

García Ezquivel Cesar Augusto

Comportamiento y modelación de suelos dispersivos  
de la ciudad de Rioverde, S.L.P.

2024



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería

**COMPORTAMIENTO Y MODELACIÓN DE SUELOS  
DISPERSIVOS DE LA CIUDAD DE RIOVERDE, S.L.P.**

Tesis

Que como parte de los requisitos para  
obtener el Grado de

Maestro en Ciencias (Geotecnia)

Presenta

Ing. Cesar Augusto García Ezquivel

Dirigido por:

Dr. Eduardo Rojas González

Co-Director:

Dr. Gustavo Gallegos Fonseca

Querétaro, Qro a 30 de mayo de 2024

La presente obra está bajo la licencia:  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

### Usted es libre de:

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



**NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



**SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

### Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.

# Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde, S.L.P.

---



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ciencias Línea Terminal en Geotecnia

## COMPORTAMIENTO Y MODELACIÓN DE SUELOS DISPERSIVOS DE LA CIUDAD DE RIOVERDE, S.L.P.

### TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de:

Maestro en Ciencias (Geotecnia)

#### Presenta:

Cesar Augusto García Ezquivel

#### Dirigido por:

Dr. Eduardo Rojas González

#### **Dr. Eduardo Rojas González**

Presidente

#### **Dr. Gustavo Gallegos Fonseca**

Secretario

#### **Dra. María de la Luz Pérez Rea**

Vocal

#### **Dra. Genoveva Hernández Padrón**

Suplente

#### **Dra. Teresa López Lara**

Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro. México.  
Mayo 2024

## **RESUMEN**

En gran parte de la superficie terrestre los suelos se encuentran en estado no saturado. Estos materiales pueden presentar comportamientos inusuales como los observados en las arcillas expansivas, los suelos colapsables y los suelos dispersivos.

Los suelos colapsables son aquellos que fallan por la combinación de carga y humedecimiento. En los suelos dispersivos las partículas sólidas se repelen al entrar en contacto con el agua.

Los suelos dispersivos han ocasionado daños en obras civiles a lo largo de la historia por la inestabilidad que presentan en su estructura a causa de los cambios de humedad. En la ciudad de Rioverde S.L.P. la mancha urbana se ha extendido a zonas donde existe la presencia de este tipo de material y los problemas causados por sus características dispersivas son cada vez más constantes.

Esta investigación se enfoca en estudiar este tipo de suelos y su comportamiento utilizando el principio de esfuerzos efectivos de Bishop para suelos no saturados, tomando en cuenta la histéresis de la curva de retención, utilizando pocos parámetros y que se puedan obtener en ensayos comunes de laboratorio.

**Palabras clave:** Suelos dispersivos, Suelos no saturados, Esfuerzos Efectivos, Curvas de Retención.

## **SUMMARY**

In much of the Earth's surface, soils are in an unsaturated state. These materials can present unusual behaviors such as those observed in expansive clays, collapsible soils and dispersive soils.

Collapsible soils are those that fail due to the combination of loading and wetting. In dispersive soils, solid particles repel each other when they come into contact with water.

Dispersive soils have caused damage to civil works throughout history due to the instability they present in their structure due to changes in humidity. In the city of Rioverde S.L.P. The urban sprawl has spread to areas where this type of material is present and the problems caused by its dispersive characteristics are increasingly constant.

This research focuses on studying this type of soil and its behavior using Bishop's effective stress principle for unsaturated soils, taking into account the hysteresis of the retention curve, using few parameters that can be obtained in common laboratory tests. .

**Key words:** Dispersive soils, Unsaturated soils, Effective stress, Retention Curves.

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**

---

La ciencia está compuesta de errores que es útil cometer, porque conducen poco a poco a la verdad.

**Julio Verne**

**DEDICATORIA**

Que paradójico es esto. Vamos por la vida deseando poseer más, y conforme lo obtenemos, más infelices y atormentados nos volvemos. Mas esclavos de las cosas nos hacemos. Mas tenemos y más libertad perdemos. Creemos que la hazaña es salir corriendo y conquistar el universo, pero cuando lo hacemos, descubrimos que el Ego nunca se satisface por completo. Siempre queremos más. Entonces entregamos nuestra vida a estar siempre esforzándonos, a caminar por el mundo sordos y ciegos, incapaces de ver la belleza del presente y del momento. Sufrimos y lloramos. La ansiedad por lo que no tenemos nos quema por dentro y nos hacemos presos de la cárcel de nuestros fracasos, y mucho peor que eso, presos de la cárcel de nuestros éxitos. Tarde comprendemos que la hazaña nunca estuvo en el mundo de los objetos ni en el triunfo pasajero, si no en conquistarnos a nosotros mismos, en hacernos dueños de nuestro pensamiento, amos y señores de nuestro destino, creadores de nuestro propio Universo.

Tarde comprendemos que la victoria, que la conquista, que el verdadero éxito, nunca estuvo allá afuera, sino adentro.

### **AGRADECIMIENTOS**

En este trabajo queda plasmado aquel sueño que hace algunos años parecía inalcanzable e incluso estuve a punto de renunciar a él. Nunca sabré como hubiera sido de mi vida si lo hubiera hecho, sin embargo, se cuáles fueron las consecuencias de haber seguido este sueño y no queda más que aceptarlas para bien o para mal. Por esta razón siempre le pediré a Dios que me de la gracia de aceptar con serenidad las cosas que no puedo cambiar, el coraje para cambiar las que si puedo cambiar y sabiduría para ver la diferencia.

Agradezco a mis padres Hilaria Ezquivel y Roberto García que me han brindado su apoyo incondicional y me han dado todas las herramientas morales y materiales para poder cumplir mis objetivos personales y académicos. A mi hermano Roberto por darme su apoyo siempre de la manera que le es posible.

A Paola Liliana Sánchez López por darme aliento y servir de ejemplo de poder entrar a la maestría y por tomarse el tiempo de leer mi protocolo de investigación y ayudarme a corregirlo en cuestiones de ortografía. Gracias por su paciencia y apoyo al escucharme hablar sobre mis proyectos y forma de pensar. Pero sobre todo le agradezco por estar a mi lado durante este trayecto y por todos los momentos y vivencias que pasamos juntos.

A Altagracia Vargas Hernández que por cuestiones de la vida nuestros caminos tomaron rumbos diferentes, sus últimas palabras dirigidas hacia mí fue deseándome lo mejor y querer siempre mi bien y que no me castigara exigiéndome mucho ya que todo lo he hecho bien y sería capaz de lograr cumplir este sueño y lo que me propusiera. Mientras que de mi parte donde quiera que se encuentre orare por ella y seguiré deseándole lo mejor (Carta a quien me sustituye – Borja Navarro, Cori García). Eres la mejor mujer que he conocido.

No es en papel filtro Whatman No. 42 pero le agradezco a Jimena Guadalupe Flores Escareño por su apoyo y amistad durante el último semestre de la maestría. Por estar en los malos momentos donde estuve a punto de tirar la toalla dándome palabras de aliento

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**

---

y creyendo en mí. Además de tener siempre alguna manera de lograr alegrarme cuando más lo llegue a necesitar.

A Juan Sebastián Arteaga por ser buen compañero y amigo, además del apoyo mutuo durante la maestría ya que terminarla era la meta en común de los dos.

A Rafael Ortiz Hernández por su asesoría y orientación ante cualquier duda que surgiera, siempre tiene alguna literatura que recomendar para buscar alguna solución.

A Andrea Berenice Medina, Emmanuel Vázquez Montes, Martín González y Jovany González compañeros y amigos de la maestría por compartir su conocimiento y experiencias en geotecnia que contribuyó al aprendizaje obtenido.

Al Dr. Gustavo Gallegos Fonseca por sus enseñanzas durante la licenciatura y la invitación a participar en el Verano de la Ciencia de la UASLP del 2015 y 2016 bajo su guía y posterior servicio social en el laboratorio de mecánica de suelos de la universidad, ya que de ahí surgió mi interés por esta rama de la ingeniería civil. De igual manera se le agradece su apoyo durante la realización de esta tesis.

Al Dr. Eduardo Rojas González por ser un excelente guía y ejemplo a seguir, además de su apoyo, confianza y dirección en la realización de esta tesis y por su paciencia y conocimiento compartido. Gracias a usted se pudo concluir con este trabajo.

A los miembros de mi sínodo, Dra. María de la Luz Pérez Rea, Dra. Genoveva Hernández Padrón y Dra. Teresa López Lara cuyos comentarios y sugerencias ayudaron a mejorar la entrega final de este trabajo.

A la Universidad Autónoma de Querétaro y al CONAHCYT por el apoyo y facilidades brindadas para estudiar un posgrado por medio del programa de becas para estudios de posgrado.

Por último y no menos importante a Stephanie Sánchez por darme su amistad y hacerme ver que por más mal este una situación siempre habrá motivos para seguir adelante.

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	<b>III</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>IV</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>VI</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>XIV</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>XXI</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>31</b>
1.1 Justificación.....	31
1.2 Descripción del problema .....	32
1.3 Hipótesis.....	36
1.4 Objetivos .....	36
1.4.1 Objetivo general .....	36
1.4.2 Objetivos particulares.....	36
<b>2. ANTECEDENTES</b> .....	<b>37</b>
<b>3. ESTADO DEL ARTE</b> .....	<b>46</b>
3.1 El suelo.....	46
3.2 Suelos saturados .....	48
3.3 Suelos no saturados .....	49
3.4 Colapso y Expansión.....	51
3.5 Suelos Expansivos.....	51
3.6 Suelos colapsables.....	52
3.6.1. Método de Priklonski 1952 .....	53
3.6.2. Método de Jennings and Knight 1975.....	53
3.7 Suelos dispersivos .....	55
3.8 Identificación de los suelos dispersivos .....	56
3.8.1. Pruebas Físicas .....	57
<b>3.8.1.1. Prueba de Crumb</b> .....	<b>57</b>
<b>3.8.1.2. Ensayo del agujero Pinhole</b> .....	<b>58</b>

3.8.1.3.	Prueba del Doble Hidrómetro .....	61
3.8.2.	Pruebas Químicas .....	62
3.8.2.1.	Prueba de Porcentaje de Sodio Intercambiable (ESP) .	62
3.8.2.2.	Relación de Absorción de Sodio (SAR) .....	63
3.9	Estados de esfuerzo en suelos no saturados .....	66
3.10	Succión.....	67
3.11	Curvas de Retención Agua-Suelo (CRAS) .....	69
3.12	Modelo Sólido Poroso.....	71
3.13	Deformación Volumétrica.....	73
3.14	Marco Elastoplástico .....	75
3.14.1.	Suelos compactados.....	77
<b>4.</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>81</b>
4.1	Obtención de muestra alteradas e inalteradas .....	81
4.2	Caracterización del suelo .....	83
4.2.1.	Contenido de humedad ( $\omega$ ).....	83
4.2.2.	Peso específico del suelo ( $\gamma_m$ ) .....	83
4.2.3.	Peso específico relativo de sólidos (Gs o Ss) .....	84
4.2.4.	Análisis Granulométrico.....	85
4.2.5.	Límites de Consistencia.....	86
4.2.6.	Clasificación del suelo.....	88
4.3	Evaluación de la dispersividad del suelo .....	88
4.3.1.	Prueba de Crumb .....	88
4.3.2.	Prueba del Doble Hidrómetro.....	89
4.3.3.	Prueba de Pinhole .....	90
4.3.4.	Análisis Químico .....	90
4.3.5.	Análisis mineralógico .....	90
4.4	Obtención de la curva de retención agua-suelo.....	91
4.4.1.	Medición de la succión del suelo con el método del papel filtro .	91
4.4.2.	Preparación de las muestras de suelo para la línea de humedecimiento .....	92
4.4.3.	Preparación de las muestras de suelo para la línea de secado .....	92

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**

---

4.5	Pruebas mecánicas .....	93
4.5.1.	Triple Odómetro .....	93
4.5.2.	Prueba Triaxial Consolidada Drenada (CD).....	94
4.6	Pruebas con sodio.....	95
4.7	Modelación.....	96
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>97</b>
5.1	Caracterización del suelo .....	97
5.2	Evaluación de la dispersividad del suelo .....	100
5.3	Obtención de la curva de retención agua-suelo.....	110
5.4	Pruebas mecánicas .....	112
5.4.1.	Triple Odómetro .....	112
5.4.2.	Prueba Triaxial Consolidada Drenada (CD).....	114
5.4.3.	Pruebas con Sodio .....	118
<b>6.</b>	<b>MODELACIÓN.....</b>	<b>127</b>
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>142</b>
	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>145</b>
	<b>ANEXO A. PROPIEDADES ÍNDICE DEL SUELO.....</b>	<b>155</b>
A.1	Perfil de humedad natural y estratigrafía de sitio.....	155
A.2	Límites de Consistencia .....	156
A.3	Peso específico relativo de sólidos.....	159
A.4	Peso volumétrico de la masa de suelo.....	161
A.5	Análisis granulométrico .....	163
A.1	Tabla resumen de propiedades índice .....	171
	<b>ANEXO B. EVALUACIÓN DE LA DISPERSIVIDAD.....</b>	<b>172</b>
B.1	Prueba del Doble Hidrómetro .....	172
B.1	Prueba de Pinhole.....	177
	<b>ANEXO C. DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE RETENCIÓN AGUA - SUELO .....</b>	<b>179</b>
C.1	Calibración de papel filtro Whatman No. 42 Lot No. 17398518.....	179
C.2	Preparación de muestras para medición de succión por el método de papel filtro	180

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**

---

C.1	Medición de succión por el método de papel filtro .....	182
<b>ANEXO D. ENSAYES EDOMÉTRICOS.....</b>		<b>184</b>
D.1	Determinación de índice de compresión $\lambda$ y el índice de carga-descarga $\kappa$ 184	
D.1	Evaluación de potencial de colapso CP .....	193
<b>ANEXO E. PRUEBAS TRIAXIALES CD.....</b>		<b>196</b>
E.1	$S_w = 0\%$ .....	196
E.2	$S_w = 30\%$ .....	197
E.3	$S_w = 50\%$ .....	198
E.4	$S_w = 65\%$ .....	199
E.5	$S_w = 80\%$ .....	200
E.6	$S_w = 100\%$ .....	201
E.7	$S_w = 0\%$ .....	202
E.8	$S_w = 30\%$ .....	203
E.9	$S_w = 55\%$ .....	204
E.10	$S_w = 68\%$ .....	205
E.11	$S_w = 84\%$ .....	206
E.12	$S_w = 100\%$ .....	207
E.13	$S_w = 0\%$ (Suelo mezclado con sodio) .....	208
E.14	$S_w = 30\%$ (Suelo mezclado con sodio) .....	209
E.15	$S_w = 50\%$ (Suelo mezclado con sodio) .....	210
E.16	$S_w = 67\%$ (Suelo mezclado con sodio) .....	211
E.18	$S_w = 100\%$ (Suelo mezclado con sodio) .....	212
E.18	Resumen de resultados de pruebas triaxiales CD .....	213
<b>ANEXO F. MODELO SÓLIDO POROSO .....</b>		<b>216</b>
<b>ANEXO G. RESULTADO TEÓRICO DE RESISTENCIA AL CORTE .....</b>		<b>219</b>
<b>ANEXO H. RESULTADO TEÓRICO DE COMPORTAMIENTO VOLUMÉTRICO .....</b>		<b>221</b>
H.1	Muestra cargada a 31.78 kPa .....	221
H.2	Muestra cargada a 63.57 kPa .....	226
H.3	Muestra cargada a 95.35 kPa .....	231

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**

---

H.4	Muestra cargada a 190.71 kPa .....	236
H.5	Muestra cargada a 381.49 kPa .....	242
<b>ANEXO I. COMPARACIÓN TEÓRICO EXPERIMENTAL DE COMPORTAMIENTO VOLUMÉTRICO.....</b>		<b>246</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Frecuencia y extensión de suelos dispersivos en el mundo (Abbaslou et al., 2016). .....	33
<b>Tabla 2.</b> Propiedades de los minerales arcillosos expansivos realizada por Lambe en 1959 (Barrera & Garnica, 2002). .....	52
<b>Tabla 3.</b> Criterio de clasificación por el método de Prikloński (AL-OBAIDI, 2003). .....	53
<b>Tabla 4.</b> Relación del potencial de colapso con los problemas presentados en cimentaciones (AL-OBAIDI, 2003). .....	54
<b>Tabla 5.</b> Criterio de evaluación de los resultados de la prueba Pinhole por el Método A y B (ASTM D4647-93, n.d.). .....	60
<b>Tabla 6.</b> Criterio de evaluación de los resultados de la Prueba del Doble Hidrómetro. ....	62
<b>Tabla 7.</b> Criterio para clasificar suelos dispersivos usando el parámetro ESP(Knodel, 1991). .....	63
<b>Tabla 8.</b> Ecuaciones de esfuerzos efectivos presentadas por diversos autores (Fredlund & Rahardjo, 1993). ....	67
<b>Tabla 9.</b> Métodos experimentales para medición de la succión en suelos(Verdin Montes, 2018). .....	69
<b>Tabla 10.</b> Propiedades Índice del suelo en estudio. ....	99
<b>Tabla 11.</b> Resultados de la Prueba de Crumb. ....	101
<b>Tabla 12.</b> Resultados de la Prueba del Doble Hidrómetro. ....	103
<b>Tabla 13.</b> Resultados de la Prueba de Pinhole. ....	104
<b>Tabla 14.</b> Resumen de resultados obtenidos en la evaluación de la dispersividad del material. ....	104
<b>Tabla 15.</b> Resumen de resultados obtenidos del análisis químico del suelo en estudio. ....	105
<b>Tabla 16.</b> Resultados de ensayos edométricos. ....	112
<b>Tabla 17.</b> Resultados de pendientes $\kappa$ y $\lambda$ de ensayos edométricos. ....	113
<b>Tabla 18.</b> Ángulo de fricción y cohesión obtenidos en ensayos triaxiales. ....	115
<b>Tabla 19.</b> Resultados obtenidos en la prueba de Doble Hidrómetro en suelo mezclado con carbonato de sodio. ....	119
<b>Tabla 20.</b> Resultados obtenidos en la prueba de Doble Hidrómetro en suelo mezclado con cloruro de sodio. ....	121

<b>Tabla 21.</b> Ángulo de fricción y cohesión obtenidos en ensayos triaxiales de probetas de suelo mezclado con cloruro de sodio.....	124
<b>Tabla 22.</b> Resultados de ensayos edométricos con suelo mezclado con cloruro de sodio.....	125
<b>Tabla 23.</b> Resultados de pendientes $\kappa$ y $\lambda$ de ensayos edométricos de suelo mezclado con cloruro de sodio. ....	126
<b>Tabla 24.</b> Parámetros para generar modelo de muestras cargadas a 31.78 kPa. ....	131
<b>Tabla 25.</b> Parámetros para generar modelo de muestras cargadas a 63.57 kPa. ....	132
<b>Tabla 26.</b> Parámetros para generar modelo de muestras cargadas a 95.35 kPa. ....	134
<b>Tabla 27.</b> Parámetros para generar modelo de muestras cargadas a 190.71 kPa. ....	135
<b>Tabla 28.</b> Parámetros para generar modelo de muestras cargadas a 381.41 kPa. ....	137
<b>Tabla 29.</b> Análisis estadístico de correlación entre resultados del comportamiento volumétrico teórico y experimental. ....	142
<b>Tabla 30.</b> Contenido de humedad natural. ....	155
<b>Tabla 31.</b> Límite líquido por método del cono inglés. ....	156
<b>Tabla 32.</b> Límite líquido por método de la copa de Casagrande.....	157
<b>Tabla 33.</b> Resumen de límite líquido obtenido. ....	158
<b>Tabla 34.</b> Límite plástico. ....	158
<b>Tabla 35.</b> Límite de contracción lineal y volumétrica.....	159
<b>Tabla 36.</b> Calibración de matraz para prueba de peso específico relativo de sólidos. ....	159
<b>Tabla 37.</b> Peso relativo de sólidos.....	160
<b>Tabla 38.</b> Peso volumétrico de la masa de suelo.....	161
<b>Tabla 39.</b> Testigo de humedad de muestras utilizadas para determinar el peso volumétrico de la masa de suelo. ....	162
<b>Tabla 40.</b> Análisis granulométrico (prueba 1). ....	163
<b>Tabla 41.</b> Análisis granulométrico (prueba 2). ....	165
<b>Tabla 42.</b> Análisis granulométrico (prueba 3). ....	167
<b>Tabla 43.</b> Análisis granulométrico de suelo mezclado con carbonato de sodio. ....	169
<b>Tabla 44.</b> Análisis granulométrico de suelo mezclado con cloruro de sodio.....	170
<b>Tabla 45.</b> Resumen de propiedades índice del suelo dispersivo de la ciudad de	

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**

---

Rioverde, S.L.P. ....	171
<b>Tabla 46.</b> Prueba del doble hidrómetro (prueba 1) .....	172
<b>Tabla 47.</b> Prueba del doble hidrómetro (prueba 2). ....	173
<b>Tabla 48.</b> Prueba del doble hidrómetro (prueba 3). ....	174
<b>Tabla 49.</b> Prueba del doble hidrómetro de suelo mezclado con carbonato de sodio. .....	175
<b>Tabla 50.</b> Prueba del doble hidrómetro de suelo mezclado con cloruro de sodio. .....	176
<b>Tabla 51.</b> Prueba de Pinhole (prueba 1). ....	177
<b>Tabla 52.</b> Prueba de Pinhole (prueba 2). ....	178
<b>Tabla 53.</b> Prueba de Pinhole (prueba 3). ....	178
<b>Tabla 54.</b> Concentración de la solución salina para la calibración del papel filtro. .....	179
<b>Tabla 55.</b> Preparación de muestras para medición de la succión en el suelo por método del papel filtro. ....	180
<b>Tabla 56.</b> Preparación de muestras para medición de la succión en el suelo mezclado con cloruro de sodio por método del papel filtro. ....	181
<b>Tabla 57.</b> Medición de la succión de suelo en condiciones naturales. ....	182
<b>Tabla 58.</b> Medición de la succión de suelo mezclado con cloruro de sodio. ....	183
<b>Tabla 59.</b> Ensaye edométricos sujeto a una carga de 31.78 kPa (réplica 1). ....	184
<b>Tabla 60.</b> Ensaye edométricos sujeto a una carga de 63.57 kPa (réplica 1). ....	184
<b>Tabla 61.</b> Ensaye edométricos sujeto a una carga de 95.35 kPa (réplica 1). ....	185
<b>Tabla 62.</b> Ensaye edométricos sujeto a una carga de 190.71 kPa (réplica 1). ...	185
<b>Tabla 63.</b> Ensaye edométricos sujeto a una carga de 381.41 kPa (réplica 1). ...	186
<b>Tabla 64.</b> Ensaye edométricos sujeto a una carga de 31.78 kPa (réplica 2). ....	187
<b>Tabla 65.</b> Ensaye edométricos sujeto a una carga de 63.57 kPa (réplica 2). ....	187
<b>Tabla 66.</b> Ensaye edométricos sujeto a una carga de 95.35 kPa (réplica 2). ....	188
<b>Tabla 67.</b> Ensaye edométricos sujeto a una carga de 190.71 kPa (réplica 2). ...	188
<b>Tabla 68.</b> Ensaye edométricos sujeto a una carga de 381.41 kPa (réplica 2). ...	189
<b>Tabla 69.</b> Pendientes $\kappa$ y $\lambda$ de ensayos edométricos. ....	190
<b>Tabla 70.</b> Ensaye edométricos sujeto a una carga de 31.78 kPa (suelo mezclado con sodio). ....	190

