35.0 | 0.60 | 20.0 | 24.0 | 0.83 |
| 4.75                       | 19.0 | 34.0 | 0.56 | 18.0 | 24.0 | 0.75 |
| 5.00                       | 19.0 | 34.0 | 0.56 | 18.0 | 24.0 | 0.75 |
| 5.25                       | 21.0 | 34.0 | 0.62 | 19.0 | 24.5 | 0.78 |
| 5.50                       | 21.0 | 34.0 | 0.62 | 19.0 | 24.5 | 0.78 |
| 5.75                       | 22.0 | 34.0 | 0.65 | 20.0 | 24.5 | 0.82 |
| 6.00                       | 22.0 | 34.0 | 0.65 | 20.0 | 24.5 | 0.82 |
| 6.25                       | 21.0 | 34.0 | 0.62 | 21.0 | 22.0 | 0.95 |
| 6.50                       | 21.0 | 34.0 | 0.62 | 21.0 | 22.0 | 0.95 |
| 6.75                       | 18.0 | 34.0 | 0.53 | 20.0 | 22.0 | 0.91 |
| 7.00                       | 18.0 | 34.0 | 0.53 | 20.0 | 22.0 | 0.91 |

fundidad. En la zona donde se ubica el edificio del Poder Judicial de la Federación, en época de estiaje, la zona activa se ubica de 5 a 6 m de profundidad. En época de lluvias la zona activa se ubica a los 5 m de profundidad.

En las Figuras 5 y 6, se presentan las zonas activas para el sitio donde se ubica el Hospital de 180 camas. En las Figuras 7 y 8, se presentan las zonas activas del sitio donde se ubica el Poder Judicial de la Federación.

### Determinación del potencial de expansión de los estratos de arcillas

En las Figuras 9 a 11, se presenta la carta de plasticidad y el criterio de Dakshanamurthy y Raman (1973) para identificar y clasificar el potencial de expansión de las arcillas. Se grafican los resultados de los tres sitios investigados y se determina el potencial de expansión de los estratos de arcilla.

Los tres sitios investigados: El edificio del Poder Judicial de la Federación, Hospital de 180 camas y la Col. Las Palmas, el potencial de expansión es de media, alta y muy alta; sin embargo, predomina la alta expansividad.

Tabla 5. Poder Judicial de la Federación, época de Lluvias.

| Judicatura Federal Lluvia |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Profundidad               | A124 |      |      | A129 |      |      |
|                           | w    | PI   | w/PI | w    | PI   | w/PI |
| 0.25                      | 28.0 | 49.0 | 0.41 | 29.0 | 42.0 | 0.69 |
| 0.50                      | 27.0 | 49.0 | 0.39 | 29.0 | 42.0 | 0.69 |
| 0.75                      | 30.0 | 49.0 | 0.61 | 29.0 | 42.0 | 0.69 |
| 1.00                      | 30.0 | 49.0 | 0.61 | 29.0 | 42.0 | 0.69 |
| 1.25                      | 28.0 | 49.0 | 0.57 | 33.0 | 41.0 | 0.80 |
| 1.50                      | 28.0 | 49.0 | 0.57 | 33.0 | 41.0 | 0.80 |
| 1.75                      | 30.0 | 49.0 | 0.61 | 33.0 | 41.0 | 0.80 |
| 2.00                      | 30.0 | 49.0 | 0.61 | 33.0 | 41.0 | 0.80 |
| 2.25                      | 29.0 | 49.0 | 0.59 | 32.0 | 44.0 | 0.73 |
| 2.50                      | 29.0 | 49.0 | 0.59 | 32.0 | 42.0 | 0.76 |
| 2.75                      | 30.0 | 49.0 | 0.61 | 32.0 | 42.0 | 0.76 |
| 3.00                      | 30.0 | 49.0 | 0.61 | 32.0 | 42.0 | 0.76 |
| 3.25                      | 27.0 | 54.0 | 0.50 | 35.0 | 40.5 | 0.86 |
| 3.50                      | 27.0 | 54.0 | 0.50 | 35.0 | 40.5 | 0.86 |
| 3.75                      | 26.0 | 54.0 | 0.48 | 35.0 | 40.5 | 0.86 |
| 4.00                      | 26.0 | 54.0 | 0.48 | 35.0 | 40.5 | 0.86 |
| 4.25                      | 27.0 | 54.0 | 0.50 | 33.0 | 43.0 | 0.77 |
| 4.50                      | 27.0 | 54.0 | 0.50 | 33.0 | 43.0 | 0.77 |
| 4.75                      | 25.0 | 54.0 | 0.46 | 33.0 | 43.0 | 0.77 |
| 5.00                      | 25.0 | 54.0 | 0.46 | 33.0 | 43.0 | 0.77 |
| 5.25                      | 24.0 | 54.0 | 0.44 | 32.0 | 44.5 | 0.72 |
| 5.50                      | 24.0 | 54.0 | 0.44 | 32.0 | 44.5 | 0.72 |
| 5.75                      | 25.0 | 46.0 | 0.54 | 32.0 | 44.5 | 0.72 |
| 6.00                      | 25.0 | 46.0 | 0.54 | 32.0 | 44.5 | 0.72 |
| 6.25                      | 23.0 | 46.0 | 0.50 | 32.0 | 44.0 | 0.73 |
| 6.50                      | 23.0 | 46.0 | 0.50 | 32.0 | 44.0 | 0.73 |

Método de Weston (1980)

Weston, realizó estudios para obtener la correlación entre la expansión y otros parámetros del suelo (indicadores de las características de expansión). Desarrollo un amplio estudio estadístico utilizando el análisis con regresión multilineal. Los ensayos realizados en el consolidómetro con inundación se hicieron con muestras con diferentes contenidos de agua inicial y cargas diversas.

El indicador óptimo encontrado para definir la expansividad de la arcilla es el límite ponderado, de la manera siguiente:

$$w_{LW}(\%) = w_L(\% < \text{malla } \# 40/100)$$

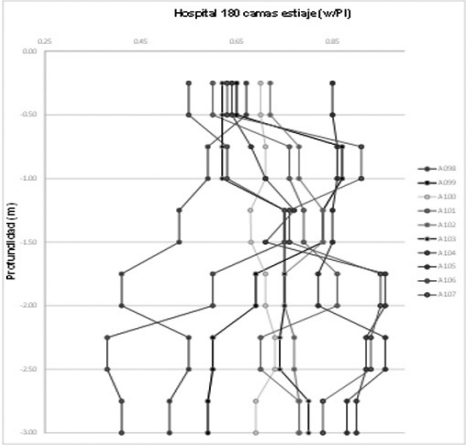


Figura 5. Zona activa de Hospital de 180 camas, época de estiaje.

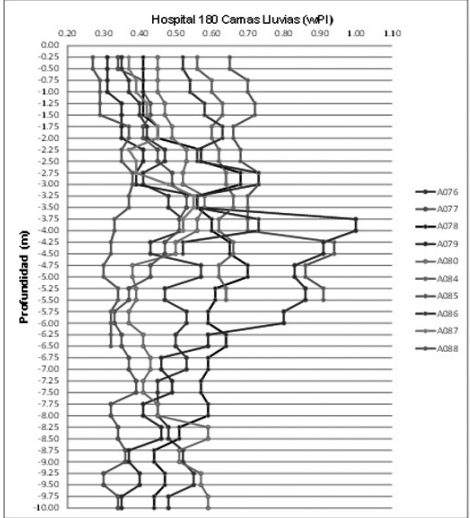


Figura 6. Zona activa de Hospital de 180 camas,, época de lluvias.