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**

---

<b>Tabla 71.</b> Ensaye edométricos sujeto a una carga de 63.57 kPa (suelo mezclado con sodio).....	191
<b>Tabla 72.</b> Ensaye edométricos sujeto a una carga de 95.35 kPa (suelo mezclado con sodio).....	191
<b>Tabla 73.</b> Ensaye edométricos sujeto a una carga de 190.71 kPa (suelo mezclado con sodio).....	192
<b>Tabla 74.</b> Pendientes $\kappa$ y $\lambda$ de ensayos edométricos de suelo mezclado con cloruro de sodio. ....	193
<b>Tabla 75.</b> Potencial de colapso.....	193
<b>Tabla 76.</b> Potencial de colapso en suelo mezclado con sodio.....	194
<b>Tabla 77.</b> Resumen de potencial de colapso. ....	195
<b>Tabla 78.</b> Prueba triaxial CD de muestra con $S_w = 0\%$ (réplica 1). ....	196
<b>Tabla 79.</b> Prueba triaxial CD de muestra con $S_w = 30\%$ (réplica 1). ....	197
<b>Tabla 80.</b> Prueba triaxial CD de muestra con $S_w = 50\%$ (réplica 1). ....	198
<b>Tabla 81.</b> Prueba triaxial CD de muestra con $S_w = 65\%$ (réplica 1). ....	199
<b>Tabla 82.</b> Prueba triaxial CD de muestra con $S_w = 80\%$ (réplica 1). ....	200
<b>Tabla 83.</b> Prueba triaxial CD de muestra con $S_w = 100\%$ (réplica 1). ....	201
<b>Tabla 84.</b> Prueba triaxial CD de muestra con $S_w = 0\%$ (réplica 2). ....	202
<b>Tabla 85.</b> Prueba triaxial CD de muestra con $S_w = 30\%$ (réplica 2). ....	203
<b>Tabla 86.</b> Prueba triaxial CD de muestra con $S_w = 55\%$ (réplica 2). ....	204
<b>Tabla 87.</b> Prueba triaxial CD de muestra con $S_w = 68\%$ (réplica 2). ....	205
<b>Tabla 88.</b> Prueba triaxial CD de muestra con $S_w = 84\%$ (réplica 2). ....	206
<b>Tabla 89.</b> Prueba triaxial CD de muestra con $S_w = 100\%$ (réplica 2). ....	207
<b>Tabla 90.</b> Prueba triaxial CD de muestra con $S_w = 0\%$ (suelo mezclado con sodio). .....	208
<b>Tabla 91.</b> Prueba triaxial CD de muestra con $S_w = 30\%$ (suelo mezclado con sodio).....	209
<b>Tabla 92.</b> Prueba triaxial CD de muestra con $S_w = 50\%$ (suelo mezclado con sodio).....	210
<b>Tabla 93.</b> Prueba triaxial CD de muestra con $S_w = 67\%$ (suelo mezclado con sodio).....	211
<b>Tabla 94.</b> Prueba triaxial CD de muestra con $S_w = 100\%$ (suelo mezclado con sodio).....	212

<b>Tabla 95.</b> Cohesión y ángulo de fricción. ....	213
<b>Tabla 96.</b> Resultado teórico de la resistencia al corte. ....	219
<b>Tabla 97.</b> Parámetros utilizados para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestras cargadas a 31.78 kPa. ....	221
<b>Tabla 98.</b> Datos para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestra cargada a 31.78 kPa (réplica 1). ....	221
<b>Tabla 99.</b> Simulación del comportamiento volumétrico de muestra cargada a 31.78 kPa (réplica 1). ....	222
<b>Tabla 100.</b> Datos para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestra cargada a 31.78 kPa (réplica 2). ....	223
<b>Tabla 101.</b> Simulación del comportamiento volumétrico de muestra cargada a 31.78 kPa (réplica 2). ....	223
<b>Tabla 102.</b> Datos para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestra cargada a 31.78 kPa (suelo mezclado con sodio). ....	224
<b>Tabla 103.</b> Simulación del comportamiento volumétrico de muestra cargada a 31.78 kPa (suelo mezclado con sodio). ....	225
<b>Tabla 104.</b> Parámetros utilizados para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestras cargadas a 63.57 kPa. ....	226
<b>Tabla 105.</b> Datos para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestra cargada a 63.57 kPa (réplica 1). ....	226
<b>Tabla 106.</b> Simulación del comportamiento volumétrico de muestra cargada a 63.57 kPa (réplica 1). ....	227
<b>Tabla 107.</b> Datos para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestra cargada a 63.57 kPa (réplica 2). ....	228
<b>Tabla 108.</b> Simulación del comportamiento volumétrico de muestra cargada a 63.57 kPa (réplica 2). ....	229
<b>Tabla 109.</b> Datos para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestra cargada a 63.57 kPa (suelo mezclado con sodio). ....	230
<b>Tabla 110.</b> Simulación del comportamiento volumétrico de muestra cargada a 63.57 kPa (suelo mezclado con sodio). ....	230
<b>Tabla 111.</b> Parámetros utilizados para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestras cargadas a 95.35 kPa. ....	231
<b>Tabla 112.</b> Datos para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestra cargada a 95.35 kPa (réplica 1). ....	231

<b>Tabla 113.</b> Simulación del comportamiento volumétrico de muestra cargada a 95.35 kPa (réplica 1). .....	232
<b>Tabla 114.</b> Datos para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestra cargada a 95.35 kPa (réplica 2). .....	233
<b>Tabla 115.</b> Simulación del comportamiento volumétrico de muestra cargada a 95.35 kPa (réplica 2). .....	234
<b>Tabla 116.</b> Datos para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestra cargada a 95.35 kPa (suelo mezclado con sodio). .....	235
<b>Tabla 117.</b> Simulación del comportamiento volumétrico de muestra cargada a 95.35 kPa (suelo mezclado con sodio). .....	235
<b>Tabla 118.</b> Parámetros utilizados para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestras cargadas a 190.71 kPa. ....	236
<b>Tabla 119.</b> Datos para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestra cargada a 190.71 kPa (réplica 1). .....	236
<b>Tabla 120.</b> Simulación del comportamiento volumétrico de muestra cargada a 190.71 kPa (réplica 1). .....	237
<b>Tabla 121.</b> Datos para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestra cargada a 190.71 kPa (réplica 2). .....	238
<b>Tabla 122.</b> Simulación del comportamiento volumétrico de muestra cargada a 190.71 kPa (réplica 2). .....	239
<b>Tabla 123.</b> Datos para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestra cargada a 190.71 kPa (suelo mezclado con sodio). .....	240
<b>Tabla 124.</b> Simulación del comportamiento volumétrico de muestra cargada a 190.71 kPa (suelo mezclado con sodio). .....	241
<b>Tabla 125.</b> Parámetros utilizados para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestras cargadas a 381.41 kPa. ....	242
<b>Tabla 126.</b> Datos para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestra cargada a 381.41 kPa (réplica 1). .....	242
<b>Tabla 127.</b> Simulación del comportamiento volumétrico de muestra cargada a 381.41 kPa (réplica 1). .....	243
<b>Tabla 128.</b> Datos para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestra cargada a 381.41 kPa (réplica 2). .....	244
<b>Tabla 129.</b> Simulación del comportamiento volumétrico de muestra cargada a 381.41 kPa (réplica 2). .....	245

<b>Tabla 130.</b> Comparación teórico-experimental de comportamiento volumétrico de muestras con grado de saturación de 60%. .....	246
<b>Tabla 131.</b> Comparación teórico-experimental de comportamiento volumétrico de muestras con grado de saturación de 80%. .....	247
<b>Tabla 132.</b> Comparación teórico-experimental de comportamiento volumétrico de muestras con grado de saturación de 100%. .....	249
<b>Tabla 133.</b> Análisis estadístico de confianza y correlación de resultados de simulación de comportamiento volumétrico.....	250

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Estructura Urbana Propuesta, b) Etapas de desarrollo (Secretaría de Desarrollo Urbano Vivienda y Obras Públicas, n.d.).....	34
<b>Figura 2.</b> a) Erosión superficial de talud carretero realizado en suelo dispersivo. b) Conductos localizados en el sub suelo de la zona. c) Caverna localizada en el sub suelo de la zona. d) Colapso de losa de concreto de canal de riego (Fotos cortesía de Gustavo Gallegos, 2022).....	35
<b>Figura 3.</b> Representación tridimensional de la superficie de fluencia (yield Surface) en el BBM(Gens et al., 2006). ....	39
<b>Figura 4.</b> a) Modelo para el comportamiento de histéresis de retención de agua. b) Colapso por carga (LC), Incremento de succión (SI) y reducción de succión (SD) curvas de fluencia para estados de esfuerzos isotrópicos (Wheeler, Sharma, et al., 2003). ....	42
<b>Figura 5.</b> a) Comportamiento de la histéresis bajo relación de vacíos constante. b) Representación de las superficies de fluencia SI, SD y LC en un espacio tridimensional (Sheng et al., 2004). ....	43
<b>Figura 6.</b> Ciclo de las rocas (Braja, 1985). ....	47
<b>Figura 7.</b> Fases de un suelo saturado .....	48
<b>Figura 8.</b> Representación gráfica de los esfuerzos efectivos en un suelo saturado. ....	49
<b>Figura 9.</b> Fases de un suelo no saturado(Briaud, 2013).....	50
<b>Figura 10.</b> Curva de compresibilidad del método de Jennings and knight.....	54
<b>Figura 11.</b> Proceso de dispersión en suelos sódicos. ....	56
<b>Figura 12.</b> Criterio de evaluación de los resultados de la prueba Pinhole por el Método C (ASTM D4647-93, n.d.). ....	61
<b>Figura 13.</b> SAR superpuesto sobre el cuadro TDS (Knodel, 1991).....	64
<b>Figura 14.</b> Potencial dispersivo vs TDS(Knodel, 1991). ....	65
<b>Figura 15.</b> Potencial Dispersivo Evaluado del análisis de sales disueltas en el agua de poro (Knodel, 1991). ....	65
<b>Figura 16.</b> Modelo capilar en suelos. ....	68
<b>Figura 17.</b> Curvas de retención agua - suelo típicas para Arcilla, limo y arena (Fredlund & Xing, 1994). ....	70
<b>Figura 18.</b> Curva de retención agua - suelo típica y sus componentes para un suelo limoso (Fredlund & Xing, 1994). ....	70

<b>Figura 19.</b> Esquema de las curvas de histéresis hidráulica al interior de la curva de retención partiendo de puntos sobre las ramas principales (Ramírez Jiménez, 2020). .....	71
<b>Figura 20.</b> Modelo Sólido Poroso (Rojas, 2008). .....	72
<b>Figura 21.</b> Curva de compresibilidad de suelos. ....	74
<b>Figura 22.</b> Marco elastoplástico para el comportamiento volumétrico de suelos no saturados (Rojas González, 2013). ....	75
<b>Figura 23.</b> Marco elastoplástico para el comportamiento volumétrico de suelos compactados (Rojas González, 2013). ....	78
<b>Figura 24.</b> a) Extracción de muestras alteradas e inalteradas del suelo en estudio. b) Almacenaje de muestras en el cuarto de temperatura controlada. ....	82
<b>Figura 25.</b> Muestras alteradas para obtener el perfil de humedad natural del sitio. .....	82
<b>Figura 26.</b> Muestras para la obtención del contenido de humedad del suelo. ....	83
<b>Figura 27.</b> Determinación del peso específico del suelo. ....	84
<b>Figura 28.</b> Determinación del peso relativo de sólidos. ....	84
<b>Figura 29.</b> a) Relaciones gravimétricas y volumétricas para suelos no saturados y b) Suelos saturados .....	85
<b>Figura 30.</b> Análisis Granulométrico por tamizado. ....	85
<b>Figura 31.</b> Análisis Granulométrico vía hidrómetro. ....	86
<b>Figura 32.</b> Determinación del Límite Líquido por el método a) Copa de Casagrande b) Cono Inglés. ....	87
<b>Figura 33.</b> Determinación del Límite de Contracción Lineal y Volumétrica. ....	87
<b>Figura 34.</b> Carta de Plasticidad. ....	88
<b>Figura 35.</b> Prueba de Crumb. ....	89
<b>Figura 36.</b> Prueba del Doble Hidrómetro. La probeta de la izquierda fue preparada de acuerdo al procedimiento de la norma ASTM D422 y la probeta de la derecha con el de la ASTM D4221. ....	89
<b>Figura 37.</b> Prueba de Pinhole. ....	90
<b>Figura 38.</b> Colocación del papel filtro a) Durante la calibración b) Sobre la muestra de suelo. ....	91
<b>Figura 39.</b> Prueba del Triple Odómetro. ....	94
<b>Figura 40.</b> Incremento de humedad a la muestra. ....	94
<b>Figura 41.</b> Prueba Triaxial CD. ....	95

<b>Figura 42.</b> Perfil estratigráfico encontrado en la zona de estudio.....	97
<b>Figura 43.</b> Perfil de humedad natural del sitio obtenido el día 2 de junio de 2023. .....	98
<b>Figura 44.</b> Clasificación del suelo de Rioverde, S.L.P., México con la carta de plasticidad. ....	100
<b>Figura 45.</b> Reacción exotérmica observada al hidratar el material.....	101
<b>Figura 46.</b> a) Agua destilada utilizada en la prueba de Crumb, b) Condición al término del ensaye. ....	102
<b>Figura 47.</b> Análisis granulométrico combinado.....	102
<b>Figura 48.</b> Medición del orificio a) Previo b) Y después del ensaye.....	103
<b>Figura 49.</b> Análisis mineralógico por difracción de rayos x del suelo dispersivo de la ciudad de Rioverde, S.L.P, México. a) Muestra de suelo en condiciones naturales, b) Muestra de suelo hidratada y secada en horno a 105 °C y c) Muestra de suelo mezclada con cloruro de sodio, hidratada y secada en horno a 105 °C.....	107
<b>Figura 50.</b> Comparación de espectros de Raman obtenidos del análisis del suelo dispersivo de la ciudad de Rioverde, S.L.P, México. de: a) Muestra de suelo en condiciones naturales y muestra de suelo, hidratada y secada en horno a 105° C, b) Muestra de suelo en condiciones naturales y muestra de suelo mezclada con carbonato de sodio, hidratada y secada en horno a 105° C y c) Muestra de suelo en condiciones naturales y muestra de suelo mezclada con cloruro de sodio, hidratada y secada en horno a 105 °C.....	109
<b>Figura 51.</b> Curva de grado de saturación contra contenido de humedad. ....	110
<b>Figura 52.</b> Curva de retención agua – suelo del suelo de Rioverde, S.L.P., México. .....	112
<b>Figura 53.</b> Curva de compresibilidad de ensayos edométricos. ....	113
<b>Figura 54.</b> Resultado de ensaye edométricos para determinar el potencial de colapso del suelo dispersivo de la ciudad de Rioverde, S.L.P. ....	114
<b>Figura 55.</b> a) Diagrama $Sw - \phi'$ , b) Diagrama $Sw - c'$ .....	116
<b>Figura 56.</b> Diagrama $q' - S$ para la trayectoria de humedecimiento del suelo dispersivo de la ciudad de Rioverde, S.L.P., México. ....	116
<b>Figura 57.</b> Ángulo de fricción a diferentes grados de saturación de un limo altamente compresible (Paz Cruz, 2012). ....	117
<b>Figura 58.</b> Resultados de ensayos triaxiales de una arena limosa, grado de saturación – esfuerzo desviador , para confinamientos de 49.05 kPa ,98.10 kPa y 147.15 kPa a) Trayectoria de Humedecimiento, b) Trayectoria de Secado (Leal Vaca, 2014).....	117

<b>Figura 59.</b> Análisis granulométrico combinado en suelo mezclado con carbonato de sodio. ....	118
<b>Figura 60.</b> Agrietamiento presentado en probetas fabricadas con suelo mezclado con carbonato de sodio.....	119
<b>Figura 61.</b> Análisis granulométrico combinado en suelo mezclado con cloruro de sodio. ....	120
<b>Figura 62.</b> Comparación de probetas fabricadas con carbonato de sodio y cloruro de sodio. ....	121
<b>Figura 63.</b> Curva de retención agua - suelo del suelo mezclado con cloruro de sodio.....	122
<b>Figura 64.</b> Comparativa de la curva de retención del suelo natural y suelo mezclado con cloruro de sodio. ....	123
<b>Figura 65.</b> a) Diagrama $S_w - \phi'$ , b) Diagrama $S_w - c'$ de suelo mezclado con cloruro de sodio. ....	124
<b>Figura 66.</b> Curva de compresibilidad de ensayos edométricos de suelo mezclado con cloruro de sodio.....	125
<b>Figura 67.</b> Resultado de ensaye edométricos para determinar el potencial de colapso del suelo mezclado con cloruro de sodio. ....	126
<b>Figura 68.</b> Simulación numérica de la curva de retención agua – suelo obtenida con el modelo sólido poroso. ....	127
<b>Figura 69.</b> Simulación numérica con el modelo sólido poroso de parámetros $f_s$ , $f_u$ , $f_d$ y $S_{uw}$ para: a) Trayectoria de humedecimiento, b) Trayectoria de secado....	128
<b>Figura 70.</b> Simulación numérica con el modelo sólido poroso de valores del parámetro $\chi$ en trayectoria de secado y humedecimiento. ....	128
<b>Figura 71.</b> a) Simulación numérica de la curva de retención del suelo mezclado con cloruro de sodio obtenida con el modelo sólido poroso; b) Comparación de la curva de retención del suelo natural y mezclado con cloruro de sodio. ....	129
<b>Figura 72.</b> Comparación teórica experimental de la resistencia al cortante del suelo en estudio. ....	130
<b>Figura 73.</b> Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 31.78 kPa, a) Réplica 1, b) Réplica 2 y c) Réplica suelo mezclado con cloruro de sodio. ....	131
<b>Figura 74.</b> Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestras cargadas a 31.78 kPa, a) Réplica 1, b) Réplica 2 y c) Réplica suelo mezclado con cloruro de sodio.....	132
<b>Figura 75.</b> Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 63.57 kPa, a) Réplica 1, b) Réplica 2 y c) Réplica suelo mezclado con cloruro de	

sodio.....	133
<b>Figura 76.</b> Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestras cargadas a 63.57 kPa, a) Réplica 1, b) Réplica 2 y c) Réplica suelo mezclado con cloruro de sodio.....	133
<b>Figura 77.</b> Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 95.35 kPa, a) Réplica 1, b) Réplica 2 y c) Réplica suelo mezclado con cloruro de sodio.....	134
<b>Figura 78.</b> Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestras cargadas a 95.35 kPa, a) Réplica 1, b) Réplica 2 y c) Réplica suelo mezclado con cloruro de sodio.....	135
<b>Figura 79.</b> Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 190.71 kPa, a) Réplica 1, b) Réplica 2 y c) Réplica suelo mezclado con cloruro de sodio.....	136
<b>Figura 80.</b> Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestras cargadas a 190.71 kPa, a) Réplica 1, b) Réplica 2 y c) Réplica suelo mezclado con cloruro de sodio.....	136
<b>Figura 81.</b> Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 381.41 kPa, a) Réplica 1, b) Réplica 2.....	137
<b>Figura 82.</b> Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 381.41 kPa, a) Réplica 1, b) Réplica 2.....	137
<b>Figura 83.</b> Comparación teórica – experimental de las curvas de compresibilidad de muestras a $S_w = 60\%$ . a) Réplica 1, b) Réplica 2 y c) Réplica suelo mezclado con cloruro de sodio.....	138
<b>Figura 84.</b> Comparación teórica – experimental de las curvas de compresibilidad de muestras a $S_w = 80\%$ . a) Réplica 1, b) Réplica 2 y c) Réplica suelo mezclado con cloruro de sodio.....	139
<b>Figura 85.</b> Comparación teórica – experimental de las curvas de compresibilidad de muestras a $S_w = 100\%$ . a) Réplica 1, b) Réplica 2 y c) Réplica suelo mezclado con cloruro de sodio.....	140
<b>Figura 86.</b> Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestra cargada a 381.41 kPa y $S_w = 41.48\%$ .....	141
<b>Figura 87.</b> Perfil estratigráfico y perfil de humedad de sitio de exploración.....	156
<b>Figura 88.</b> Límite líquido por método de cono inglés.....	157
<b>Figura 89.</b> Límite líquido por método de copa de Casagrande.....	158
<b>Figura 90.</b> Curva de calibración de matraz para prueba de peso específico relativo de sólidos.....	160
<b>Figura 91.</b> Curva granulométrica (prueba 1).....	164

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**

---

<b>Figura 92.</b> Curva granulométrica (prueba 2). .....	166
<b>Figura 93.</b> Curva granulométrica (prueba 3). .....	168
<b>Figura 94.</b> Curva granulométrica (suelo mezclado con carbonato de sodio).....	169
<b>Figura 95.</b> Curva granulométrica (suelo mezclado con cloruro de sodio).....	170
<b>Figura 96.</b> Análisis granulométrico combinado (prueba 1). .....	173
<b>Figura 97.</b> Análisis granulométrico combinado (prueba 2). .....	174
<b>Figura 98.</b> Análisis granulométrico combinado (prueba 3). .....	175
<b>Figura 99.</b> Análisis granulométrico combinado (suelo mezclado con carbonato de sodio).....	176
<b>Figura 100.</b> Análisis granulométrico combinado (suelo mezclado con cloruro de sodio).....	177
<b>Figura 101.</b> Curva de calibración de papel filtro Whatman No. 42 Lot No. 17398518.....	179
<b>Figura 102.</b> Curvas de retención agua-suelo, del suelo en condiciones naturales. ....	182
<b>Figura 103.</b> Curva de retención agua-suelo, del suelo mezclado con cloruro de sodio.....	183
<b>Figura 104.</b> Curvas de consolidación de muestras sujetas a distintas cargas (réplica 1). ....	186
<b>Figura 105.</b> Curvas de consolidación de muestras sujetas a distintas cargas (réplica 2). ....	189
<b>Figura 106.</b> Curvas de compresibilidad del suelo, a grado de saturación del 100%. ....	190
<b>Figura 107.</b> Curvas de consolidación del suelo mezclado con cloruro de sodio, ....	192
<b>Figura 108.</b> Curvas de compresibilidad del suelo mezclado con cloruro de sodio a grado de saturación del 100% .....	193
<b>Figura 109.</b> Curva de consolidación para evaluar el potencial de colapso del suelo en condiciones naturales. ....	194
<b>Figura 110.</b> Curva de consolidación para evaluar el potencial de colapso del suelo mezclado con cloruro de sodio. ....	195
<b>Figura 111.</b> Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 0% (réplica 1).....	196
<b>Figura 112.</b> Diagrama p'-q' de la muestra a un grado de saturación de 0% (réplica 1). ....	196

<b>Figura 113.</b> Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 30% (réplica 1).....	197
<b>Figura 114.</b> Diagrama $p'-q'$ de la muestra a un grado de saturación de 30% (réplica 1). .....	197
<b>Figura 115.</b> Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 50% (réplica 1).....	198
<b>Figura 116.</b> Diagrama $p'-q'$ de la muestra a un grado de saturación de 50% (réplica 1). .....	198
<b>Figura 117.</b> Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 65% (réplica 1).....	199
<b>Figura 118.</b> Diagrama $p'-q'$ de la muestra a un grado de saturación de 65% (réplica 1). .....	199
<b>Figura 119.</b> Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 80% (réplica 1).....	200
<b>Figura 120.</b> Diagrama $p'-q'$ de la muestra a un grado de saturación de 80% (réplica 1). .....	200
<b>Figura 121.</b> Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 100% (réplica 1).....	201
<b>Figura 122.</b> Diagrama $p'-q'$ de la muestra a un grado de saturación de 100% (réplica 1). .....	201
<b>Figura 123.</b> Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 0% (réplica 2).....	202
<b>Figura 124.</b> Diagrama $p'-q'$ de la muestra a un grado de saturación de 0% (réplica 2). .....	202
<b>Figura 125.</b> Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 30% (réplica 2).....	203
<b>Figura 126.</b> Diagrama $p'-q'$ de la muestra a un grado de saturación de 30% (réplica 2). .....	203
<b>Figura 127.</b> Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 55% (réplica 2).....	204
<b>Figura 128.</b> Diagrama $p'-q'$ de la muestra a un grado de saturación de 55% (réplica 2). .....	204
<b>Figura 129.</b> Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 68% (réplica 2).....	205
<b>Figura 130.</b> Diagrama $p'-q'$ de la muestra a un grado de saturación de 68% (réplica 2). .....	205

<b>Figura 131.</b> Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 84% (réplica 2).....	206
<b>Figura 132.</b> Diagrama $p'-q'$ de la muestra a un grado de saturación de 84% (réplica 2). .....	206
<b>Figura 133.</b> Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 100% (réplica 2).....	207
<b>Figura 134.</b> Diagrama $p'-q'$ de la muestra a un grado de saturación de 100% (réplica 2). .....	207
<b>Figura 135.</b> Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 0% (suelo mezclado con cloruro de sodio).....	208
<b>Figura 136.</b> Diagrama $p'-q'$ de la muestra a un grado de saturación de 100% (suelo mezclado con cloruro de sodio). .....	208
<b>Figura 137.</b> Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 30% (suelo mezclado con cloruro de sodio).....	209
<b>Figura 138.</b> Diagrama $p'-q'$ de la muestra a un grado de saturación de 30% (suelo mezclado con cloruro de sodio). .....	209
<b>Figura 139.</b> Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 50% (suelo mezclado con cloruro de sodio).....	210
<b>Figura 140.</b> Diagrama $p'-q'$ de la muestra a un grado de saturación de 50% (suelo mezclado con cloruro de sodio). .....	210
<b>Figura 141.</b> Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 67% (suelo mezclado con cloruro de sodio).....	211
<b>Figura 142.</b> Diagrama $p'-q'$ de la muestra a un grado de saturación de 67% (suelo mezclado con cloruro de sodio). .....	211
<b>Figura 143.</b> Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 100% (suelo mezclado con cloruro de sodio).....	212
<b>Figura 144.</b> Diagrama $p'-q'$ de la muestra a un grado de saturación de 100% (suelo mezclado con cloruro de sodio). .....	212
<b>Figura 145.</b> Diagrama de cohesión contra grado de saturación. ....	214
<b>Figura 146.</b> Diagrama de ángulo de fricción contra grado de saturación. ....	214
<b>Figura 147.</b> Diagrama de esfuerzo desviador contra succión. ....	215
<b>Figura 148.</b> Distribución de tamaño de poro teórica.....	216
<b>Figura 149.</b> Parámetros $f_s$ , $f_u$ , $f_d$ y $S_{uw}$ durante trayectoria de humedecimiento. ....	216
<b>Figura 150.</b> Parámetros $f_s$ , $f_u$ , $f_d$ y $S_{uw}$ durante trayectoria de secado. ....	217
<b>Figura 151.</b> Simulación numérica de la curva de retención agua – suelo obtenida	

con el modelo sólido poroso. ....	217
<b>Figura 152.</b> Valores del parámetro $\chi$ en trayectoria de secado y humedecimiento. ....	218
<b>Figura 153.</b> Valores del parámetro $\chi$ contra grado de saturación en trayectoria de humedecimiento. ....	218
<b>Figura 154.</b> Comparación teórico experimental de la cohesión a distintos grados de saturación. ....	220
<b>Figura 155.</b> Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 31.78 kPa (réplica 1). ....	221
<b>Figura 156.</b> Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestra cargada a 31.78 kPa (réplica 1). ....	222
<b>Figura 157.</b> Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 31.78 kPa (réplica 2). ....	223
<b>Figura 158.</b> Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestra cargada a 31.78 kPa (réplica 2). ....	224
<b>Figura 159.</b> Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 31.78 kPa (suelo mezclado con sodio). ....	225
<b>Figura 160.</b> Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestra cargada a 31.78 kPa (suelo mezclado con sodio). ....	226
<b>Figura 161.</b> Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 63.57 kPa (réplica 1). ....	227
<b>Figura 162.</b> Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestra cargada a 63.57 kPa (réplica 1). ....	228
<b>Figura 163.</b> Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 63.57 kPa (réplica 2). ....	228
<b>Figura 164.</b> Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestra cargada a 63.57 kPa (réplica 2). ....	229
<b>Figura 165.</b> Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 63.57 kPa (suelo mezclado con sodio). ....	230
<b>Figura 166.</b> Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestra cargada a 63.57 kPa (suelo mezclado con sodio). ....	231
<b>Figura 167.</b> Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 95.35 kPa (réplica 1). ....	232
<b>Figura 168.</b> Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestra cargada a 95.35 kPa (réplica 1). ....	233
<b>Figura 169.</b> Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas	

a 95.35 kPa (réplica 2). .....	233
<b>Figura 170.</b> Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestra cargada a 95.35 kPa (réplica 2). .....	234
<b>Figura 171.</b> Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 95.35 kPa (suelo mezclado con sodio). .....	235
<b>Figura 172.</b> Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestra cargada a 95.35 kPa (suelo mezclado con sodio). .....	236
<b>Figura 173.</b> Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 190.71 kPa (réplica 1). .....	237
<b>Figura 174.</b> Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestra cargada a 190.71 kPa (réplica 1). .....	238
<b>Figura 175.</b> Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 190.71 kPa (réplica 2). .....	239
<b>Figura 176.</b> Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestra cargada a 190.71 kPa (réplica 2). .....	240
<b>Figura 177.</b> Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 190.71 kPa (suelo mezclado con sodio). .....	241
<b>Figura 178.</b> Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestra cargada a 190.71 kPa (suelo mezclado con sodio). .....	242
<b>Figura 179.</b> Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 381.41 kPa (réplica 1). .....	243
<b>Figura 180.</b> Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestra cargada a 381.41 kPa (réplica 1). .....	244
<b>Figura 181.</b> Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 381.41 kPa (réplica 2). .....	244
<b>Figura 182.</b> Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestra cargada a 381.41 kPa (réplica 2). .....	245
<b>Figura 183.</b> Comparación teórica – experimental de las curvas de compresibilidad de muestras a $S_w = 60\%$ . a) Réplica 1, b) Réplica 2 y c) Réplica suelo mezclado con cloruro de sodio. ....	247
<b>Figura 184.</b> Comparación teórica – experimental de las curvas de compresibilidad de muestras a $S_w = 80\%$ . a) Réplica 1, b) Réplica 2 y c) Réplica suelo mezclado con cloruro de sodio. ....	248
<b>Figura 185.</b> Comparación teórica – experimental de las curvas de compresibilidad de muestras a $S_w = 80\%$ . a) Réplica 1, b) Réplica 2 y c) Réplica suelo mezclado con cloruro de sodio. ....	249

## **1. INTRODUCCIÓN**

Los principios de la mecánica de suelos clásica han sido establecidos para describir el comportamiento de los suelos en estado saturado y seco. Sin embargo, mantener estas condiciones en la naturaleza no siempre es posible sobre todo en regiones con climas áridos y semiáridos donde gran parte de los suelos se encuentran en estado no saturado.

Los suelos dispersivos son un tipo de suelos no saturados, para los cuales un cambio en el grado de saturación puede generar significantes modificaciones en su volumen y resistencia al corte.

En el presente trabajo, se determina de manera experimental el comportamiento volumétrico y de resistencia al corte del suelo dispersivo de la ciudad de Rioverde, S.L.P. y se adecua el modelo de suelos no saturados basado en esfuerzos efectivos para simular el comportamiento hidromecánico del mismo a distintos grados de saturación.

### **1.1 Justificación**

En la naturaleza los cambios de humedad del suelo son constantes, debido principalmente a las condiciones climáticas. También se producen de manera artificial debido a las actividades humanas. El caso más común son las fugas que se presentan en tuberías de drenaje o líneas de agua potable.

Estos cambios de humedad ocasionan importantes modificaciones en el comportamiento mecánico y volumétrico del suelo. Estos fenómenos pueden ser aún más complejos cuando se trata de suelos con características expansivas, dispersivas o colapsables cuyo comportamiento puede generar procesos de inestabilidad estructural sobre las construcciones desplantadas en ellos.

A lo largo de la historia se ha observado que la presencia de los suelos dispersivos ha traído consigo la falla de presas de tierra, terraplenes e infraestructura de ciudades, entre otras construcciones geotécnicas. Las fallas debidas a suelos dispersivos, en su mayoría ocurren a un gradiente hidráulico relativamente pequeño y sin carga significativa.

El presente trabajo de investigación se centra en el estudio de este tipo de suelos con la finalidad de modelar su comportamiento por medio del principio de esfuerzos efectivos para suelos no saturados.

El uso de esfuerzos efectivos en la modelación del comportamiento de suelos no saturados por algunos autores (Arroyo Chávez, 2015; Enríquez Haro, 2020; Pérez Garcia, 2019; Rojas González, 2013; Verdin Montes, 2018) ha demostrado que es posible desarrollar modelos más generales que no dependen de una gran cantidad de parámetros y con precisión suficiente.

El poder simular la resistencia y comportamiento volumétrico de los suelos dispersivos a varios grados de saturación permitirá mejorar los diseños y procesos constructivos de cualquier tipo de obra cimentada sobre estos suelos.

## **1.2 Descripción del problema**

La gran mayoría de los problemas que presentan los ingenieros civiles con los suelos no saturados debe a cambios en su contenido de humedad, lo que ocasiona que se presenten deformaciones volumétricas positivas (colapso) o negativas (expansión) (Barrera & Garnica, 2002).

Los suelos dispersivos o también conocido como suelos sódicos, son un tipo de suelo problemático susceptible a presentar colapso por la inestabilidad estructural que adquieren al entrar en contacto con el agua a causa del sodio intercambiable presente en su estructura.

Estos suelos en estado seco o contenidos de humedad bajos, presentan una alta resistencia aparente, la cual se ve reducida en presencia de agua ya que las partículas de suelo se repelen entre sí.

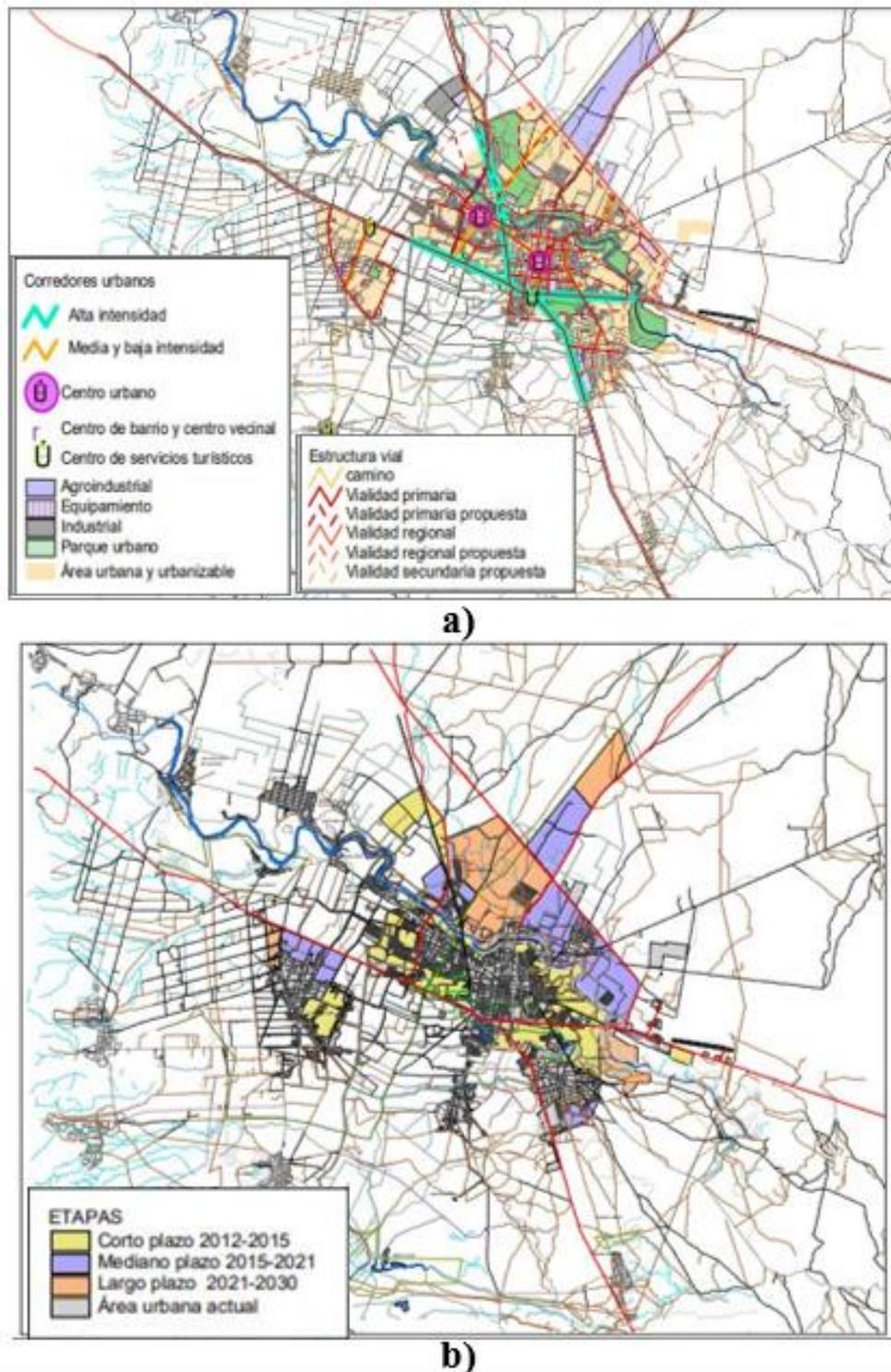
De acuerdo al mapa de suelos del mundo realizado por la FAO/UNESCO en 1976, se estima que el área total global de suelos salinos es de 397 millones de Hectáreas y de suelos sódicos es de 434 millones de hectáreas (**Tabla 1**). Los suelos dispersivos pueden ser encontrados regiones de Brasil, Vietnam, Australia, México, Tailandia, India, Venezuela y sur de Estados Unidos (Abbaslou et al., 2016).

**Tabla 1.** Frecuencia y extensión de suelos dispersivos en el mundo (Abbaslou et al., 2016).

Region	Area Total Mha	Suelos salinos Mha	%	Suelos sodicos Mha	%
Africa	1899.10	38.70	2.00	33.50	1.80
Asia, el Pacifico y Australia	3107.20	195.10	6.30	248.60	8.00
Europa	2010.80	6.70	0.30	72.70	3.60
America Latina	2038.60	60.50	3.00	50.90	2.50
Cerca del Este	1801.90	91.50	5.10	14.10	0.80
Norte America	1923.70	4.60	0.20	14.50	0.80
Total	12781.30	397.10	3.10	434.30	3.40

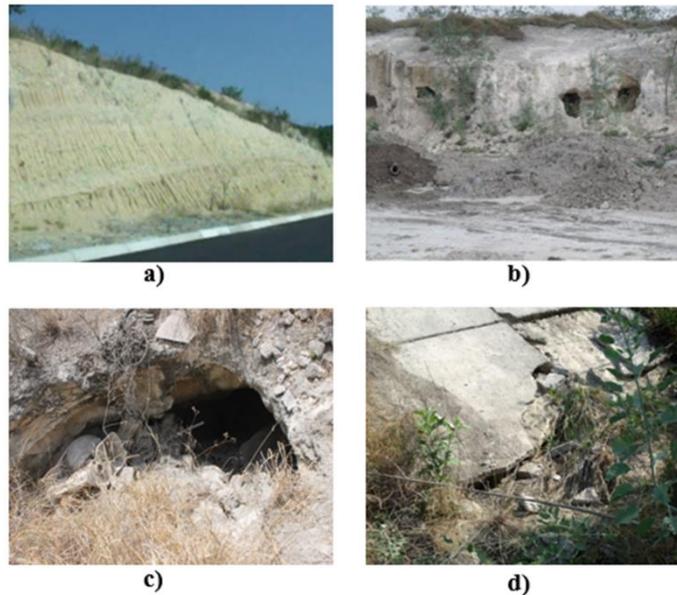
En la Zona Media del Estado de San Luis Potosí, se encuentra el municipio de Rioverde en las coordenadas geográficas: 100°00' longitud oeste y 21°56' latitud norte y a una altura de 980 metros sobre el nivel del mar.

En esta ciudad la estructura urbana propuesta para el crecimiento urbano e industrial dentro del Plan de Ordenación de la Zona Conurbada Intermunicipal de Rioverde y Ciudad Fernández 2012 – 2030 (Secretaria de Desarrollo Urbano Vivienda y Obras Publicas, n.d.) se localiza al norte (**Figura 1**) donde es posible observar suelos con características típicas de suelos dispersivos y problemas en la infraestructura debido al daño causado por este material (Gallegos Fonseca et al., 2014).



**Figura 1.** Estructura Urbana Propuesta, b) Etapas de desarrollo (Secretaria de Desarrollo Urbano Vivienda y Obras Públicas, n.d.).

Entre los problemas que se presentan en los suelos de la región está la erosión superficial de taludes (**Figura 2a**), tubificación que genera túneles (**Figura 2b**) y cavernas en el subsuelo (**Figura 2c**) y colapso de estructuras hidráulicas (**Figura 2d**).



**Figura 2.** a) Erosión superficial de talud carretero realizado en suelo dispersivo. b) Conductos localizados en el sub suelo de la zona. c) Caverna localizada en el sub suelo de la zona. d) Colapso de losa de concreto de canal de riego (Fotos cortesía de Gustavo Gallegos, 2022).

Para reducir los daños causados en obras construidas sobre suelos dispersivos se han desarrollado métodos que buscan eliminar esta propiedad del material utilizando estabilización química (Indraratna et al., 2008; Jafari et al., 2012; Marin Saucedo & Cieza Benavides, 2021; Savaş, 2016; Vakili et al., 2013) pero la aplicación de estos métodos en las obras puede incrementar el costo considerablemente dependiendo de la superficie y espesores que se requiera estabilizar.

Utilizar el concepto de esfuerzos efectivos de Bishop para la modelación de los suelos dispersivos, permitirá desarrollar un modelo general que utilice pocos parámetros los cuales se pueden obtener de manera experimental en el laboratorio. Con este modelo se podrá simular el comportamiento hidromecánico de los suelos dispersivos y así calcular los

esfuerzos y deformaciones para diseñar adecuadamente las estructuras que se desplanten sobre este tipo de material.

### **1.3 Hipótesis**

Por medio de un modelo hidro-mecánico basado en la ecuación de esfuerzos efectivos de Bishop, es posible simular el comportamiento volumétrico y de resistencia al corte de los suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde, S.L.P.

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1 Objetivo general**

Establecer un modelo basado en el principio de esfuerzos efectivos para suelos no saturados, que acople el comportamiento hidromecánico y que sea capaz de reproducir el comportamiento volumétrico, hidráulico y de resistencia de suelos dispersivos durante procesos de humedecimiento.

#### **1.4.2 Objetivos particulares**

1. Determinar el comportamiento volumétrico y resistencia al corte del suelo con características dispersivas de la ciudad de Rioverde S.L.P. a varios grados de saturación y diversos esfuerzos.
2. Determinar la curva de retención del suelo con características dispersivas de la ciudad de Rioverde S.L.P.
3. Adecuar el modelo de suelos no saturados basado en esfuerzos efectivos para incluir el comportamiento observado de los suelos dispersivos.

## **2. ANTECEDENTES**

La mecánica de suelos clásica se ha centrado en desarrollar teorías para los suelos saturados y secos. De tal manera que en la actualidad los ingenieros geotécnicos son capaces de entender y predecir de manera acertada su comportamiento en campo o en laboratorio.

La predicción del comportamiento de suelos no saturados es más complicada, debido a que sus propiedades varían con los cambios de humedad. Por esta razón, la mecánica de suelos clásica no podía ser aplicada y los métodos para predecir el comportamiento de los suelos no saturados se habían basado en formulaciones empírica o se analizaba el suelo considerándolo en estado saturado.

Es importante conocer de manera precisa el comportamiento de los suelos no saturados, ya que gran parte de la superficie terrestre se encuentra en este estado, a causa de las variaciones climáticas y/o actividades humanas.

En la literatura se ha detectado un interés de desarrollar modelos generales que usen teorías de mecánica de suelos no saturados (Barrera & Garnica, 2002).

Estos modelos ayudan en la identificación de los parámetros fundamentales y estados de referencia que gobiernan el comportamiento de los suelos, dando la posibilidad de asignarles valores numéricos. De esta forma, el estudio de los suelos no saturados puede hacerse de una manera metódica (E. E. Alonso et al., 1987).

El desarrollo de la mecánica de suelos no saturados se divide en tres periodos. En el primer periodo, antes de 1965, la mayoría de las investigaciones realizadas se enfocaron en demostrar la validez del concepto de esfuerzos efectivos para suelos no saturados, entre ellos se encuentra a Bishop, 1959 y Aitchison, 1960 logrando así modificar este concepto para analizar el comportamiento de estos suelos (Sivakumar, 1993).

En el segundo periodo, que abarca de 1965 a 1987, algunos autores como Matyas y Radhakrishna (1968), así como Fredlund (1979), realizaron investigaciones sobre la posibilidad de utilizar dos variables de estado de esfuerzo en lugar de una, siendo estas variables el “esfuerzo neto” (esfuerzo total menos presión de aire de poros) y “succión” (presión de aire de poros menos presión de agua de poros).

Con el esfuerzo neto y la succión se desarrollaron estructuras independientes para modelar comportamientos en el cambio de volumen y de corte en los suelos no saturados. Sin embargo, el comportamiento del cambio de volumen y de corte se trataron por separado (Sivakumar, 1993).

A partir de 1987 comienza el tercer periodo, donde el estudio del comportamiento de los suelos no saturados se realiza en términos del concepto de estado crítico y se trata de investigar su límite elástico cuando el suelo es sometido a ciclos de carga y descarga. Hasta entonces, el comportamiento del cambio de volumen y de corte de los suelos no saturados, se había tratado separadamente.

En años recientes los investigadores han comenzado a enlazar el comportamiento del cambio de volumen y la resistencia al corte de los suelos no saturados desarrollando modelos elasto-plásticos (Sivakumar, 1993).