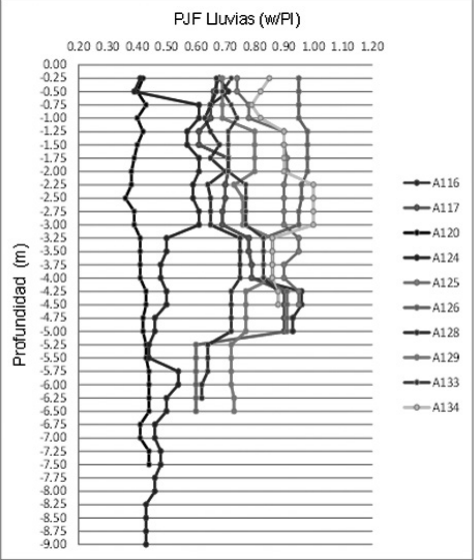


Figura 8. Zona activa Poder Judicial de la Federación, época de lluvias.

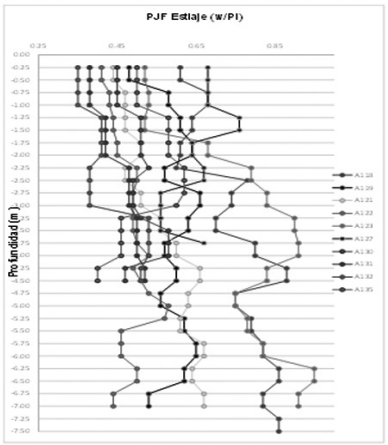


Figura 7. Zona activa Poder Judicial de la Federación, época de estiaje.

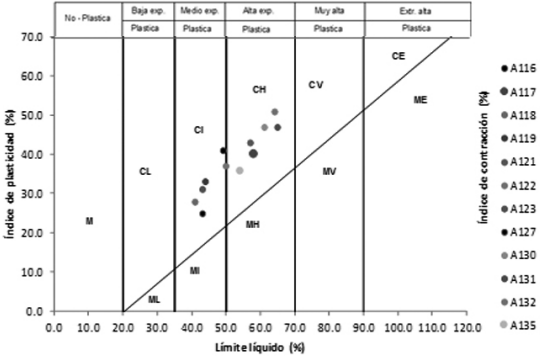


Figura 9. Carta de plasticidad y criterio de Dakshana-murthy y Raman 1973, Hospital 180 camas.

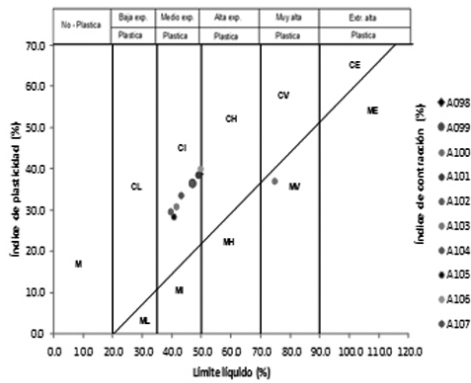


Figura 10. Carta de plasticidad y criterio de Dakshnamurthy y Raman 1973. Poder judicial de la federación

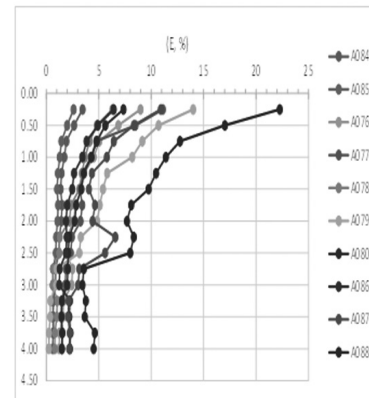


Figura 13. Gráfica de expansión, método de Weston, Hospital 180 camas, época de estiaje.