Uno de los primeros modelos para describir el comportamiento de los suelos no saturados fue diseñado por Alonso y Hight en 1987 y Alonso, Gens y Josa en 1990, denominado Modelo Básico de Barcelona (por sus siglas en inglés BBM, Barcelona Basic Model). El cual toma como variables fundamentales el esfuerzo neto ( $\sigma_{ij} - u_a \delta_{ij}$ ) y la succión capilar ( $s = u_a - u_w$ ).

Donde:

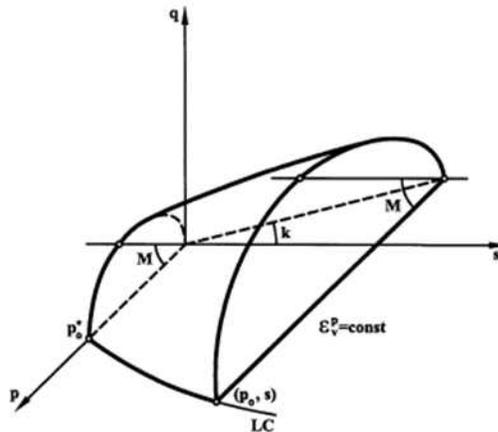
$\sigma_{ij}$ : Esfuerzos totales

$u_a$ : Presión del aire

$u_w$ : Presión del agua

$\delta_{ij}$ : delta de Kronecker

El modelo se muestra sintetizado en la **Figura 3**. En este, la superficie de fluencia tridimensional es representada en un espacio p-q-s (“p” es el esfuerzo neto medio, “q” es el esfuerzo desviador y “s” la succión (Gens et al., 1989).



**Figura 3.** Representación tridimensional de la superficie de fluencia (yield Surface) en el BBM(Gens et al., 2006).

Bajo condiciones saturadas ( $s = 0$ ), la superficie de fluencia corresponde a la elipse del modelo MCC (por sus siglas en inglés Modified Cam Clay, modelo utilizado en el análisis del comportamiento de suelos de grano fino saturados, bajo un amplio rango de estados de esfuerzo, basado en el concepto de estado crítico asociado a teorías plásticas) (Srinivasa Murthy et al., 1989).

El tamaño del dominio elástico aumenta con la succión. La tasa de aumento, representada por la curva de carga-colapso (en sus siglas en inglés LC, Loading-Collapse) es una de las características fundamentales del modelo.

Uno de los principales objetivos del Modelo Básico de Barcelona era intentar introducir la mecánica de los suelos no saturados en los estudios y avances, hasta entonces desarrollados, en la mecánica de suelos saturados. Se pretendía que el modelo pudiera ser utilizado para hacer predicciones cualitativas por simple manipulación a mano (Gens et al., 2006).

Este modelo puede describir gran número de características típicas del comportamiento mecánico de suelos no saturados (E. Alonso et al., 1990; E. E. Alonso et al., 1987) como lo es:

- La variación de expansión inducida por humedecimiento o deformaciones generadas por colapso para distintas magnitudes de esfuerzo aplicado.

- La inversión de las deformaciones volumétricas observadas en ocasiones durante el colapso inducido por humedecimiento
- El aumento de la resistencia al corte por la succión
- La independencia de la trayectoria de los esfuerzos asociada a trayectorias de humedecimiento y cuando la trayectoria de los esfuerzos implica secado o el aumento aparente de los esfuerzos de preconsolidación con la succión (Gens et al., 2006).

Posteriormente, se realizaron modelos utilizando como referencia los principios básicos del Modelo Básico de Barcelona, tratando de mejorar algunas de las deficiencias de este modelo.

Balmaceda et al. en 1992, realizaron un modelo capaz de reproducir las principales características del comportamiento de suelos no expansivos parcialmente saturados, siendo la más representativa, la capacidad de reproducir el colapso máximo.

Lo anterior se logró al utilizar una relación no lineal para la variación de la relación de vacíos con el logaritmo del esfuerzo medio ( $\ln p$ ), de modo que las presiones de colapso no se incrementan indefinidamente pero se obtiene un valor máximo antes de reducirse a cero al aplicar grandes magnitudes de esfuerzo medio (Balmaceda et al., 1995).

Wheeler y Sivakumar, en 1995, desarrollaron una estructura usando funciones basadas en resultados experimentales, la cual está definida en cuatro variables de estado: esfuerzo neto medio, esfuerzo desviador, succión y volumen específico.

En este modelo es posible predecir trayectorias para diferentes tipos de prueba de corte triaxial, que muestran una buena concordancia con el comportamiento observado si se realizara el ensayo. Además es posible predecir el desarrollo de la deformación por corte asumiendo una regla de flujo asociada (Wheeler & Sivakumar, 1995).

Posteriormente Wheeler, en 1996, dio paso a la introducción de parámetros hidráulicos en el modelo constitutivo, ya que los modelos existentes no proporcionaban información en variaciones de contenido de humedad y grado de saturación del suelo.

La estructura de su modelo fue extendida incluyendo relaciones que describen la variación del volumen específico de agua (siendo definido como volumen de agua dentro de un elemento dado de suelo) logrando así, predecir los cambios de succión durante ciclos de secado y humedecimiento, además de variaciones en el esfuerzo neto medio ( $p$ ) y esfuerzo desviador ( $q$ ) en ciclos de carga y descarga (Wheeler, 1996).

Vaunat et al., en el año 2000, presentaron el primer intento completo de unir el comportamiento hidráulico con un modelo mecánico para la descripción de los cambios en el contenido de humedad dentro de los macroporos de un suelo no saturado al humedecerse y secarse. Se tomo en cuenta la histéresis hidráulica del suelo y su dependencia en la relación de vacíos.

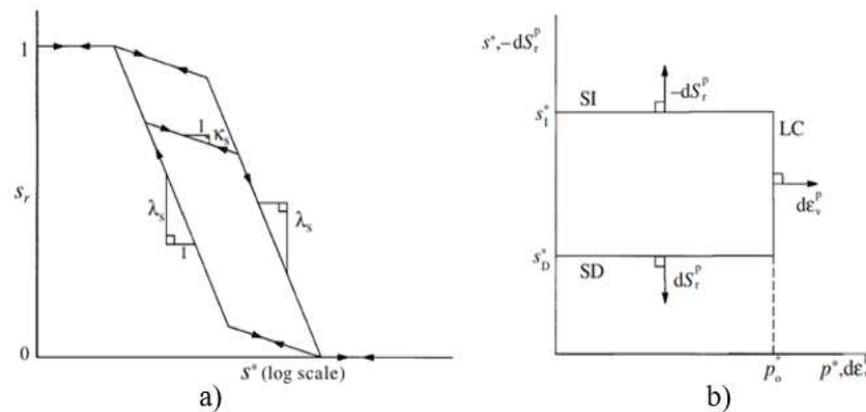
El modelo se basa en el Modelo Básico de Barcelona, incorpora dos superficies de fluencia adicionales derivadas de la histéresis hidráulica.

Una superficie de fluencia define los cambios plásticos en el contenido de agua durante el secado (aumento de succión, SI) y la otra superficie de fluencia durante el humedecimiento (disminución de succión, SD).

Estas dos superficies de fluencia están acopladas, ya que el movimiento de una provoca el movimiento de la otra, pero no están acopladas con la superficie de fluencia de carga-colapso (LC). Al incorporar las superficies de fluencia SI y SD con histéresis hidráulica, este modelo puede predecir el cambio irreversible del grado de saturación durante ciclos de humedecimiento y secado (Vaunat et al., 2000).

Wheeler et al. en el 2003, formularon un modelo en términos de esfuerzos efectivos, incorporando un componente rotacional de endurecimiento para tener en cuenta la influencia de la anisotropía plástica en las arcillas blandas, la cual fue validada por un programa sustancial de pruebas de trayectoria de esfuerzo triaxial drenada en varias etapas. El modelo se presenta tanto para las condiciones de esfuerzo simplificadas del ensayo triaxial como para las condiciones tridimensionales generalizadas, incluida la rotación de las direcciones principales de esfuerzo (Wheeler, Näätänen, et al., 2003).

Posteriormente Wheeler et al., en el mismo año, proponen un modelo que de igual manera acopla la histéresis hidráulica (representada en **Figura 4a**) con el comportamiento mecánico de los suelos no saturados empleando como variables el tensor de esfuerzo de Bishop y la succión modificada (succión multiplicada por la porosidad del suelo). Además, sugiere que al utilizar las variables de tensor de incremento de deformación convencional y el grado de saturación, la superficie de fluencia LC se puede simplificar a una línea recta vertical y las superficies de fluencia SI y SD, que surgen de la histéresis hidráulica, se pueden simplificar a líneas rectas horizontales como se muestra en la **Figura 4b**.



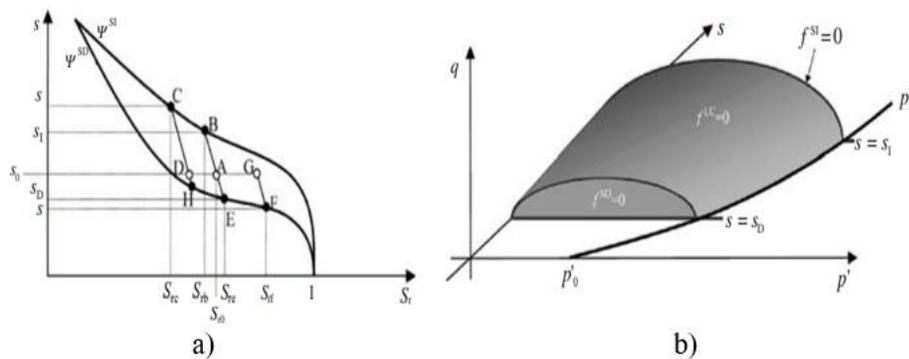
**Figura 4.** a) Modelo para el comportamiento de histéresis de retención de agua. b) Colapso por carga (LC), Incremento de succión (SI) y reducción de succión (SD) curvas de fluencia para estados de esfuerzos isotrópicos (Wheeler, Sharma, et al., 2003).

Las tres superficies de fluencia están completamente acopladas entre sí, ya que el movimiento de una provocará el movimiento de las otras dos. Este modelo es capaz de simular comportamientos básicos de los suelos como; la expansión, colapso y obtener un potencial de colapso máximo.

También se pueden encontrar las transiciones de respuesta adecuadas entre la fase saturada y no saturada, compresiones irreversibles durante las etapas de secado en los ciclos de humedecimiento y secado y la influencia que tiene este ciclo sobre el comportamiento posterior durante la carga isotrópica. (Wheeler, Sharma, et al., 2003).

En el 2004, Sheng et al. desarrollaron un modelo similar al de Wheeler et al. (2003) mostrando que se puede realizar desde un marco termodinámico, para ello utilizaron como variables el esfuerzo efectivo de Bishop y la succión, siendo esta última no afectada por la porosidad.

El modelo de la histéresis utilizado se presenta en la **Figura 5a**, la cual se compone de una curva de humedecimiento y una de secado con curvas de exploración que abarcan las dos. No se introduce ninguna dependencia de la relación de vacíos. Las dos principales curvas de retención de agua corresponden a las superficies de fluencia SI y SD que junto con la curva de fluencia LC constituyen la parte mecánica del modelo como se observa en la **Figura 5b**.



**Figura 5.** a) Comportamiento de la histéresis bajo relación de vacíos constante. b) Representación de las superficies de fluencia SI, SD y LC en un espacio tridimensional (Sheng et al., 2004).

En este modelo particular, las superficies de fluencia no están acopladas, sino que se mueven independientemente unas de otras y se reformulan las ecuaciones constitutivas para su implementación en códigos de elementos finitos, donde los desplazamientos y las presiones de poro son incógnitas primarias. Las predicciones cualitativas del modelo muestran que puede reproducir una serie de características importantes de los suelos no saturados, entre ellos las arcillas expansivas (Sheng et al., 2004).

Laloui y Nuth mencionan en (Laloui & Nuth, 2005) que el método más apropiado para el modelado de elementos finitos, es elegir leyes constitutivas que permitan una transición natural de estados saturados a no saturados y viceversa. En caso de que la ley constitutiva

saturada se base en los esfuerzos efectivos postulada por Terzaghi en 1923, el modelo no saturado debería recuperar este estado automáticamente cuando la succión desaparece.

A partir de esta idea, en 2009, Laloui y Nuth proponen un modelo en código de elemento finito en el que toma en cuenta la histéresis presente en ciclos de secado y humedecimiento. En el modelo muestran que la succión no es una variable de endurecimiento sino, un parámetro de forma para la superficie de fluencia expresada en el plano de succión matricial contra esfuerzo efectivo medio. Este modelo alienta a la comunidad geotécnica a aprovechar los avances desarrollados para esfuerzos efectivos en la mecánica de suelos clásica para describir el comportamiento de los suelos no saturados (Laloui & Nuth, 2009).

En el 2013 Rojas, desarrolló un marco teórico elastoplástico del comportamiento volumétrico de los suelos, capaz de modelar el fenómeno de colapso por humedecimiento por medio del principio de esfuerzos efectivos, incluyendo la histéresis de la curva de retención y el acoplamiento hidromecánico de los suelos. La ecuación de esfuerzos efectivos se deduce analíticamente y sus parámetros se obtienen por medio de un modelo sólido-poroso capaz de simular la distribución de agua en los poros del suelo para cualquier trayectoria de secado-humedecimiento.

Con este procedimiento es posible reproducir algunas particularidades del comportamiento volumétrico de los suelos no saturados que otros modelos que utilizan dos variables de esfuerzo, no pueden simular. De esta manera demuestra que sí existe una ecuación de esfuerzos efectivos para suelos no saturados con la cual es posible simular tanto su comportamiento volumétrico como su resistencia al corte; resultando en un marco teórico unificado de la mecánica de suelos que comprende a ambos tipos de suelos: los saturados y los no saturados incluyendo a los materiales compactados (Rojas González, 2013).

En el 2015, Zhou y Sheng desarrollaron un modelo avanzado para suelos no saturados a distintos valores de densidad. El modelo constitutivo se propone primero en el espacio de esfuerzos efectivos de Bishop y el grado efectivo de saturación, luego se deriva la matriz de rigidez para el método de elementos finitos en el espacio del esfuerzo neto y la saturación. Además se introduce la interacción hidromecánica de dos parámetros para cuantificar el

efecto de saturación en la compresibilidad de un suelo no saturado y el efecto del cambio de volumen en la variación de saturación (Zhou & Sheng, 2015).

En el 2015, Arroyo propone un modelo constitutivo de carácter elastoplástico para suelos sometidos a cualquier régimen de saturación, formulado en términos de esfuerzos efectivos sin introducir parámetros adicionales. El cual es capaz de reproducir el incremento de la resistencia del suelo inducido por los cambios de humedad, así como el colapso y la expansión (Arroyo, 2015).

En el 2018, Verdín Montes desarrolló un modelo constitutivo elastoplástico para describir el comportamiento de suelos expansivos utilizando la ecuación de Bishop de esfuerzos efectivos haciendo el parámetro  $\chi$  igual al grado de saturación, involucrando la curva característica y la trayectoria de secado-humedecimiento. En este modelo confirma que no es necesario considerar una superficie de fluencia adicional a la superficie de colapso y obtuvo valores próximos al comportamiento real del suelo, simulando expansión y colapso a distintas succiones y cargas aplicadas (Verdín Montes, 2018).

En el 2019, Pérez García desarrolló un modelo basado en el estado crítico y en la ecuación de esfuerzos efectivos propuesta por Bishop en 1959 para la cual determinó el parámetro  $\chi$  con el modelo hidráulico propuesto por Zhou y Sheng en (Zhou & Sheng, 2015), introduciendo así el fenómeno de la histéresis. La aplicación de este modelo dio buenos resultados de comportamiento de suelos no saturados, a excepción de los suelos que presentan dilatación en su comportamiento volumétrico, ya que no simula adecuadamente los resultados experimentales (Pérez García, 2019).

En el 2020, Enríquez Haro muestra las bases de un modelo acoplado del estado crítico que incluye el concepto de la superficie límite. Los datos numéricos los obtuvo por medio de la programación del modelo, en código de Matlab, comparándolos con datos experimentales de ensayos realizados por otros autores, deduciendo así que el modelo puede predecir el comportamiento de todo tipo de suelo (Enríquez Haro, 2020).

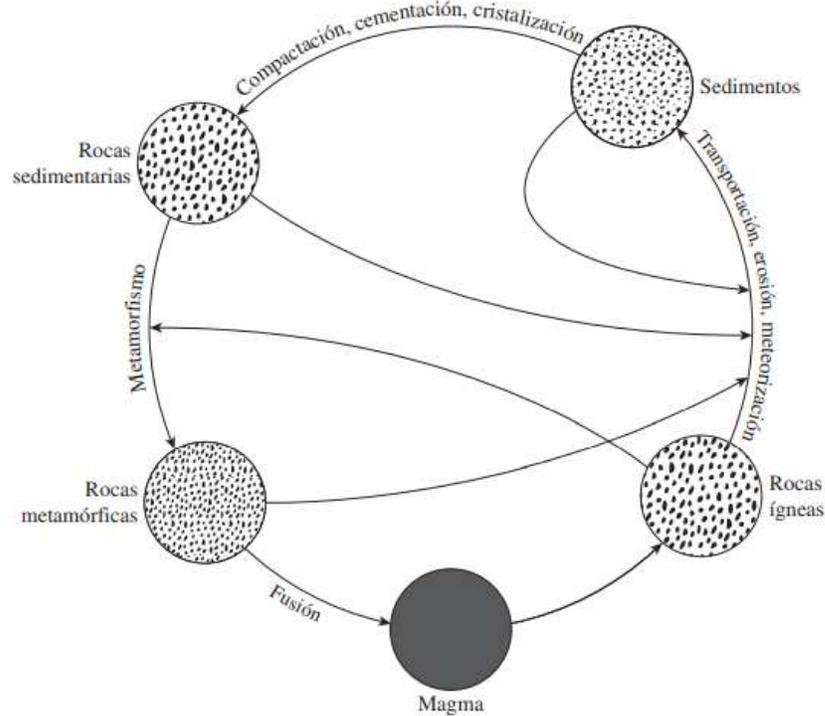
### **3. ESTADO DEL ARTE**

#### **3.1 El suelo**

El “suelo” es un término que ha sido definido de distintas maneras cuya interpretación varía de acuerdo a sus respectivos intereses, ya sea que la definición provenga del geólogo, del agrónomo o del ingeniero civil. La definición que se considera bastante completa es que el suelo es una delgada capa sobre la corteza terrestre de material que proviene de la desintegración y/o alteración física y/o química de las rocas y de los residuos de las actividades de los seres vivos que sobre ella se asientan (Crespo, 2004).

Las propiedades físicas del suelo están definidas por los minerales que forman las partículas del suelo y, por lo tanto, del tipo de roca del cual provienen. Estas rocas se pueden dividir en tres tipos que son: ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Las rocas ígneas se forman por el enfriamiento y la solidificación del magma expulsado del manto de la tierra. Las rocas están sujetas a procesos de descomposición por procesos mecánicos o químicos conocidos como meteorización dando lugar a fragmentos más pequeños, la acumulación de estos materiales forman a las rocas sedimentarias y si las rocas ya formadas son sometidas al calor y presiones altas sufrirán un ajuste estructural y mineralógico formando así a las rocas metamórficas (Braja, 1985).



**Figura 6.** Ciclo de las rocas (Braja, 1985).

Después de la meteorización el suelo formado puede permanecer en el lugar (suelo residual) o ser transportado por agentes naturales, estos últimos serán nombrados de acuerdo al agente que los haya transportado, teniendo así; los formados por el transporte y deposición de los glaciares (suelos glaciales), los transportados por corrientes de agua y depositados a lo largo de los arroyos (suelos aluviales), los formados por deposición en los lagos (suelos lacustres), formados por deposición en los mares (suelos marinos) y los transportados y depositados por acción del viento (suelos eólicos)(Braja, 1985).

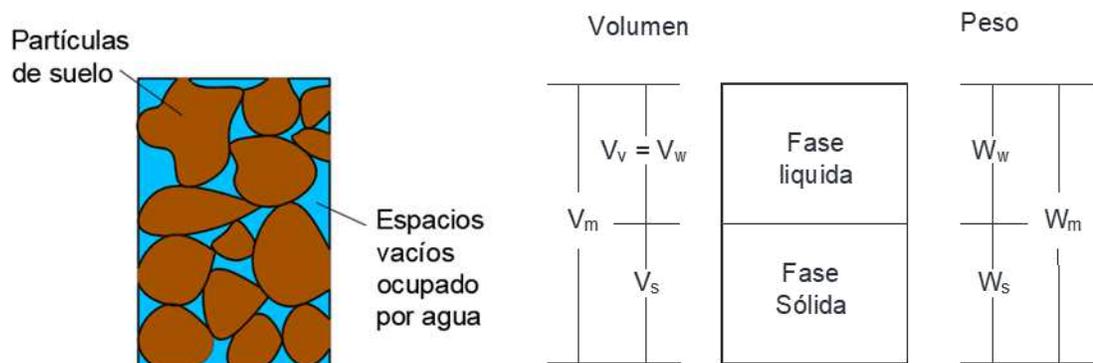
Independientemente de su origen, el tamaño de partícula de los suelos varía ampliamente, por lo que los ingenieros civiles han asignado nombres para su identificación. Las gravas son acumulaciones de fragmentos de rocas y que tienen más de 4.75 milímetros de diámetro. La arena es el nombre que se le da a los materiales de granos finos procedentes de la denudación de las rocas o de su trituración artificial, cuyas partículas varían entre 4.75 mm y 0.075 mm de diámetro. Los limos son suelos de grano fino cuyo tamaño de partícula está

comprendido entre 0.075 mm y 0.002 mm de diámetro. Las arcillas son partículas sólidas con diámetro menor a 0.002 mm (Crespo, 2004).

### 3.2 Suelos saturados

El desarrollo de la mecánica de suelos clásica se ha concentrado en el estudio de los suelos saturados. La razón es que el estado saturado constituye el estado crítico en cuanto a resistencia y asentamientos para los suelos. Otra causa es que la condición bifásica es más fácil de estudiar que la trifásica. (Alfaro Soto, 2008).

Los suelos saturados se consideran sistemas bifásicos en el cual los vacíos entre las partículas de suelo están ocupados totalmente por líquido, por lo que, las fases que constituyen este sistema serían fase líquida (normalmente agua) y fase sólida (partículas de suelo) como se muestra en la **Figura 7**.



**Figura 7.** Fases de un suelo saturado

Para estos suelos Terzaghi formuló el principio de esfuerzos efectivos en 1923 (Burland & Jennings, 1962).

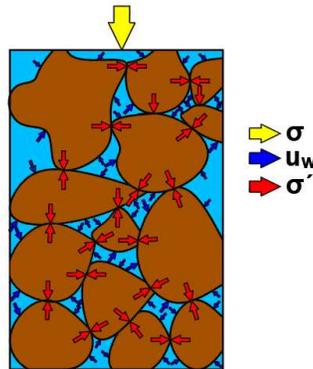
Estos esfuerzos controlan el comportamiento mecánico de los suelos, como lo es la resistencia al cortante y los cambios de volumen que se presentan durante procesos de consolidación (Leal-Vaca et al., 2013).

La ecuación de esfuerzos efectivos para suelos saturados se escribe de la forma de la Ec. 1, donde el esfuerzo efectivo ( $\sigma'$ ) es definido como el exceso de esfuerzo total aplicado ( $\sigma$ )

sobre la presión de agua en los poros ( $u_w$ ). Dicho en otras palabras, el esfuerzo efectivo es aquel que actúa solamente en la fase sólida del suelo.

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (1)$$

En la **Figura 8** se muestra cómo actúan los esfuerzos efectivos en un suelo saturado.



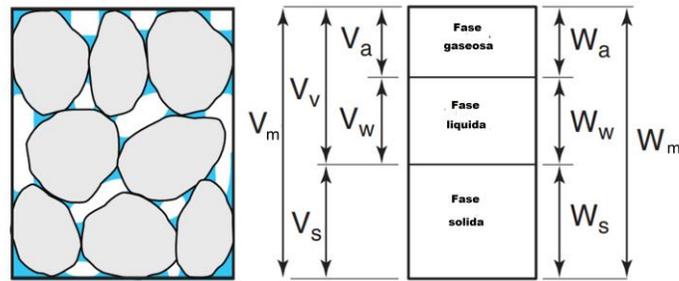
**Figura 8.** Representación gráfica de los esfuerzos efectivos en un suelo saturado.

### 3.3 Suelos no saturados

Una gran parte de la población del mundo se encuentra en centros urbanos en donde predominan suelos con niveles freáticos profundos, donde los vacíos del suelo no se encuentran totalmente ocupados por agua (Alfaro Soto, 2008).

Datos obtenidos en campo sobre la distribución del contenido de humedad con la profundidad, obtenidos en las últimas décadas en regiones áridas y semiáridas, han mostrado que la condición de saturación nunca es alcanzada. En otros casos, las lluvias provocan un avance de la humedad del suelo a un estado saturado por lo que la prevención con el estudio del comportamiento hidromecánico de las condiciones parcialmente saturadas es un objetivo de diseño adecuado (E. E. Alonso et. al., 1987).

Los suelos no saturados cuentan con tres fases: sólida, líquida y gaseosa como se muestra en la **Figura 9**.



**Figura 9.** Fases de un suelo no saturado (Briaud, 2013).

La fase sólida está formada por partículas de distintos tamaños y se caracteriza principalmente por su tamaño, forma, textura y composición química (cargas eléctricas y capacidad de intercambio catiónico).

La fase líquida está compuesta por agua y sales disueltas en ella y ha sido clasificada como; agua adsorbida en la partícula o como parte de la capa doble difusa que no puede ser separada por acciones hidrodinámicas, agua capilar que permanece en el suelo por acción de las fuerzas capilares y puede moverse por acción de estas y como agua gravitacional que es aquella que puede perder el suelo en condiciones de drenaje libre por gravedad. Por último tenemos la fase gaseosa, conformada por aire y vapor de agua (Pérez García, 2019).

Fredlund y Morgenstern en 1977, mencionaron que es necesario reconocer la existencia de una cuarta fase a la que nombra, interfaz entre el aire y agua o membrana contráctil. Por lo tanto, un suelo no saturado puede visualizarse como una mezcla de dos fases que llegan al equilibrio bajo gradientes de esfuerzo aplicados (partículas de suelo y membrana contráctil) y dos fases que fluyen bajo gradientes de esfuerzos aplicados (aire y agua).

Desde el punto de vista de las relaciones volumen-masa, los suelos no saturados se consideran como un sistema trifásico debido a que el volumen de la membrana contráctil es pequeño y su peso se considera dentro del peso del agua (Fredlund & Rahardjo, 1993).

La diversidad de suelos parcialmente saturados es amplia y dentro de la comunidad geotécnica a menudo han sido asociados a comportamientos peculiares como lo es la expansión y el colapso. Entre los suelos parcialmente saturados podemos encontrar; arcillas

expansivas, un amplio rango de depósitos aluviales, coluviales y eólicos, así como diferentes tipos de suelos cementado y suelos compactados (E. E. Alonso et al., 1987).

En términos de resistencia al esfuerzo cortante en suelos no saturados, existen tres parámetros que son necesarios para definir su envolvente de falla. Estos parámetros son: la cohesión efectiva ( $c'$ ), el ángulo de fricción efectivo ( $\phi'$ ) y cambio de la resistencia al corte generado por cambio en la succión matricial ( $\phi^b$ ). Los parámetros de resistencia al corte son importantes para el análisis de estabilidad de taludes y diseño de cimentaciones (Mohammad et al., 2006).

### **3.4 Colapso y Expansión**

Los fenómenos más característicos del comportamiento de los suelos no saturados son los relacionados con sus deformaciones volumétricas al modificar el grado de saturación. Estas deformaciones, si son positivas se considera colapso y si son negativas será expansión. Estos dos tipos de deformación pueden ser considerados como procesos de inestabilidad estructural, debido a que inducen discontinuidades en el comportamiento volumétrico del suelo sin modificación del estado de esfuerzo exterior, al variar las condiciones ambientales, como es el caso del contenido de humedad (Barrera & Garnica, 2002).

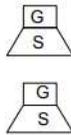
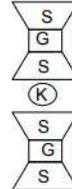
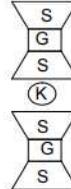
### **3.5 Suelos Expansivos**

Los suelos expansivos es el término que se les da a los suelos que sufren cambio considerable en su volumen, ya sea hinchamiento en la presencia de agua y contracción cuando las condiciones del ambiente ocasionen que el suelo pierda humedad. El tipo de mineral de estos suelos juega un rol importante en la cantidad de expansión que sufrirá el suelo expansivo, entre estos minerales se distinguen tres tipos: illita, caolinita y la montmorillonita (Gromko, 1974).

La illita, caolinita y la montmorillonita están compuestos por dos unidades básicas: sílice tetraédrica (cuatro átomos de oxígeno rodeando un átomo de sílice) y el aluminio octaédrico (seis hidroxilos rodeando un átomo de aluminio).

La combinación de unidades tetraédricas de sílice da una lámina de sílice y la combinación de unidades de aluminio octaédrico da una capa octaédrica también conocida como lámina de gibsita, a veces el magnesio puede sustituir a los átomos de aluminio en las láminas octaédricas formando así una lámina de brucita (Braja, 1985). En la **Tabla 2** se muestran algunas propiedades de los minerales mencionados anteriormente.

**Tabla 2.** Propiedades de los minerales arcillosos expansivos realizada por Lambe en 1959 (Barrera & Garnica, 2002).

Propiedades	MINERAL		
	Caolinita	Illita	Montmorilonita
Esquemas de la estructura			
G = lámina de Gibbsita S = lámina de Silicato K = ión de potasio			
Tamaño de las partículas	d= 0.3 a 3 μm e = 1/3 a 1/10 d	d= 0.1 a 2 μm e = 1/10 d	d= 0.1 a 1 μm e = 1/10 d
Superficie específica	5 – 30	65 – 100	600 – 800
Capacidad de intercambio catiónico por 100g de arcilla	3 – 15	10 – 40	80 – 150
Forma de la partícula	Aplanada	Aplanada	Aplanada
Expansión máximo para una presión de 0.1 t/p <sup>2</sup>	despreciable	350	1500
Expansión máxima para una presión de 0.2 t/p <sup>2</sup>	despreciable	150	350

### 3.6 Suelos colapsables

El colapso se puede denominar como la reducción de volumen irre recuperable producido por el aumento del grado de saturación del suelo manteniendo constante el estado de esfuerzo exterior (Barrera & Garnica, 2002). Por lo tanto, los suelos colapsables son suelos no saturados que sufren una gran reducción de volumen cuando son saturados. Este cambio de volumen no necesariamente es causado por la aplicación de cargas adicionales.

Estos suelos generalmente poseen una textura porosa con alta relación de vacíos y tienen densidades relativamente bajas. En contenidos de humedad natural bajos estos suelos poseen

una alta resistencia aparente, pero son altamente susceptibles a una alta reducción de vacíos durante el humedecimiento (Jotisankasa, 2005), en otras palabras, la textura metaestable colapsa porque los enlaces entre los granos se rompen cuando el suelo es mojado. El colapso en saturación solo toma un corto periodo de tiempo en desarrollarse (Rezaei et al., 2011).

Los ingenieros geotécnicos y geólogos han determinado que los suelos en depósitos aluviales y eólicos en zonas áridas son susceptibles a presentar algo de potencial de colapso (Azam, 2000; Reznik, 2007).

Existen métodos que evalúan ciertos parámetros físicos para la identificación de suelos colapsables. Algunos de estos se describen brevemente a continuación:

### **3.6.1. Método de Priklonski 1952**

Este método consiste en determinar un coeficiente de subsidencia ( $K_o$ ) que está en función de la relación que hay de la diferencia del contenido de humedad natural ( $\omega$ ) y el límite plástico (LP) entre el índice de plasticidad (IP) del suelo. Tal y como se muestra en la Ec. 2:

$$K_o = \frac{\omega - LP}{IP} \quad (2)$$

En la **Tabla 3** se muestra el criterio de clasificación de acuerdo al coeficiente de subsidencia de Priklonski.

**Tabla 3.** Criterio de clasificación por el método de Priklonski (AL-OBAIDI, 2003).

<b><math>K_o</math></b>	<b>Clasificación</b>
< 0	Altamente colapsable
> 0.5	No Colapsable
> 1	Expansivo

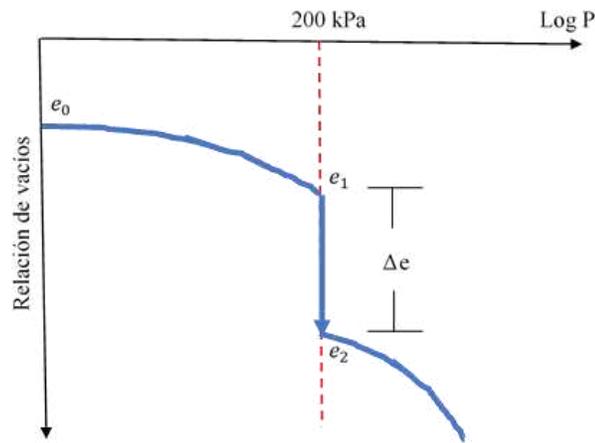
### **3.6.2. Método de Jenning and Knight 1975**

En este método se determina el potencial de colapso (CP) por medio de un ensaye de consolidación. El procedimiento consiste en preparar un anillo de consolidación con material

inalterado y manteniendo su contenido de humedad natural, donde la relación de vacíos de esta muestra será  $e_0$ .

Se aplican incrementos de carga hasta alcanzar una presión cercana a 200 kPa. La relación de vacíos obtenida a esta presión se conocerá como  $e_1$ . Posteriormente se satura el anillo por inundación durante 24 horas y se obtiene la relación de vacíos final  $e_2$  (**Figura 10**). El potencial de colapso se obtiene por medio de la Ec. 3.

$$CP = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_0} \times 100 \quad (3)$$



**Figura 10.** Curva de compresibilidad del método de Jennings and Knight.

Algunos problemas de cimentaciones asociados a suelos colapsables han sido correlacionados con el potencial de colapso por Clemence and Finbarr 1981, de tal manera que se ha obtenido la clasificación que se muestra en la **Tabla 4**.

**Tabla 4.** Relación del potencial de colapso con los problemas presentados en cimentaciones (AL-OBAIDI, 2003).

CP %	Severidad del Problema
0 - 1	Sin problema
1 - 5	Problema Moderado
5 - 10	Problema
10 - 20	Problema Severo
> 20	Problema Muy Severo

### 3.7 Suelos dispersivos

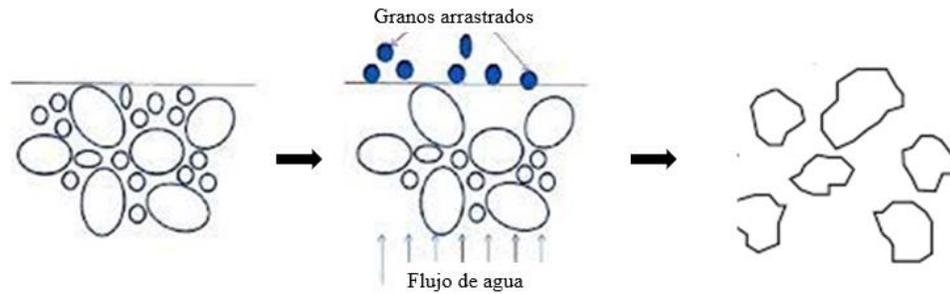
En la naturaleza se han encontrado arcillas altamente erosionables que se les ha denominado como suelos o arcillas dispersivas. Este tipo de suelos fue identificado, por primera vez, en el área de la agricultura aproximadamente hace 100 años pero se introdujo este tema en el área de la Ingeniería Civil entre los años de 1940 y 1960 (Garay & Alva, 1999).

Basado en los estudios realizados a suelos dispersivos encontrados alrededor del mundo, se ha determinado que las arcillas de origen aluvial y suelos derivados de rocas depositadas en ambientes marinos pueden tener características dispersivas, mientras que los suelos derivados de la meteorización de rocas ígneas y metamórficas y los suelos con alto contenido orgánico no suelen ser dispersivos. Estos suelos generalmente se encuentran en llanuras aluviales y depósitos de lagos, son abundantes en varias partes de Tailandia, Estados Unidos, Australia, México, Brasil, Sudáfrica y Vietnam (Bhuvaneshwari et al., 2007; Chandra & James, 1984).

En 1977 Sherard, J.L. y Decker, R.S. citado por Haramboure et al. (Glez Haramboure & Novoa, 2008) observaron que; la mineralogía, las propiedades químicas de la arcilla y la cantidad de sales (disueltas en los poros y en el agua que se infiltra en su estructura) tienen una fuerte relación con la erosión por dispersión de estos suelos. Por lo tanto, las arcillas que resisten la erosión interna se diferencian de las arcillas dispersivas por el tipo de cationes que contienen, siendo el sodio ( $\text{Na}^+$ ) el catión predominante en estas últimas, mientras que en las arcillas ordinarias predomina el Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), Potasio ( $\text{K}^+$ ) y Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) (Holmgren & Flanagan, 1977; Sherard et al., 1976).

Se tiene la teoría que los suelos dispersivos adquirieron el nivel de sodio en su estructura debido a que se originan del material producto de la degradación de rocas, que en algún tiempo geológico se encontraron sumergidas en el mar (Glez Haramboure & Novoa, 2008).

Cuando un suelo dispersivo entra en contacto con agua, la fracción de arcilla se comporta como una partícula de grano separado con una mínima atracción electroquímica por lo que no se adhiere o une con otras partículas de suelo (**Figura 11**) (Bhuvaneshwari et al., 2007).



**Figura 11.** Proceso de dispersión en suelos sódicos.

La presencia del sodio aumenta el espesor de la doble capa de agua difusa que rodea la partícula haciendo que las fuerzas repulsivas excedan a las fuerzas de atracción ocasionando que las partículas entren fácilmente en suspensión en presencia de agua (McElroy, 1987). Esto genera la erosión rápida e inesperada, incluso si el flujo es lento, lo que causa inestabilidad en la estructura del suelo viéndose reflejado en daños a las obras civiles desplantadas sobre este material.

### 3.8 Identificación de los suelos dispersivos

Para la identificación de los suelos dispersivos se debe iniciar con la visita a campo determinando si hay indicadores en la superficie, tales como; patrones de erosión inusuales como la presencia de taludes pronunciados debido a cortes profundos causados por la erosión, barrancos de erosión que se define como alcantarillas naturales profundas y estrechas, agujeros de paredes verticales, cuevas y túneles similares al lento proceso de disolución conocido como Karst, canales de agua natural con curvas cerradas de 90° con túneles y turbidez excesiva en cualquier almacenamiento de agua (Abbaslou et al., 2016).

Esta labor de identificación visual puede dificultarse, ya que en las regiones llanas no se puede llegar a observar arcillas dispersivas porque estas se encuentran ocultas, cubiertas por una capa de materia orgánica u otro material, sin embargo, otra característica particular de la presencia de suelo dispersivo es la escasa vegetación debido a la salinidad del material.

No solo en la naturaleza resulta difícil identificar los suelos dispersivos, si no que en el laboratorio también es un reto hacerlo, ya que este material es un tipo particular de suelo de

grano fino, que no se puede valorar si es dispersivo usando pruebas de identificación estándar como; análisis de tamaño de partículas, límites de Atterberg, y pruebas comparables (Abbaslou et al., 2020).

Los métodos físicos más usados para determinar la dispersividad en suelos arcillosos han sido la Prueba de Crumb, la Prueba del Doble Hidrómetro y el ensayo del agujero Pinhole. Sin embargo, los resultados obtenidos de estas pruebas han dado cierta incertidumbre en la clasificación de la categoría de media dispersividad, debido a la falta de criterios definidos para el caso donde se presenta bajas velocidades de flujo de agua. En tales casos es necesario realizar análisis químicos (Abbaslou et al., 2020; DJOKOVIĆ et al., 2018) además de los ya mencionados.

Entre los análisis químicos se encuentra la prueba de Porcentaje de Sodio Intercambiable (ESP) y la Relación de Absorción de Sodio (SAR), estas pruebas son comúnmente usadas en Estados Unidos, Australia y África del Sur (Bhuvaneshwari et al., 2007).

Es importante que todos los especímenes de suelo sean mantenidos y ensayados con su contenido natural de humedad, ya que el secado, especialmente el secado al horno puede alterar las características dispersivas (Sayehvand & Dehghani, 2014).

### **3.8.1. Pruebas Físicas**

#### **3.8.1.1. Prueba de Crumb**

La prueba de Crumb (antes llamada Prueba de coherencia agregada) desarrollada por Emerson en 1967, es un ensaye efectivo y rápido para identificar la dispersividad del suelo en campo y en laboratorio, aunque tiene ciertas limitaciones.

Kinney, J.L. en 1979 (Kinney, 1979) observó que no todos los suelos muestran reacción de dispersividad por la prueba de Crumb, tal es el caso de los suelos que contienen caolinita del cual se conoce que presenta problemas de dispersividad en campo, a pesar de esto si el ensaye indica dispersión, el suelo probablemente será dispersivo. Además, no es aplicable a suelos con 12% o menos partículas que pasan los 0.005mm y tengan un índice de plasticidad menor o igual a ocho.

Este ensaye puede realizarse para muestras inalteradas (Método A – Procedimiento para muestras de Suelo Natural) y muestras alteradas (Método B – Procedimiento para muestras de Suelo Remoldeado)(ASTM D6572-06, n.d.).

Consiste en preparar un espécimen cúbico de  $15 \pm 5$  mm de cada lado y cuidadosamente colocarlo en el fondo de un recipiente que contenga 250 ml de agua destilada, la dispersión es obtenida mediante la observación del comportamiento de la reacción del suelo al entrar en contacto directo con el agua, debido a que este comienza a hidratarse y sus partículas de tamaño coloidal tienden a deflocularse y entrar en suspensión(Alabdullah et al., 2022).

De acuerdo a lo anterior, la dispersión puede ser catalogada en cuatro grados siguiendo las pautas mencionadas en la Norma ASTM D 6572-06(ASTM D6572-06, n.d.):

Grado 1 (no dispersivo): sin reacción, el suelo puede desmoronarse y esparcirse, pero no se presenta turbidez por coloides suspendidos en el agua.

Grado 2 (Intermedio): reacción ligera, se considera como grado de transición. Una suspensión coloidal tenue apenas visible que provoca turbidez cerca de la superficie de la muestra de suelo.

Grado 3 (Dispersivo): reacción moderada, se observa fácilmente una nube de coloides en suspensión fuera de la superficie de la muestra de suelo que puede extenderse hasta 10 mm de la masa de la muestra a lo largo de la parte inferior del recipiente.

Grado 4 (Altamente Dispersivo): reacción fuerte, se observa una nube densa y profusa de coloides suspendidos completamente alrededor del fondo del recipiente. La dispersión es tan extensa que es difícil determinar la interfaz de la muestra de suelo original y la suspensión coloidal. En casos extremos toda el agua se vuelve demasiado turbia.

### **3.8.1.2. Ensayo del agujero Pinhole**

Sherard et al en 1973, citado por Amrita Maharaj and Philip Paige-Green (Maharaj & Green, 2015), desarrolló esta prueba de laboratorio para medir el potencial de erosión/dispersividad en muestras de suelo compactadas, simulando la acción del flujo de agua a través de tuberías/grietas en el suelo.

El ensaye consiste en dejar fluir agua destilada a través de un orificio de 1.00 mm de diámetro perforado en una muestra de suelo compactada a un determinado gradiente hidráulico (H) de 50, 180, 380 y 1020 mm. La resistencia a la erosión se determina visualmente por la presencia o ausencia de turbidez del agua que emerge, la medición de las velocidades del flujo y el diámetro final del orificio (Shogui et al., 2013). Si el orificio se erosiona rápidamente y el agua se vuelve turbia, el suelo es dispersivo. Si no hay erosión y el agua se mantiene clara se considerará no dispersivo.

La norma ASTM D 4647-93 (ASTM D4647-93, n.d.) indica tres métodos alternativos para clasificar la dispersividad de las arcillas :

**Método A:**

D1, D2 (Dispersivo)– La muestra de suelo falla rápidamente bajo un gradiente hidráulico de 50 mm.

ND4, ND3 (Dispersión ligera y/o moderada) – La muestra de suelo se erosiona lentamente bajo un gradiente hidráulico de 50 o 180 mm.

ND2, ND1 (No dispersivo) – La muestra de suelo presenta ligera o nula erosión coloidal bajo los gradientes hidráulicos de 380 o 1020 mm.

**Método B:**

D (Dispersivo) - La muestra de suelo falla rápidamente bajo un gradiente hidráulico de 50 mm.

SD (Dispersión ligera) - La muestra de suelo se erosiona lentamente por debajo de un gradiente hidráulico de 180 mm.

ND (No Dispersivo) - La muestra de suelo presenta muy ligera o nula erosión coloidal bajo un gradiente hidráulico de 380 mm.

**Método C**

D1, D2 (Dispersivo)– La muestra de suelo falla rápidamente bajo un gradiente hidráulico de 50 mm.

ND4, ND3 (Dispersivo) - La muestra de suelo se erosiona lentamente bajo un gradiente hidráulico de 50, 180 o 380 mm.

ND2, ND1 (No Dispersivo) - La muestra de suelo presenta muy ligera o nula erosión coloidal bajo un gradiente hidráulico de 380 mm.