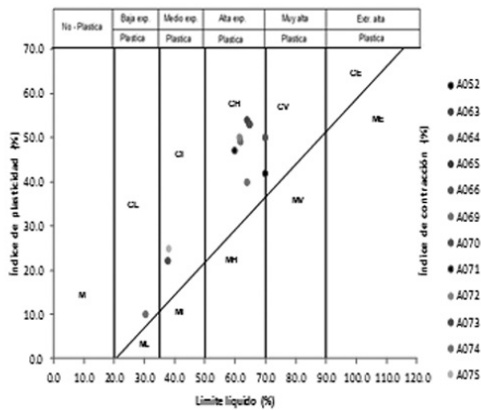


Figura 11. Carta de plasticidad y criterio de Dakshnamurthy y Raman 1973. Colonia las Palmas.

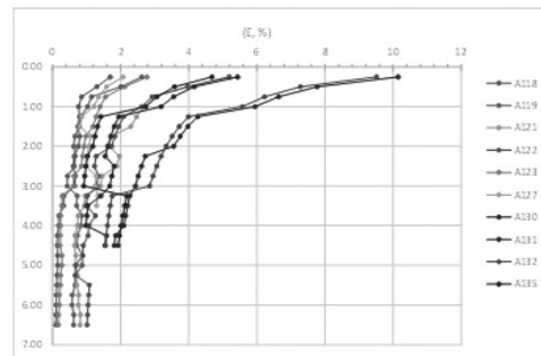


Figura 14. Gráfica de expansión, método de Weston, Poder Judicial, época de estiaje.

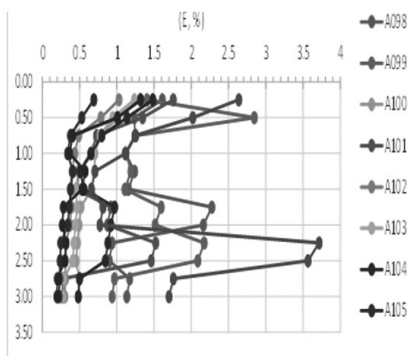


Figura 12. Gráfica de expansión, método de Weston, Hospital 180 camas, época de lluvias.

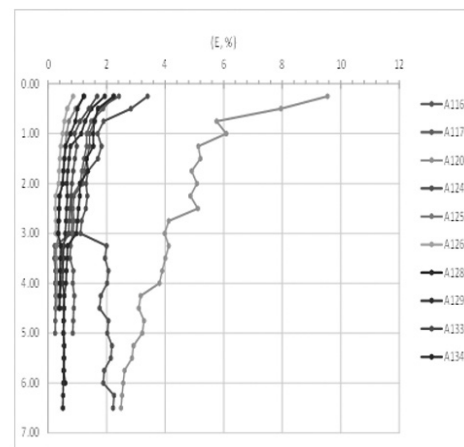


Figura 15. Gráfica de expansión, método de Weston, Poder Judicial, época de lluvia.



La inclusión del peso volumétrico seco, solo reduce la desviación estándar de la estimación de la expansión, en aproximadamente 2%, por lo que Weston (1980) consideró que no influye de manera significativa en la ecuación de regresión. Se determinó la expresión óptima, usando el sistema de unidades internacionales y se expresa de la manera siguiente:

$$E(\%) = (0.000411) (w_{LW})^{4.17} (p)^{-0.386} (wi)^{-2.33}$$

Con la expresión anterior se determinó la expansión para las arcillas en estado natural y de los geomateriales estabilizados.

Se presenta el análisis de expansiones para las arcillas en estado natural y los geomateriales estabilizados: Arcilla natural, caliche, arena y granzón. Los resultados se presentan en las Figuras 12 a la 17.

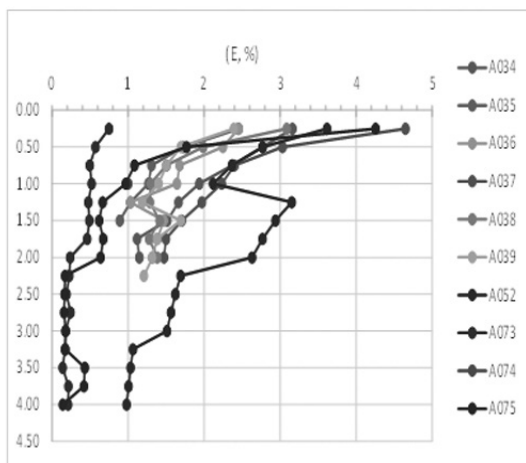


Figura 16. Gráfica de expansión, método de Weston, Col. Las Palmas, época de estiaje.