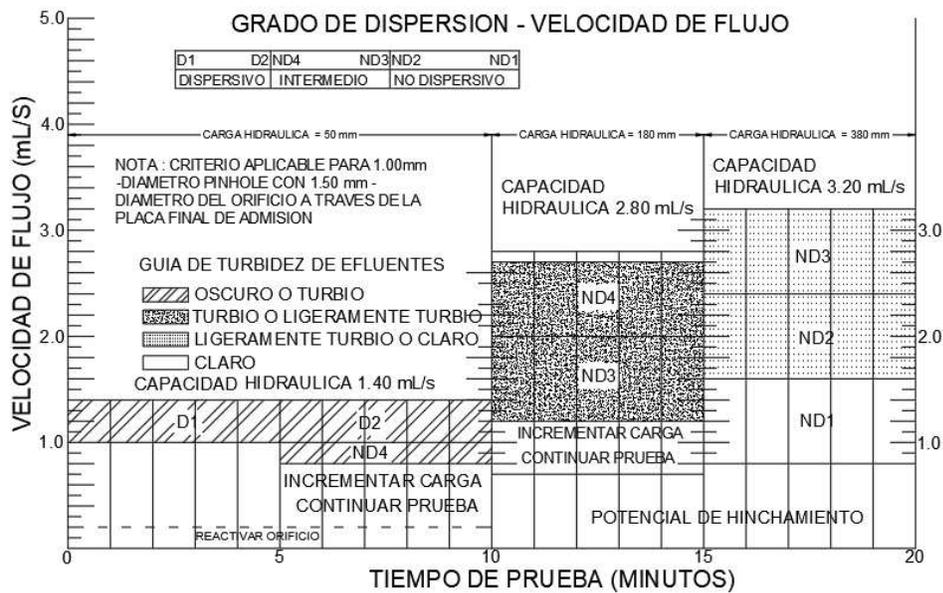
En el método A y C es necesaria la evaluación de la turbidez del agua que emerge, el tamaño final del orificio y la velocidad del flujo para poder clasificar las características dispersivas del suelo. El método B solo requiere la evaluación de la turbidez del agua que emerge y el tamaño final del orificio para poder clasificar las características dispersivas del suelo (Shogui et al., 2013), estos últimos dos factores son considerados los más importantes cuando la prueba se desarrolla en muestras inalteradas.

Se puede obtener resultados similares en todos los métodos, por lo que cualquiera de ellos puede ser utilizado para clasificar la dispersividad de las arcillas. El criterio de evaluación de los métodos se resume en la **Tabla 5** y **Figura 12**.

Este ensaye no es aplicable para suelos con menos de 12% de partículas que pasan los 0.005mm y tengan un índice de plasticidad menor o igual a 4 debido a que dichos suelos presentan poca resistencia a la erosión sin importar sus características dispersivas (ASTM D4647-93, n.d.)

**Tabla 5.** Criterio de evaluación de los resultados de la prueba Pinhole por el Método A y B (ASTM D4647-93, n.d.).

Grado de Dispersión	Cargas de presión estática (mm)	Tiempo de Prueba por Carga (min)	Velocidad Final del Flujo a través del espécimen mL/s	Turbidez del Flujo al final de la prueba		Ancho del Orificio despues de la prueba (mm)
				Lateral	Parte Superior	
D1	50	5	1.00 - 1.40	Oscuro	Muy Oscuro	≥ 2.00
D2	50	10	1.00 - 1.40	Moderadamente Oscuro	Oscuro	> 1.50
ND4	50	10	0.80 - 1.00	Ligeramente Oscuro	Moderadamente Oscuro	≤ 1.50
ND3	180	5	1.40 - 2.70	Muy poco Visible	Ligeramente Oscuro	≥ 1.50
	380	5	1.80 - 3.20			
ND2	1020	5	> 3.00	Claro	Muy poco	< 1.50
ND1		5	≤ 3.00	Perfectamente Claro	Perfectamente Claro	1.00
<b>Método B</b>						
D	50	10	...	Ligeramente Oscuro a Oscuro	Muy Oscuro a Moderadamente Oscuro	≥ 1.50
SD	180-380	5	...	Muy poco Visible	Ligeramente Oscuro	≥ 1.50
ND	380	5	...	Claro	Muy poco Visible a Claro	< 1.50



**Figura 12.** Criterio de evaluación de los resultados de la prueba Pinhole por el Método C (ASTM D4647-93, n.d.).

### 3.8.1.3. Prueba del Doble Hidrómetro

La prueba del Doble Hidrómetro, también conocida como el ensaye del Servicio de Conservación del Suelo (SCS) o ensaye de Dispersión en Porcentaje, fue desarrollado por G. M. Volk en 1937 (Volk, 1938). Es uno de los ensayes más empleados para determinar el potencial de dispersión de los suelos.

Consiste en determinar de manera conjunta la distribución de tamaño de partícula utilizando dos hidrómetros. En uno de los hidrómetros se sigue la prueba estándar de granulometría por hidrómetro de la norma ASTM D4221, donde la muestra de suelo se mezcla en agua destilada con un agente defloculante; mientras que en el otro hidrómetro, se realiza sin agitación mecánica y sin agregar agente defloculante (Maharaj & Paige-Green, 2013).

El porcentaje de dispersión se calcula por medio de la Ec. 4, dividiendo el porcentaje de partículas de 0.005 mm de diámetro, resultado obtenido en el hidrómetro sin defloculante entre el obtenido en el ensaye estándar de granulometría por hidrómetro (ASTM D4221-99, n.d.):

$$\% \text{ Dispersión} = \frac{\% \text{ que pasa } 5\text{-}\mu\text{m en la prueba sin defloculante}}{\% \text{ que pasa } 5\text{-}\mu\text{m por el metodo de la prueba D422 con defloculante}} \quad (4)$$

Sherard et al en 1976, citado por Hilda Garay Porteros y Jorge E. Alva Hurtado (Garay & Alva, 1999), determinaron el criterio de evaluación para los resultados de los suelos ensayados por esta prueba donde indican que los suelos susceptibles a la dispersión y a las fallas de tubificación presentan un porcentaje de dispersión mayor que el 50%, mientras que los suelos que no son susceptibles presentan resultados menores que el 15%. El criterio de evaluación del porcentaje de dispersión se muestra en la **Tabla 6**.

**Tabla 6.** Criterio de evaluación de los resultados de la Prueba del Doble Hidrómetro.

Grado de Dispersión	Porcentaje de Dispersión
No Dispersivo	< 30 %
Intermedio	30 % – 50 %
Dispersivo	>50 %

Esta prueba es solo aplicable a suelos con un índice de plasticidad mayor a 4 y que contengan más del 12% de partículas que pasan 0.005 mm. Si la prueba la realiza varias veces el mismo operador con el mismo equipo y se obtienen resultados distintos, no debe ser considerado como sospechoso a menos que difiera más del 11.10% de su media (ASTM D4221-99, n.d.).

### 3.8.2. Pruebas Químicas

#### 3.8.2.1. Prueba de Porcentaje de Sodio Intercambiable (ESP)

Es la técnica analítica frecuentemente utilizada para determinar el potencial de dispersión del suelo. Para obtener el parámetro ESP es necesario tener la Capacidad de Intercambio de Cationes del suelo (CEC, meq/100g) y el sodio intercambiable medido (Na+, meq/100g) (Sayehvand & Dehghani, 2014; Siosemarde et al., 2010) quedando definido por la Ec. 5:

$$ESP = \left( \frac{Na^+}{CEC} \right) \times 100 = \left( \frac{Na^+}{Na^+ + Mg^{2+} + K^+ + Ca^{2+}} \right) \times 100 \quad (5)$$

El criterio utilizado para clasificar los suelos dispersivos por medio del parámetro ESP se muestra en la **Tabla 7**.

**Tabla 7.** Criterio para clasificar suelos dispersivos usando el parámetro ESP(Knodel, 1991).

ESP	Grado de Dispersio
<7	No Dispersivo
7 to 10	Intermedio
>10	Dispersivo

### **3.8.2.2.Relación de Absorción de Sodio (SAR)**

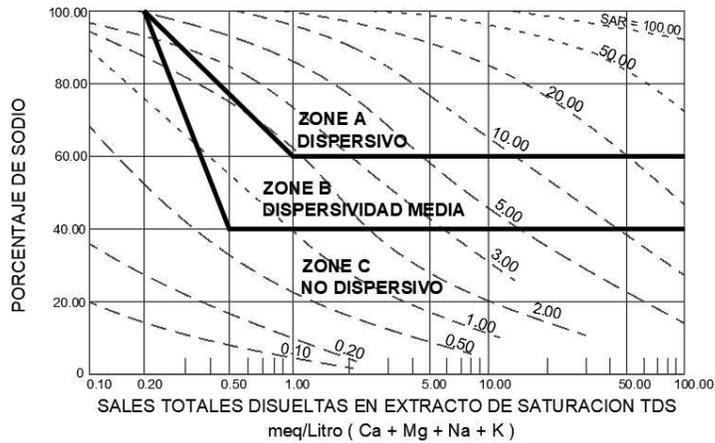
El SAR es otro parámetro comúnmente evaluado para cuantificar el papel del sodio con respecto a la dispersión cuando sales libres están presentes (Knodel, 1991). Se define por la Ec. 6:

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{0.50(Ca^{2+}+Mg^{2+})}} \quad (6)$$

Donde las cantidades de cationes de Sodio, Calcio y Magnesio ( $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ ), que se encuentran contenidos en el agua de poro, son expresados en meq/L.

La aplicación del parámetro SAR en la identificación de suelos dispersivos se ve limitada, ya que no es aplicable si no existen suficientes cationes libres en el agua de los poros, lo cual se presenta comúnmente en las arcillas dispersivas cuyos cationes de sodio están adheridos a la doble capa de difusión de las partículas (Glez Haramboure & Novoa, 2008).

Investigadores Australianos demostraron que todos los suelos eran dispersivos si el SAR excedía el valor de 2. Esto muestra una razonable relación para los suelos con valores de sales totales disueltas (TDS) entre 0.50 y 3.0 meq/L, pero no para suelos fuera de este rango como se muestra en la **Figura 13** (Knodel, 1991).



**Figura 13.** SAR superpuesto sobre el cuadro TDS (Knodel, 1991).

El método recientemente aceptado para evaluar la influencia química en el comportamiento dispersivo, es el denominado Método Químico de Sherard. El cual ha sido elaborado a partir de que el fenómeno de dispersión de la arcilla es químico y la tendencia a la erosión depende de sus propiedades químicas de sales disueltas en el agua de poro. La precisa y correcta interpretación de los resultados de las pruebas químicas debe llevar a una evaluación fiable de la dispersividad del suelo (Inglés et al., 1970).

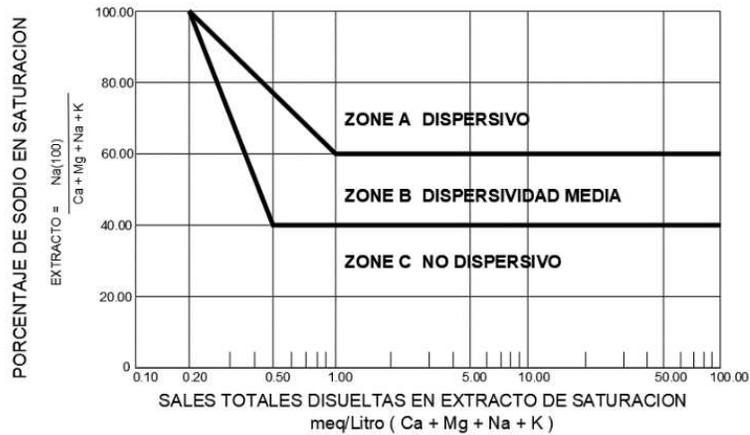
De acuerdo a este método, el potencial de dispersión es evaluado con respecto al tipo y cantidad de cationes presentes en el agua de poro de la muestra de suelo. Para este objetivo, un extracto de saturación es preparado de la muestra de suelo, así sus cuatro principales cationes (calcio, magnesio, sodio y potasio) son determinados en términos de miliequivalentes por litro y la cantidad total de sales disueltas (TDS), así como el porcentaje de sodio (PS) son calculados por la Ec. 7 (Shogui et al., 2013):

$$\text{Porcentaje de Sodio (PS)} = \frac{Na^+}{\text{Sales Totales Disueltas}} \times 100 = \frac{Na^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+} \quad (7)$$

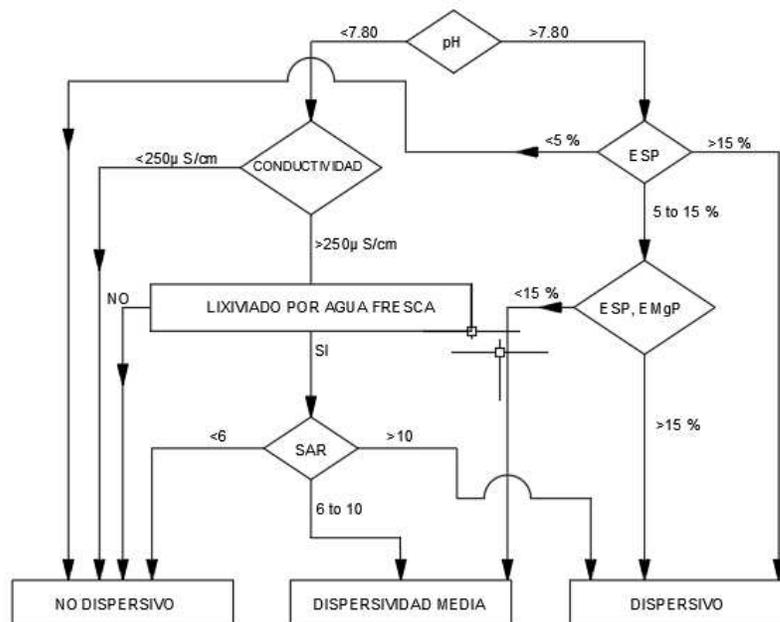
Los métodos químicos son desarrollados por los procesos establecidos en la publicación del Departamento de Agricultura de Estados Unidos llamada “Diagnóstico y Mejora de Suelos Salinos y Alcalinos” (Richards, 1954).

La **Figura 14** ha sido usada con éxito en Estados Unidos, donde los datos preliminares de suelos de un área determinada demuestran una buena correlación con el ensaye Pinhole. Sin

embargo, no fue acertado para suelos ensayados en el Sur de África y Zimbabwe. Por esta razón, un procedimiento fue desarrollado para evaluar los efectos de las sales disueltas en el agua de poro sobre el potencial de dispersión, como se muestra en la **Figura 15** (Knodel, 1991), aunque a la fecha no ha sido ampliamente usado en Estados Unidos y no se han desarrollado estudios correlativos.



**Figura 14.** Potencial dispersivo vs TDS(Knodel, 1991).



**Figura 15.** Potencial Dispersivo Evaluado del análisis de sales disueltas en el agua de poro (Knodel, 1991).

### 3.9 Estados de esfuerzo en suelos no saturados

El comportamiento mecánico de un suelo, cambio de volumen y comportamiento de resistencia al corte, se puede describir en términos de estado de esfuerzo. El estado de esfuerzo consiste en una combinación de variables de esfuerzo, las cuales deben ser independientes de las propiedades físicas del suelo y cuya cantidad requerida para la descripción del estado de esfuerzo dependerá del número de fases que se involucran en su estructura (Fredlund & Rahardjo, 1993).

El análisis de esfuerzo para un suelo no saturado es presentado como una extensión de la teoría de suelos saturados, Bishop en 1959 propuso la Ec. 8 en la que incluye un parámetro  $\chi$  relacionado al grado de saturación del suelo y fue el más general al incluir la presión en la fase gaseosa del suelo (Burland & Jennings, 1962).

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (8)$$

En la ecuación anterior, el parámetro  $\chi$  ocupa valores de 0 a 1, siendo 0 para suelos secos y 1 para suelos saturados, reduciendo a la ecuación de Terzaghi con este último valor.

El término  $u_a - u_w$  corresponde a la succión matricial en los poros, el cual contribuye en incrementar la resistencia al esfuerzo cortante de suelos finos (Lu & Likos, 2006).

Posteriormente más ecuaciones para el cálculo de los esfuerzos efectivos en los suelos no saturados fueron propuestas, estas se resumen en la **Tabla 8**.

**Tabla 8.** Ecuaciones de esfuerzos efectivos presentadas por diversos autores (Fredlund & Rahardjo, 1993).

Ecuación	Descripción de Variables	Autor	Año
$\sigma' = \sigma - \beta' u_w$	$\sigma'$ : Esfuerzo efectivo $\sigma$ : Esfuerzos totales Factor de unión que es una medida del número de uniones bajo tensión efectiva para contribuir a la resistencia al corte del suelo $\beta'$ : $u_w$ : Presión de agua en los poros	Croney et al.	1958
$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi (u_a - u_w)$	$u_a$ : Presión de aire en los poros $\chi$ : Un parámetro relacionado al grado de saturación del suelo	Bishop	1959
$\sigma' = \sigma - \psi p''$	$p''$ : Presión de agua negativa en los poros tomada como un valor positivo $\psi$ : Succión, con valores de 0 a 1	Aitchison	1961
$\sigma' = \sigma - \beta p''$	$\beta$ : Factor estadístico del mismo tipo como el área de contacto	Jennings	1961
$\sigma' = \sigma - u_a + \chi_m (h_m + u_a) + \chi_s (h_s + u_a)$	$\chi_m$ : Parámetro de esfuerzo efectivo para la succión matricial $h_m$ : Succión matricial $\chi_s$ : Parámetro de esfuerzo efectivo para la succión osmótica $h_s$ : Succión osmótica	Richards	1966
$\sigma' = \sigma - \chi_m p''_m + \chi_s p''_s$	$p''_m$ : Succión matricial $p''_s$ : Succión osmótica $\chi_m$ y $\chi_s$ : Parámetros del suelo dependientes de la ruta de esfuerzos, con valores de 0 a 1	Aitchison	1973

### 3.10 Succión

El agua en un suelo que no esté saturado se encuentra a una presión menor que la atmosférica por una cantidad la cual es conveniente llamar succión cuyas unidades son Pascales (Davidson & Schofield, 1942). Este término es esencial, debido a que afecta las propiedades de los suelos no saturados directa o indirectamente y se ve afectada en su mayoría por cambios de humedad. Debido a la incertidumbre en las condiciones climáticas, la succión es más variable con el tiempo que la presión de poro positiva (Rahardjo & Leong, 2006).

La succión total del suelo tiene dos componentes que son la succión matricial ( $h_m$ ) y osmótica ( $h_s$ ), como se observa en la Ec. 9.

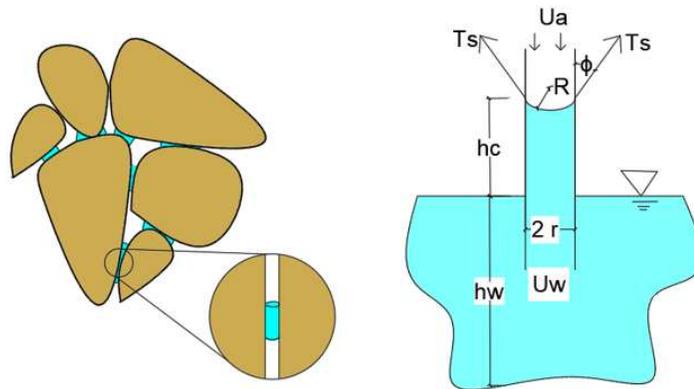
$$h = h_s + h_m \tag{9}$$

La succión matricial ( $h_m$ ) es causada por la atracción de las moléculas de agua y los minerales en las partículas de suelo, si el material es silicato, el fenómeno se le conoce como acción

capilar (Briaud, 2013). Se define por la Ec. 10 como diferencia de la presión de agua y del aire en los poros.

$$h_m = u_w - u_a \quad (10)$$

La succión matricial generalmente está asociada al fenómeno de capilaridad. Esto se debe a que los poros del suelo de radio pequeño actúan como tubos capilares por los cuales el agua subirá (**Figura 16**) (Fredlund & Rahardjo, 1993).



**Figura 16.** Modelo capilar en suelos.

Realizando equilibrio de fuerzas es posible obtener la altura a la cual sube el agua por medio de la Ec. 11.

$$u_a + h_c \gamma_w = \frac{2T_s}{r} \cos \phi \quad (11)$$

Donde:

$T_s$  = Tensión superficial del agua

$\Phi$  = ángulo de contacto

$r$  = radio del tubo capilar

$h_c$  = altura a la que sube la columna de agua

El término  $h_c \gamma_w$  corresponde a la presión negativa del agua, por lo tanto, la Ec. 11 toma la forma de la Ec. 12, correspondiente a la succión matricial.

$$u_a - u_w = \frac{2T_s}{r} \cos\varphi = h_m \quad (12)$$

La succión osmótica ( $h_s$ ), generada por la atracción que existe entre el agua y la sal, dependerá de la existencia de las sales disueltas en el suelo (Briaud, 2013).

En suelos saturados la succión es igual a 0, pero es variable conforme el suelo se va secando, ocupando valores en un rango de 0 a 1 GPa. Esta variación afecta el comportamiento mecánico y volumétrico de los suelos no saturados.

Actualmente no existe algún instrumento que pueda medir la succión con razonable precisión. En la **Tabla 9** se muestran los métodos más utilizados para su medición.

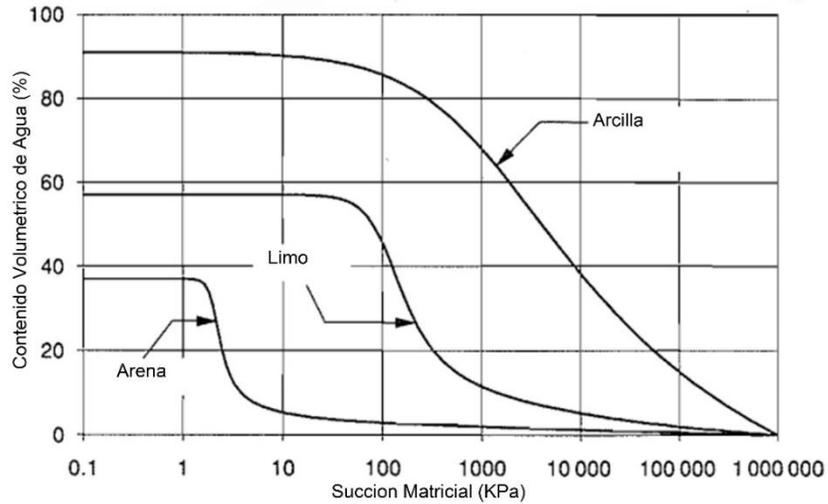
**Tabla 9.** Métodos experimentales para medición de la succión en suelos(Verdin Montes, 2018).

Equipo	Succión medida	Fenómeno Asociado	Rango de medición (Mpa)	Tiempo de medición
Psicrómetro de transistor	Total	Humedad relativa	0.30 - 70.00	Minutos
Psicrómetro termopar	Total	Humedad relativa	0.30 - 7.00	Minutos
Higrómetro capacidad/resistivo	Total	Humedad relativa	10.00 - 400.00	Minutos
Higrómetro de espejo (punto de rocío)	Total	Humedad relativa	3.00 - 400.00	Minutos
Papel filtro	Total o matricial	Contenido de Agua	0.40 - 100.00	7 a 15 días
Tensiómetro	Matricial	Tensión del agua	0.00 - 0.08	Minutos
Mini - sonda	Total y matricial	Tensión del agua	0.00 - 2.10	Minutos

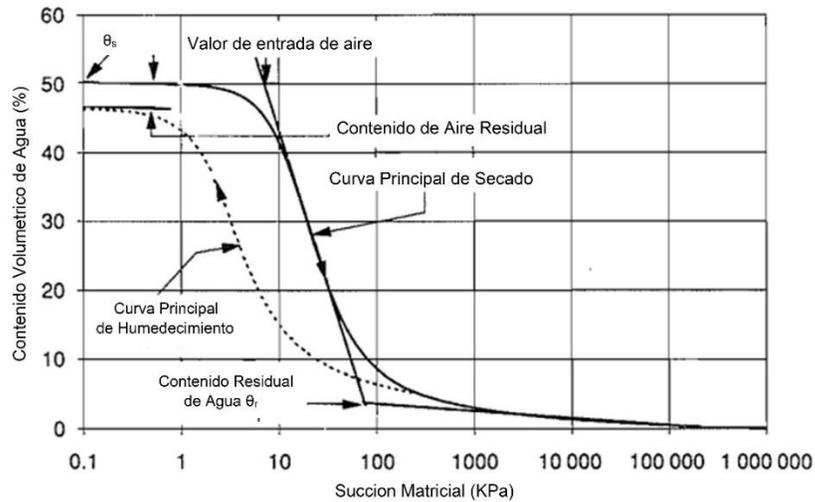
### 3.11 Curvas de Retención Agua-Suelo (CRAS)

La curva de retención agua-suelo, también conocida como la curva característica agua-suelo, describe la cantidad de agua retenida en el suelo bajo equilibrio para una succión matricial dada (Tuller & Or, 2004). Generalmente se usa el contenido volumétrico de agua ( $\theta$ ), sin embargo, en la práctica de ingeniería geotécnica se utiliza el contenido de humedad ( $\omega$ ) y el grado de saturación ( $S_w$ ) el cual indica el porcentaje de vacíos que están llenos con agua.

El contenido volumétrico de agua es usualmente graficado en escala aritmética y el rango de la succión en escala semilogarítmica (Fredlund & Xing, 1994). En la **Figura 17**, se muestran ejemplos de curvas de retención de secado para algunos tipos de suelo, mientras que en la **Figura 18** se muestran los componentes de la curva de retención.



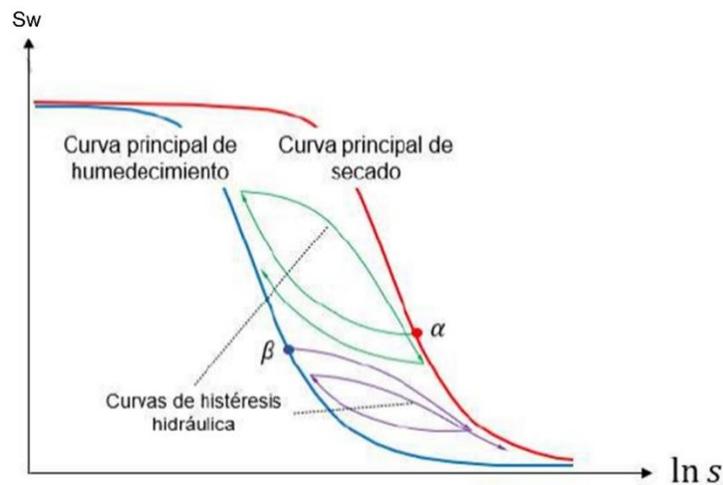
**Figura 17.** Curvas de retención agua - suelo típicas para Arcilla, limo y arena (Fredlund & Xing, 1994).



**Figura 18.** Curva de retención agua - suelo típica y sus componentes para un suelo limoso (Fredlund & Xing, 1994).

La succión tiene un rol complejo en los suelos, ya que para un mismo grado de saturación se presentan valores distintos durante condiciones de secado o humedecimiento, esto se debe a un fenómeno denominado histéresis (Albadri et al., 2021).

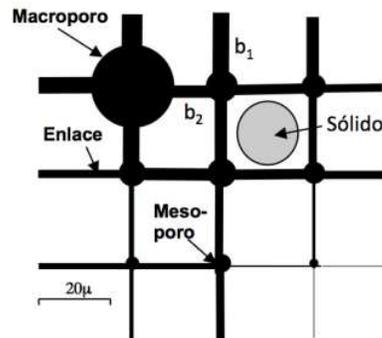
El cual puede estar atribuido a la distribución de tamaño de los poros, el efecto del ángulo de contacto de los meniscos de agua, el aire atrapado y a los cambios de volumen de los poros. Dentro de la curva de retención se presentan ciclos de histéresis (**Figura 19**) que pueden producirse de distintas maneras teniendo como frontera las curvas principales y son asintóticas a estas (Ramírez Jiménez, 2020).



**Figura 19.** Esquema de las curvas de histéresis hidráulica al interior de la curva de retención partiendo de puntos sobre las ramas principales (Ramírez Jiménez, 2020).

### 3.12 Modelo Sólido Poroso

Rojas et al. (Rojas, 2008) proponen un modelo sólido poroso para simular la estructura real del suelo. El modelo puede ser construido a través de una red, en dos o tres dimensiones, compuesta por cuatro elementos principales: macroporos, mesoporos, enlaces y sólidos los cuales son colocados de manera aleatoria (**Figura 20**).



**Figura 20.** Modelo Sólido Poroso (Rojas, 2008).

Los mesoporos son poros de tamaño medio a pequeño, mientras que los macroporos son los poros de mayor tamaño en el suelo y se diferencian de los mesoporos en que los primeros presentan una reducción de tamaño cuando se incrementa la succión. De manera general a los macroporos y mesoporos se les conoce también como cavidades.

Los enlaces, son los elementos que conectan las cavidades y los sólidos se colocan en el espacio dejado entre enlaces y las cavidades.

La información necesaria para construir el modelo son la distribución de tamaño de poro PSD (por sus siglas en inglés, Pore Size Distribution), la granulometría del suelo y algunos puntos de la curva de retención agua-suelo experimental.

La distribución de tamaño de poro puede ser obtenida utilizando el método de intrusión de mercurio o análisis de imagen por microscopía electrónica de barrido. Sin embargo, estos métodos solo reportan el tamaño de las cavidades, debido a la dificultad de medir los microporos por su tamaño extremadamente pequeño (Rojas González, 2013).

Es importante mencionar que la distribución de tamaño de poro del suelo afecta de manera directa a su curva de retención ya que la distribución de tamaño de las cavidades regula el proceso de humedecimiento y la distribución del tamaño de los enlaces regula el proceso de secado (Rojas & Chávez, 2013).

Por lo tanto, cuando no se cuenta con la porosimetría del suelo se puede proponer una distribución de tamaño de poro inicial y la curva de retención numérica obtenida se compara

con la curva de retención experimental modificando sucesivamente esta distribución inicial hasta lograr el mejor ajuste entre ambas curvas, Estos últimos valores corresponderán a la distribución de tamaño de poro teórica del material los cuales deben de considerarse solo como una aproximación a la distribución de tamaño de poro real del suelo.

Con el modelo sólido poroso se simula la distribución de agua en los poros del material que se presenta en cada incremento de succión y determinar el volumen de sólidos y poros de las fracciones saturadas, no saturadas y secas (Rojas & Chávez, 2013).

Posteriormente, se puede evaluar el parámetro  $\chi$  de Bishop, expresándolo en función de la fracción saturada  $f^s$ , no saturada  $f^u$  en el suelo y el grado de saturación de la fracción no saturada  $S_w^u$ , tal y como se muestra en la Ec. 13:

$$\chi = f^s + S_w^u f^u \quad (13)$$

La fracción saturada  $f^s$  representa solamente el volumen de sólidos que se encuentran rodeados por poros saturados  $V_s^s$  agregándole el volumen de estos poros  $V_u^s$  y dividido entre el volumen total del suelo  $V$ . La fracción no saturada  $f^u$  representa la combinación del volumen de sólidos que se encuentran rodeados por poros saturados y secos  $V_s^u$  más el volumen de estos poros  $V_u^u$  y dividido entre el volumen total del suelo. Finalmente, el grado de saturación de la fracción no saturada  $S_w^u$  es el volumen de los poros saturados  $V_u^{us}$  dividido entre el volumen de los poros que pertenecen a la fracción no saturada del suelo  $V_u^u$  (Rojas et al., 2021).

### **3.13 Deformación Volumétrica**

Para determinar el comportamiento volumétrico de suelos no saturados bajo el principio de esfuerzos efectivos, se suele utilizar la ecuación aplicada a suelos saturados (Loret & Khalili, 2000; Sun et al., 2007; Wheeler, Sharma, et al., 2003).

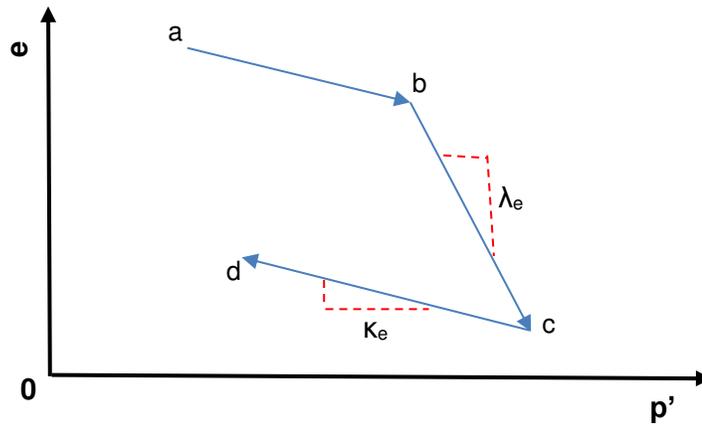
Para suelos saturados Juárez – Badillo (Juárez Badillo, 1975), propusieron la Ec. 14 para evaluar el comportamiento volumétrico donde involucra el volumen específico del suelo.

$$\frac{V}{V_0} = \left( \frac{p'_0}{p'} \right)^{\lambda_v} \quad (14)$$

Para suelos no saturados Rojas y Chávez (Rojas & Chávez, 2013), modificaron la Ec. 14 cambiando el volumen específico a términos de relación de vacíos  $e$  (Ec. 15), esto debido a que a presiones grandes el volumen de los sólidos se mantiene al ser incompresibles.

$$\frac{e}{e_0} = \left(\frac{p'_0}{p'}\right)^{\lambda_e} \quad (15)$$

$\lambda_e$  es el índice de compresión, que se define como la pendiente de compresión virgen en condiciones saturadas en un plano logarítmico formado por la relación de vacíos y esfuerzos efectivos (**Figura 21**). Para contar con el comportamiento elástico del suelo, el parámetro  $\lambda_e$  se sustituye por el índice de descarga-carga  $\kappa_e$ .



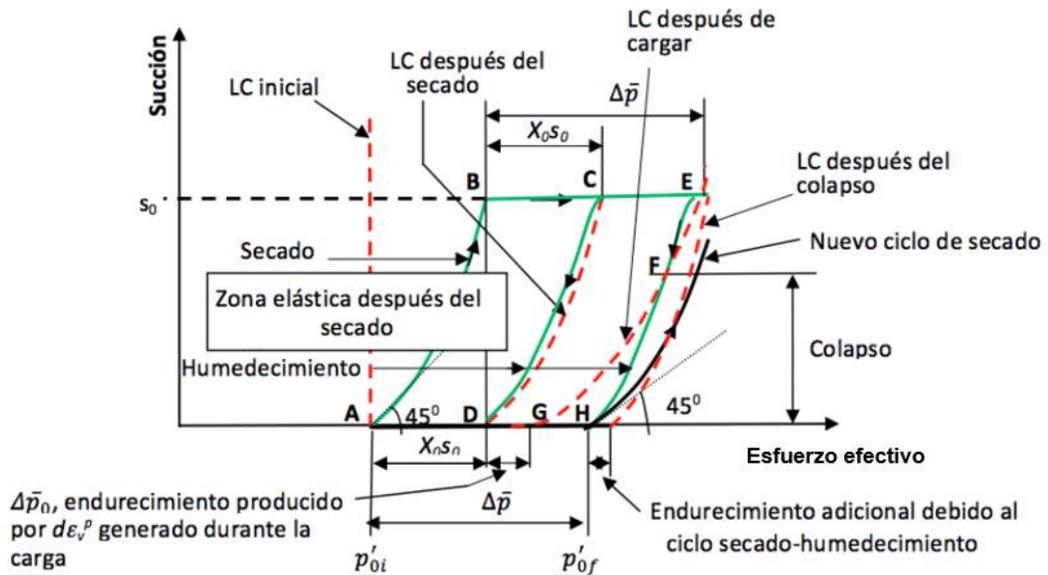
**Figura 21.** Curva de compresibilidad de suelos.

Al utilizar el principio de esfuerzos efectivos de Bishop para evaluar el comportamiento volumétrico de los suelos no saturados, el acoplamiento hidromecánico queda incluido ya que el parámetro  $\chi$  involucra los aspectos hidráulicos del material, tal y como se mencionó en el modelo sólido poroso.

Cabe mencionar que la respuesta volumétrica de un suelo no saturado no depende únicamente de los esfuerzos iniciales y finales, si no de la succión que se presenta en el suelo durante la trayectoria de secado o humedecimiento.

### 3.14 Marco Elastoplástico

El marco elastoplástico para el comportamiento volumétrico de suelos no saturados propuesto por Rojas et al (Rojas et al., 2015; Rojas & Chávez, 2013) se muestra en la **Figura 22**.



**Figura 22.** Marco elastoplástico para el comportamiento volumétrico de suelos no saturados (Rojas González, 2013).

Se puede observar en la **Figura 22** que tenemos una muestra saturada normalmente consolidada con un esfuerzo de preconsolidación  $p'_{oi}$ . En este punto A de saturación la superficie de fluencia de colapso por carga (LC) se representa por una línea vertical.

Si secamos la muestra hasta alcanzar una succión  $s_0$ , la muestra seguirá una trayectoria de esfuerzos AB con una pendiente inicial de  $45^\circ$  que se ira curvando debido a que  $\chi$  va reduciendo su valor cuando la succión aumenta. De igual manera durante el secado se presenta endurecimiento por succión cuyo incremento de esfuerzo efectivo será de la cantidad  $\chi_0 s_0$  y la superficie LC se encontrará paralela a la trayectoria de secado a una distancia horizontal de la misma magnitud.

Posteriormente si se carga la muestra, aplicando un esfuerzo igual o menor a  $\chi_0 s_0$  (trayectoria BC). En estas condiciones la muestra no presentará colapso durante el humedecimiento (trayectoria CD) debido a que se mantiene dentro de la zona elástica y no supera a la superficie LC.

Sin embargo, si la muestra se carga aplicando un esfuerzo mayor a  $\chi_0 s_0$  (trayectoria BE) el suelo mostrara un comportamiento elástico inicial (trayectoria EF) antes de mostrar colapso y la superficie LC se inclina a una pendiente menor mostrada por la curva EG.

Esta inclinación que presenta la superficie LC, se debe a que en la parte superior sigue al esfuerzo medio efectivo que se aplica al cargar la muestra (punto E) y en la parte inferior se endurece hasta tener el esfuerzo de preconsolidación en condiciones saturadas (punto G).

El incremento del esfuerzo de preconsolidación  $\Delta \bar{p}_0$  se puede determinar calculando la deformación volumétrica plástica  $\Delta \varepsilon_v^p$  que se genera en la trayectoria de carga BE (Ec. 16 - 17).

$$\Delta \varepsilon_v^p = \left( \frac{e_c}{1+e_c} \right) (\lambda_e - \kappa_e) \left( \frac{\Delta \bar{p} - \chi_0 s_0}{p'_{0i} + \chi_0 s_0} \right) \quad (16)$$

$$\Delta \bar{p}_0 = \Delta \varepsilon_v^p \left( \frac{e_D}{1+e_D} \right) \frac{p'_{0i}}{(\lambda_e - \kappa_e)} = \left( \frac{1+e_D}{1+e_c} \right) \left( \frac{e_c}{e_D} \right) \left( \frac{\Delta \bar{p} - \chi_0 s_0}{p'_{0i} + \chi_0 s_0} \right) p'_{0i} \quad (17)$$

Donde:

$e_c$  = relación de vacíos en el punto C.

$e_D$  = relación de vacíos en el punto D.

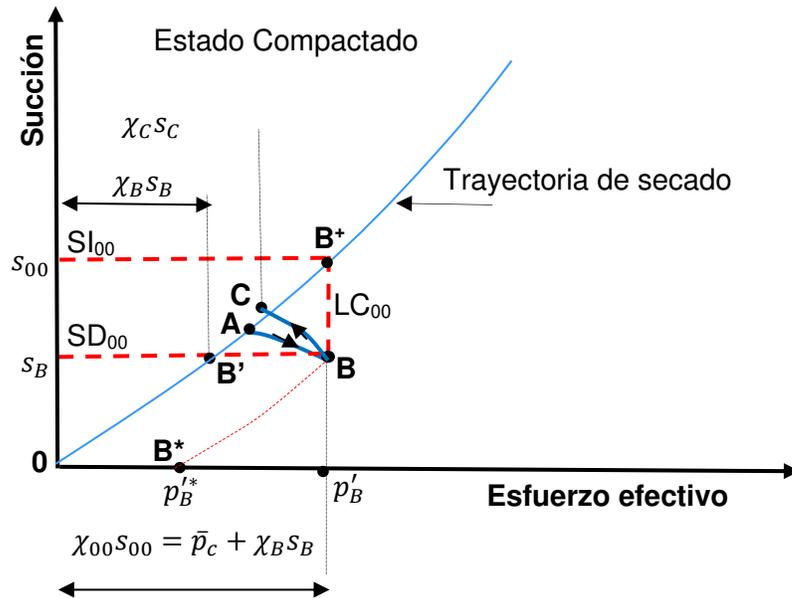
Si la muestra es descargada del punto C al D siguiendo la superficie LC, después del secado (línea punteada CD) la relación de vacíos en el punto D será igual a la del punto C. De esta manera la Ec. 17 se simplifica a la Ec. 18.

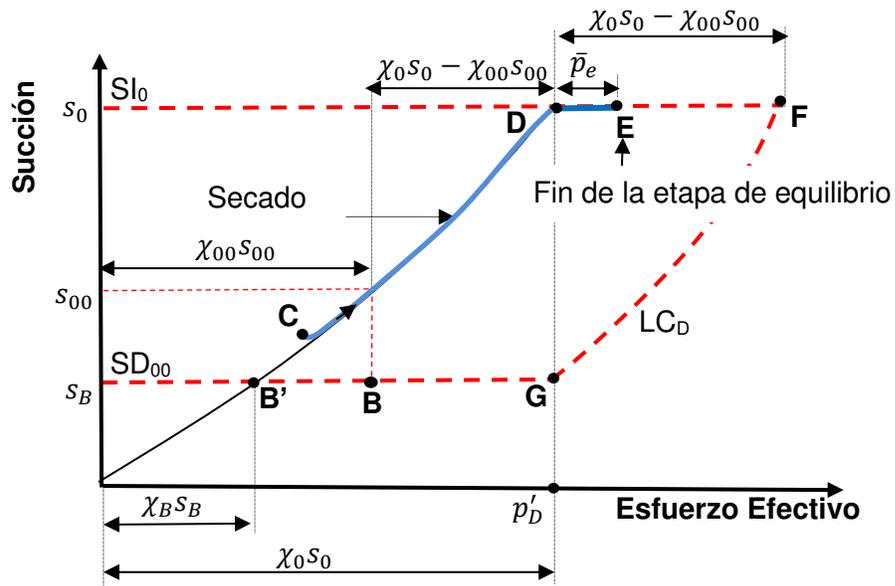
$$\Delta \bar{p}_0 = \left( \frac{\Delta \bar{p} - \chi_0 s_0}{p'_{0i} + \chi_0 s_0} \right) p'_{0i} \quad (18)$$

De esta última ecuación resulta que  $\Delta\bar{p}_0 < (\Delta\bar{p} - \chi_0 s_0)$ , ocasionando que la superficie LC (EG) se incline permitiendo que la trayectoria de humedecimiento EFH cruce en el punto F y se presente el colapso en la muestra.

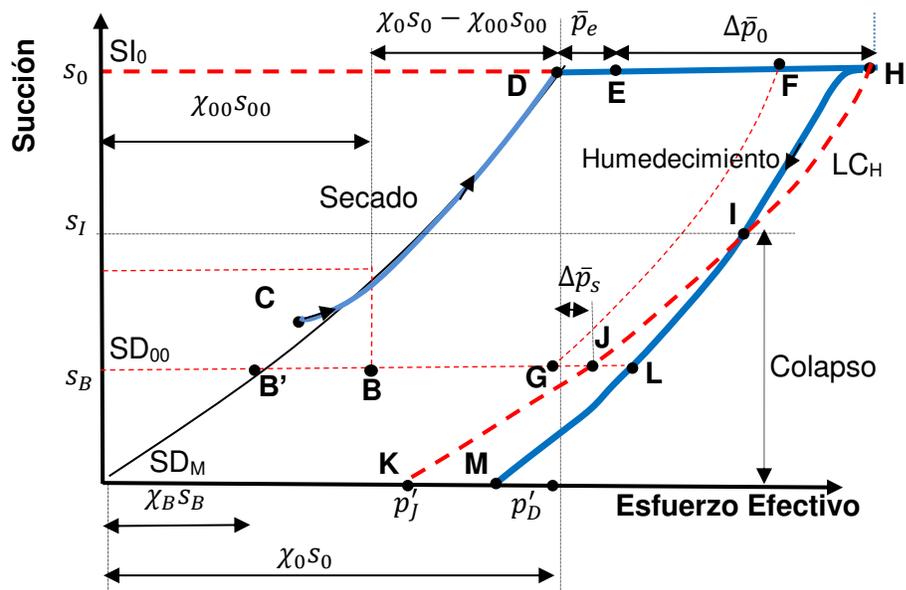
### 3.14.1. Suelos compactados

Cuando las muestras a ensayar son fabricadas por compactación, es difícil determinar la posición inicial de la superficie LC a pesar de conocer la presión aplicada durante la compactación de la muestra y la succión después de esta. Para lograr lo anterior, se hace uso de las consideraciones señaladas por Rojas (Rojas, 2022) que se describe en la **Figura 23**.





b)



c)

**Figura 23.** Marco elastoplástico para el comportamiento volumétrico de suelos compactados (Rojas González, 2013).

Cuando una muestra es ligeramente compactada estáticamente, inicialmente la mezcla de suelo disgregado con cierta humedad parte de un estado de esfuerzos representado únicamente por la succión, tal y como se indica en la **Figura 23a**. Después al compactar material dentro de un molde con un pizon se presenta una reducción de volumen, mientras que la húmedas permanece constante. Esto genera un aumento del grado de saturación de la muestra y en consecuencia disminuye la succión, como se observa en la trayectoria AB de la misma figura. En el punto B la muestra tendrá un esfuerzo aparente de preconsolidación equivalente a la presión de compactación  $\bar{p}_c$  más el esfuerzo de succión  $\chi_B s_B$  de la muestra al final de la compactación,

Cuando se retira la presión de compactación, la muestra presenta un pequeño incremento de succión y se desplaza hacia el punto C en la **Figura 23a**. Este punto se llamará como “estado compactado”.

Después de la compactación y extracción de la muestra, se puede realizar una etapa de equilibrio en una celda triaxial donde se aplicará una succión  $S_0$  y un esfuerzo  $\bar{p}_e$ . Cuando comienza el secado, la muestra sigue una trayectoria hasta el punto D (**Figura 23b**) con una succión  $S_0$  y un esfuerzo aparente de preconsolidación  $p'_D$  y la superficie LC se desplaza hacia la derecha en una cantidad igual a  $\chi_0 s_0 - \chi_{00} s_{00}$ . El esfuerzo  $\bar{p}_e$  aplicado durante la etapa de equilibrio hace que el punto D se desplace al punto E en esta misma figura y permanece dentro de la zona elástica.