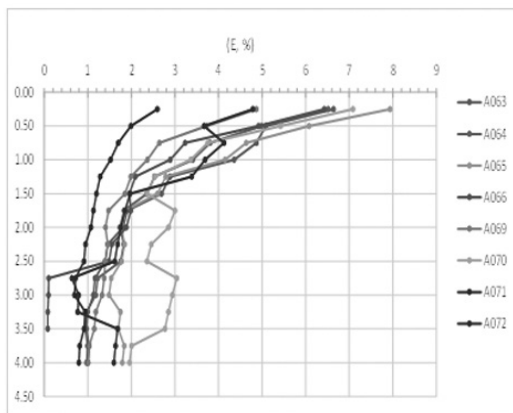


Figura 17. Gráfica de expansión, método de Weston, Col. Las Palmas, época de lluvia.

## APLICACIÓN PRÁCTICA

Se presentan los resultados de las expansiones para los estratos de arcilla de los tres sitios investigados: Hospital 180 camas, el edificio del Poder Judicial de la Federación y Col. Las Palmas. El potencial de expansión en los tres sitios es de medio, alto a muy alto, La zona activa en los tres sitios estudiados, para las épocas de estiaje y lluvias, se ubica de 3 a 7 m de profundidad. La investigación experimental para elaborar las mezclas de arcilla con caliche, arena y granzón, se mezclaron en proporciones de 0 a 50%.

Los porcentajes de expansión para la arcilla en estado natural, alcanzó hasta 8% por cada metro de zona activa. En las mezclas de arcilla-caliche, la expansión varía de 0.5% a 2.5%. Las mezclas de arcilla-arena, la expansión varía de 0.4% a 1% a 3%. La estabilización de arcillas expansivas con granzón, la expansión varía de 0.15% a 0.90%. Se concluye que la estabilización con granzón es la opción más óptima. Se presenta los resultados en las figuras 18 a la 20.

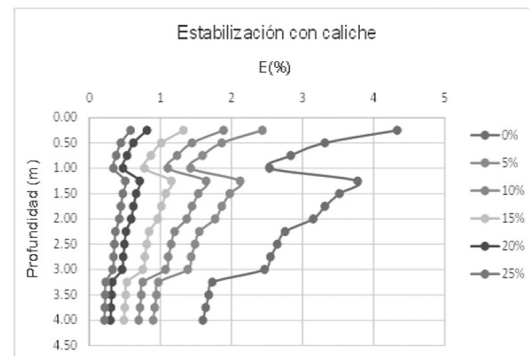


Figura 18. Gráfica de estabilización de arcilla con caliche.

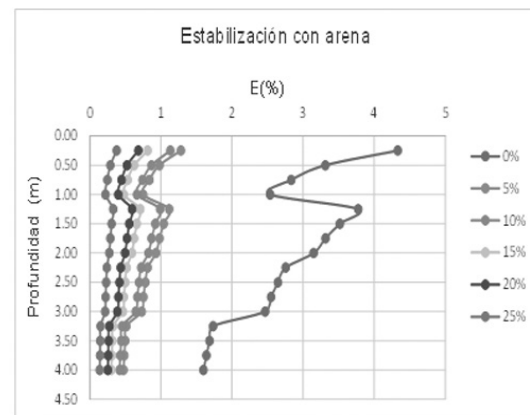


Figura 19. Gráfica de estabilización de arcilla con arena.

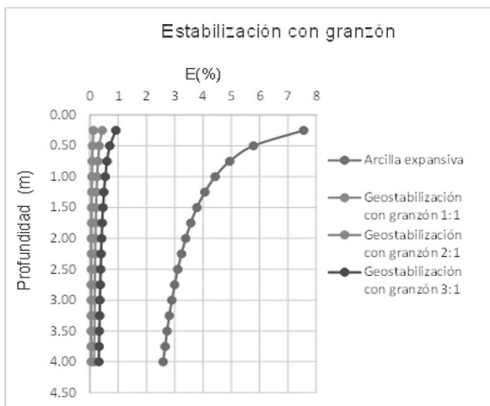


Figura 20. Gráfica de estabilización de arcilla con granzón.

## CONCLUSIONES

Con el objetivo de ampliar el conocimiento de las características del subsuelo de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, se estableció la línea de investigación para determinar las propiedades índice y mecánicas de los estratos de suelo, con el objetivo de mitigar riesgos geotécnicos en la ciudad.

En este artículo se presentan los resultados de la investigación experimental, realizados en los sitios donde se ubican el Hospital de 180 camas y donde se ubica el Poder Judicial de la Federación. Se concluye que ambos sitios, el potencial de expansión de los estratos de arcilla es de medio, alto a muy alto. La zona activa se ubica de 3 a 5 y hasta 7 m de profundidad, en época de estiaje y lluvias. Sin embargo, el contenido de agua,  $w = 16\%$  a  $22\%$ , en época de estiaje, esto indica que el potencial de expansión es muy alto y la presión de expansión arroja valores  $\sigma_s = 1.5$  a  $2.5$  kg/cm<sup>2</sup>. Con esta información, es importante que en el diseño geotécnico de las cimentaciones o de los pavimentos, se proponga la estabilización de los estratos de arcilla, donde se ubica la zona activa, que permita mitigar los riesgos geotécnicos.

Se recomienda emplear las mezclas de arcilla con los geomateriales: caliche, granzón y arenas, para mitigar los riesgos geotécnicos y garantizar la estabilidad de las construcciones, pavimentos y edificaciones.

Los procedimientos de estabilización y los criterios para elaborar el geomaterial estabilizado son muy prácticos.

La estabilización de las arcillas con geomateriales regionales como: el caliche, arena y el granzón, es una aportación importante, para estabilizar arcillas expansivas y mitigar los riesgos geotécnicos, para garantizar la seguridad y economía de las construcciones cimentadas sobre suelos expansivos.

## REFERENCIAS

- Dakshnamurthy, V. y Raman, V.(1973).- "A simple method of Identifying on expansive soil". International Conference on Expansive Clays Soil". Haifa Israel, Vol. 1, pp 17-25.
- Fredlund, D.G. and Rahardjo H. (1993).-Soil Mechanics For Unsaturated Soils. Ed. Wiley Inter Science. Printed -USA.
- Mitchell, J. (1976). Fundamentals of Soil Behavior, John Wiley y Sons, Inc. Berkeley California, U.S.A.
- Ordoñez, J. (1994). Estabilización de las arcillas expansivas de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez con caliche y arena. Tesis de Maestría. E.S.I.A.- I.P.N, México D.F.
- Ordoñez, R.J. (2008).- Zonificación geotécnica de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. Facultad de Ingeniería, UNACH, Chiapas, México.
- Ordóñez, J. (2014). Caracterización del subsuelo y análisis de riesgos geotécnicos en ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Tesis doctoral. Instituto de Ingeniería de la UNAM.
- Ordoñez, R.J. (2014). Criterio para clasificar los tipos de riesgos geotécnicos para suelos expansivos. Instituto de Ingeniería, UNAM. México, D.F., 2013.
- Ordóñez, J. Ordóñez, J.A. y Zebadua, A. (2018).-Métodos y criterios para identificar, clasificar y mitigar riesgos geotécnicos. Revista Pakbal. Facultad d Ingeniería, UNACH.
- Weston, D. (1980).- Expansive roadbed treatment for Southern Africa, Proceedings of the 4th International conference on Expansive Soils, Denver, Vol. II, pp834-844.