Si después de la etapa de equilibrio, se aplica un incremento de esfuerzo  $\Delta\bar{p}_0$  que supere los resistidos en la zona elástica (Punto F), la superficie LC se moverá a la indicada por la superficie  $LC_H$  (**Figura 23c**). En este caso se presenta un incremento del esfuerzo aparente de preconsolidación  $\Delta\bar{p}_s$  que genera el desplazamiento del punto G al J.

El desplazamiento de la superficie de fluencia se calcula igualando las deformaciones volumétricas plásticas que se generan en el tramo FH y las del tramo GJ (Ec. 19).

$$\Delta\varepsilon_v^p = (\lambda - \kappa) \left( \frac{e_H}{1+e_F} \right) \frac{\Delta\bar{p}_0 + \bar{p}_e - \chi_0 s_0 + \chi_{00} s_{00}}{\Delta\bar{p}_0 + \bar{p}_e + \chi_0 s_0} = (\lambda - \kappa) \left( \frac{e_J}{1+e_G} \right) \frac{\Delta\bar{p}_s}{\Delta\bar{p}_s + \chi_0 s_0} \quad (19)$$

En la F23c, se puede observar que los puntos F y H, G y J se encuentran en las mismas superficies LC, por lo tanto, presentan el mismo valor de relación de vacíos. De esta manera la Ec. 19 se simplifica a la Ec. 20.

$$\Delta\bar{p}_s = (\Delta\bar{p}_0 + \bar{p}_e - \chi_0 s_0 + \chi_{00} s_{00}) \frac{\chi^s + \chi_0 s_0 - \chi_{00} s_{00}}{2\chi_0 s_0 - \chi_{00} s_{00}} \quad (20)$$

La ubicación de la superficie LC<sub>H</sub> está dada por la Ec. 21.

$$LC_H = LC_D + \Delta\bar{p}_s \quad (21)$$

Si la muestra después de ser cargada hasta el punto H es saturada. Se presenta un comportamiento inicial elástico cuando la succión se reduce del punto H hasta el I y si la succión continúa reduciéndose más allá de este punto, la muestra colapsara.

El colapso es proporcional a la variación del esfuerzo de succión ( $\Delta p'$ ), que es igual a la distancia horizontal entre la superficie LC<sub>H</sub> y la trayectoria de humedecimiento.

Derivando la Ec. 15 obtenemos la Ec. 22, con la cual podemos determinar la variación de la relación de vacíos que presenta el suelo durante la trayectoria de humedecimiento.

$$\Delta e = e_0 \left( \frac{\Delta p'}{p'} \right)^{\lambda_e} \quad (22)$$

#### **4. METODOLOGÍA**

En este capítulo se detalla el procedimiento experimental con base a la investigación del estado del arte para definir las pruebas experimentales a ejecutar durante el desarrollo de la investigación y obtener los parámetros necesarios para el desarrollo del modelo de suelos dispersivos, posteriormente realizar las comparaciones teórico-experimentales.

Las pruebas se realizaron en la Universidad Autónoma de Querétaro en el Laboratorio de Geotecnia, Materiales y Geomática perteneciente a la facultad de Ingeniería y en la Unidad Académica Multidisciplinaria Zona Media de la UASLP en el Laboratorio de Mecánica de Suelos y Materiales.

La metodología se divide en: revisión del estado del arte, recolección y caracterización del material, determinación de las propiedades índice, evaluación del grado de dispersividad, la ejecución de las pruebas experimentales, que se describen en las secciones siguientes, modelación y comparación de los resultados experimentales con los teóricos.

##### **4.1 Obtención de muestra alteradas e inalteradas**

La recolección de las muestras de suelo, utilizadas para esta investigación, fue dentro de la Zona Conurbada de Rioverde y Ciudad Fernández, en un predio propiedad del Dr. Gustavo Gallegos Fonseca, con coordenadas geográficas latitud 21°59'56.2" N y longitud 99°58'34.4" O.

La extracción del material se llevó a cabo en el mes de junio del año del 2023 conforme al procedimiento marcado en las normas PROY-NMX-C-430-ONNCCE-2002, PROY-NMX-C-431-ONNCCE-2021, NMX-C-467-ONNCCE-2019 y M·MMP·1·01/03.

Se realizó el sondeo del tipo pozo a cielo abierto (PCA) por medios mecánicos, a una profundidad de 2.00 metros. Con el apoyo del personal técnico del Laboratorio de Mecánica de Suelos y Materiales de la Unidad Académica Multidisciplinaria Zona Media de la UASLP, se obtuvieron 2 muestras alteradas de 50 cm de largo, 40 cm de ancho y 30 cm de alto y como muestras inalteradas se recolectaron 2 costales de 40 kg cada uno (**Figura 24a**), los cuales fueron transportados y almacenados en el cuarto de temperatura controlada del

laboratorio de Geotecnia, Materiales y Geomática de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro (**Figura 24b**).

Durante el muestreo se obtuvieron muestras inalteradas a cada 20 centímetros y almacenaron para la obtención del perfil de humedad del sitio (**Figura 25**).



**Figura 24.** a) Extracción de muestras alteradas e inalteradas del suelo en estudio. b) Almacenaje de muestras en el cuarto de temperatura controlada.



**Figura 25.** Muestras alteradas para obtener el perfil de humedad natural del sitio.

## 4.2 Caracterización del suelo

Consiste en la obtención de las propiedades índice del suelo, siguiendo los procedimientos de la normatividad establecida para posteriormente clasificar el suelo utilizando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (ASTM D2487).

### 4.2.1. Contenido de humedad ( $\omega$ )

Se realiza lo más pronto posible después de haber hecho el muestreo, tanto para las muestras inalteradas como para las alteradas para la obtención del perfil de humedad natural del sitio (**Figura 26**). Este proceso se lleva a cabo con base a la norma ASTM D2216.



**Figura 26.** Muestras para la obtención del contenido de humedad del suelo.

### 4.2.2. Peso específico del suelo ( $\gamma_m$ )

Se utiliza el método B de la norma ASTM D4531 para obtener el peso específico del suelo (**Figura 27**). Además, obteniendo el contenido de humedad de las muestras inalteradas utilizadas en esta prueba se puede obtener el peso específico seco del suelo ( $\gamma_d$ ).



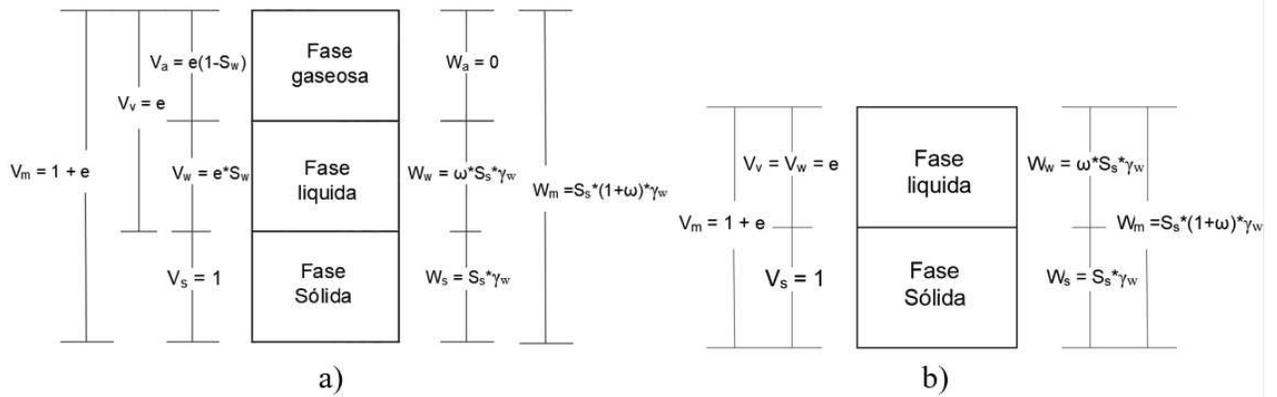
**Figura 27.** Determinación del peso específico del suelo.

#### 4.2.3. Peso específico relativo de sólidos ( $G_s$ o $S_s$ )

Se realiza siguiendo el procedimiento especificado en la norma ASTM D854 (**Figura 28**). Este parámetro es esencial para el cálculo de las propiedades gravimétricas y volumétricas de los suelos no saturados y saturados, tales como la relación de vacíos ( $e$ ) y el grado de saturación ( $S_w$ ) (**Figura 29**).



**Figura 28.** Determinación del peso relativo de sólidos.



**Figura 29.** a) Relaciones gravimétricas y volumétricas para suelos no saturados y b) Suelos saturados

#### 4.2.4. Análisis Granulométrico

Se realiza el lavado del material a través de la malla No. 200. Para el material retenido se realiza el análisis granulométrico por tamizado utilizando las mallas No.4, 10, 20, 40, 60, 100 y 200 de acuerdo al procedimiento de la norma ASTM C136 Y ASTM C117 (**Figura 30**).



**Figura 30.** Análisis Granulométrico por tamizado.

Para el material que pasa la malla No. 200 se realiza el análisis granulométrico vía hidrómetro (densímetro) siguiendo el procedimiento de la norma ASTM D422 (**Figura 31**), el cual utiliza el principio de la ley de Stokes, que relaciona la densidad y velocidad de sedimentación de las partículas del suelo con su diámetro. Como agente dispersante se utilizó hexametáfosfato de sodio.



**Figura 31.** Análisis Granulométrico vía hidrómetro.

#### **4.2.5. Límites de Consistencia**

El principio de los límites de consistencia de los suelos finos, se basa en que el estado en el que puedan encontrarse esta en función de la naturaleza de sus partículas y del contenido de humedad que contengan. Estos estados son: sólido, semisólido, plástico y líquido.

Para determinar las fronteras entre estos estados como lo son el límite líquido (LL), límite plástico (LP) y el índice de plasticidad (IP) se hace utilizando la copa de Casagrande de acuerdo a la norma ASTM D4318 (**Figura 32a**) y se comparan con los valores obtenidos utilizando el Cono Inglés siguiendo el procedimiento de la norma BS 1377 británica (**Figura 32b**).



**Figura 32.** Determinación del Límite Líquido por el método a) Copa de Casagrande b) Cono Inglés

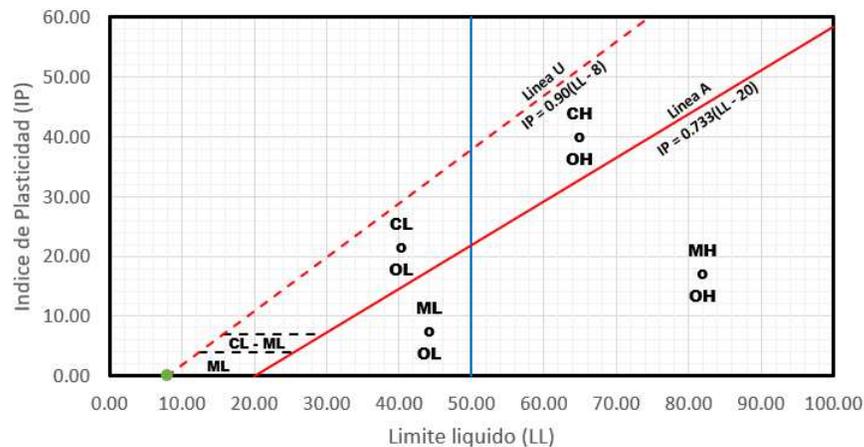
Para obtener el límite de contracción lineal (SL) y contracción volumétrica (SV) se sigue la norma ASTM D427, sin embargo, por cuestiones de seguridad se realiza la medición de las muestras con vernier para evitar el uso del mercurio (**Figura 33**).



**Figura 33.** Determinación del Límite de Contracción Lineal y Volumétrica.

#### 4.2.6. Clasificación del suelo

Utilizando los parámetros obtenidos en las pruebas anteriores, se clasifica el suelo en base a los criterios para la clasificación de suelos de grano fino (**Figura 34**) del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). El procedimiento se detalla en la norma ASTM D 2487.



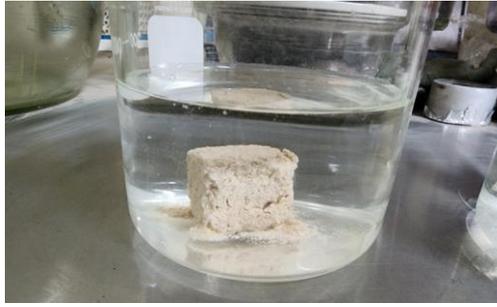
**Figura 34.** Carta de Plasticidad.

#### 4.3 Evaluación de la dispersividad del suelo

Consiste en determinar el grado de dispersión del suelo, a través de pruebas físicas especiales. Estas pruebas se realizan con el material con su contenido de humedad natural, ya que al ser secado en horno a  $110 \pm 5$  °C se observa cambio de las propiedades químicas, siendo la más característica la generación de reacción exotérmica y cementación al entrar en contacto con agua.

##### 4.3.1. Prueba de Crumb

Se realiza aplicando el método A de la norma ASTM D 6572, correspondiente a la evaluación del grado de dispersión del suelo en muestras inalteradas (**Figura 35**). Esta prueba simula condiciones de flujo estático en campo.

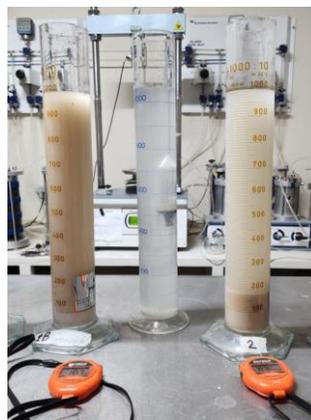


**Figura 35.** Prueba de Crumb.

#### 4.3.2. Prueba del Doble Hidrómetro

Se realiza de acuerdo al procedimiento indicado en la norma ASTM D4221 para obtener el porcentaje de partículas de 5  $\mu\text{m}$  de tamaño. En esta prueba, la dispersión es obtenida de la relación entre el porcentaje de partículas de 5  $\mu\text{m}$  en esta prueba y el obtenido en la granulometría vía hidrómetro (**Figura 36**).

El principio de esta prueba está en no utilizar ningún agente defloculante, ya que la función de este es evitar que las partículas de suelo formen flóculos y sedimenten rápidamente. De esta manera, se mide la tendencia natural que tienen las partículas de los suelos dispersivos de entrar en suspensión en contacto con el agua. Si el comportamiento fuera idéntico al obtenido utilizando agente defloculante, se trataría que el suelo es altamente dispersivo.



**Figura 36.** Prueba del Doble Hidrómetro. La probeta de la izquierda fue preparada de acuerdo al procedimiento de la norma ASTM D422 y la probeta de la derecha con el de la ASTM D4221.

#### 4.3.3. Prueba de Pinhole

Se realiza de acuerdo al método C indicado en la norma ASTM D4647 en muestras inalteradas (**Figura 37**). Se aplican cargas hidráulicas de 50 ml durante 10 minutos y después se incrementa a 180 ml, carga a la cual se empieza a observar presencia de turbidez e incremento de la velocidad del flujo saliente del agujero.

El diámetro del orificio al final de la prueba se mide utilizando una regla de calibración y un microscopio digital. Esta prueba simula condiciones de flujo dinámico en campo.



**Figura 37.** Prueba de Pinhole.

#### 4.3.4. Análisis Químico

Se realiza análisis químico para determinar los cationes solubles que presenta el suelo dispersivo en estudio, de acuerdo al método de determinación de bases intercambiables (Ca, Mg, Na, K) en suelo por extracción con acetato de amonio por ICP-PLASMA. Método interno MET-SU-45. De igual manera se determina su pH y salinidad del suelo.

#### 4.3.5. Análisis mineralógico

Se realiza análisis mineralógico por difracción de rayos X (DRX) y espectroscopia Raman para determinar las estructuras cristalinas y químicas que componen el suelo dispersivo en estudio. Esta prueba se realizó en el Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, Campus UNAM-Juriquilla, se hace el análisis de una muestra en condiciones naturales y

otros dos análisis correspondientes a una muestra alterada de suelo, una muestra mezclada con cloruro de sodio y una más mezclada con carbonato de sodio sujetas a un proceso de hidratación y secado en horno a temperatura de 105° C.

#### **4.4 Obtención de la curva de retención agua-suelo**

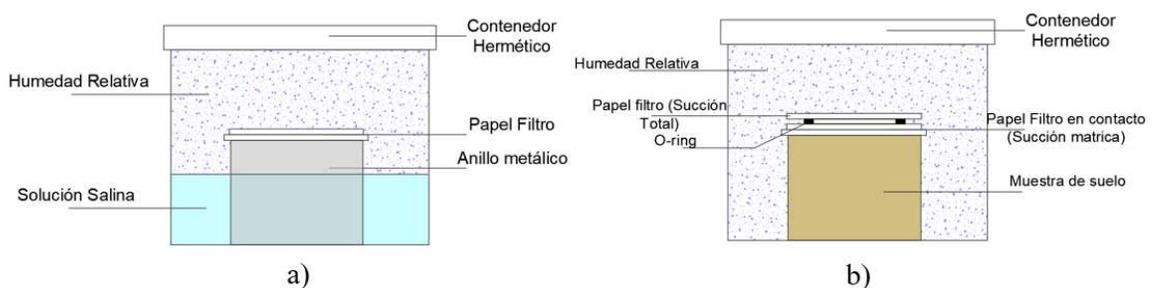
Para determinar la curva de retención agua – suelo para el suelo en estudio, es necesario medir la succión ( $s$ ) que presenta el suelo a distintos grados de saturación. En esta investigación, la succión se mide utilizando la técnica del papel filtro, ya que permite medir la succión total ( $s_t$ ) y la succión matricia ( $s_m$ ) y así calcular a su vez la succión osmótica ( $s_{osm}$ ).

La curva de retención se obtiene para la trayectoria de humedecimiento y secado, con la finalidad de tener los valores de succión para el fenómeno de histéresis en el suelo dispersivo. Estos valores se utilizan para realizar el ajuste de la curva de retención teórica en el modelo sólido poroso y obtener la distribución de tamaño de poro teórica del suelo.

##### **4.4.1. Medición de la succión del suelo con el método del papel filtro**

El método del papel filtro es una técnica económica, que permite medir la succión en un rango de 0.01 a 100 Mpa. La norma ASTM D5298, indica el procedimiento para la calibración del papel filtro y la medición de la succión en muestras de suelo inalteradas.

En la prueba se utiliza papel filtro Whatman No. 42 sin ceniza y las soluciones utilizadas en la calibración se prepararon con cloruro de sodio (NaCl). El acomodo de las muestras dentro del contenedor se muestra en la **Figura 38**.



**Figura 38.** Colocación del papel filtro a) Durante la calibración b) Sobre la muestra de suelo.

#### 4.4.2. Preparación de las muestras de suelo para la línea de humedecimiento

Para obtener la línea de humedecimiento de la curva de retención se siguen los siguientes pasos:

1. Labrar 11 muestras inalteradas dentro de anillos metálicos de volumen ( $V_m$ ) y peso ( $W_{\text{anillo}}$ ) conocido. Pesar las muestras junto con el anillo y almacenarlas en bolsas de plástico o emplayar para mantener su humedad.
2. Se utiliza  $\omega$  y los parámetros obtenidos en pruebas anteriores, tales como  $\gamma_m$ ,  $\gamma_d$  y  $S_s$ , para determinar las relaciones gravimétricas y volumétricas para cada muestra, entre ellas estará el grado de saturación en el que se encuentran.
3. Colocar rectángulos de papel aluminio previamente pesado en la base de los anillos de las muestras, esto para facilitar su manejo y evitar pérdidas de material.
4. Secar en su totalidad las muestras en horno a temperatura constante de  $110 \pm 5^\circ \text{C}$ .
5. Basándose en las relaciones gravimétrica y volumétricas, se agrega la cantidad de agua necesaria para obtener el grado de saturación deseado y se deja reposar por 24 horas en una bolsa de plástico para homogenizar la humedad. Los grados de saturación necesarios serán: 0% , 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% y 100%.
6. Transcurridas las 24 horas, se pesan las muestras de suelo para verificar y/o recalcular el grado de saturación final antes de iniciar la prueba de succión.

#### 4.4.3. Preparación de las muestras de suelo para la línea de secado

Para obtener la línea de secado de la curva de retención se siguen los siguientes pasos:

1. Repetir los pasos 1 y 2 mencionados en la preparación de las muestras de suelo para la línea de humedecimiento.
2. Se colocan las muestras sobre papel aluminio previamente perforado con una aguja dentro de un recipiente y se inunda hasta 1/10 de la altura de anillo para saturar por

capilaridad por un periodo de 24 horas. Poner a secar las muestras en horno a temperatura constante de  $110 \pm 5^\circ \text{C}$ .

3. Se determina el peso de cada muestra del suelo constantemente hasta lograr el grado de saturación deseado. Los rangos de saturación se manejan de la misma manera que en la línea de humedecimiento.
4. Se retira la muestra del horno y se deja enfriar en una bolsa de plástico para evitar pérdidas de humedad.
5. Una vez enfriada la muestra, se determina nuevamente su peso para verificar y/o recalcular el grado de saturación final antes de iniciar la prueba de succión.

#### **4.5 Pruebas mecánicas**

##### **4.5.1. Triple Odómetro**

Para la prueba del triple odómetro se sigue el procedimiento indicado en el método B de la norma ASTM D2435 (**Figura 39**). Sin embargo, la diferencia con este ensaye radica en que la aplicación de las cargas no se realiza en incrementos, si no que en cada anillo se aplica una carga distinta y se mantiene constante durante todo el ensaye. Cada que las lecturas del micrómetro se mantengan constantes, se realizan incrementos de humedad (uno por día) y continua con el registro de lecturas (**Figura 40**). Este procedimiento se repite hasta saturar la muestra. Finalizado los 5 incrementos de humedad, se procede a descargar los anillos y se registran las lecturas.

La carga aplicada al primer anillo de consolidación se determina en base a la presión vertical que presenta el suelo a la profundidad de muestreo. Para los otros dos anillos de consolidación se aplica el doble y triple de esta carga. En caso de presentar un comportamiento elástico, es necesario repetir la prueba con un incremento de carga, la cual será del doble de la última carga aplicada.

Se Gráfica la relación de vacíos obtenida en el último incremento de humedad y el esfuerzo efectivo  $p'$  aplicado.



**Figura 39.** Prueba del Triple Odómetro.



**Figura 40.** Incremento de humedad a la muestra.

#### **4.5.2. Prueba Triaxial Consolidada Drenada (CD)**

Se realizan pruebas triaxiales CD, ya que en esta prueba los esfuerzos totales son iguales a los efectivos debido a que la velocidad de aplicación de la carga es lenta respecto a la capacidad de drenaje del suelo, de esta manera, no se genera presión de poro ( $\Delta U = 0$ ).

Para esta Prueba se sigue el procedimiento de acuerdo a la norma ASTM D7181 (F41).

Se ensayan especímenes a grados de saturación de 100%, 80%, 50%, 30% y 0% para evaluar la variación del ángulo de fricción ( $\phi$ ) y cohesión ( $c$ ) con los cambios de humedad.

Los resultados se presentan en diagramas de esfuerzo desviador contra deformación ( $p'-\epsilon$ ), esfuerzo efectivo contra esfuerzo desviador ( $p'-q'$ ), esfuerzo desviador contra succión ( $q'-S$ ), grado de saturación contra ángulo de fricción efectivo ( $S_w - \phi'$ ) y grado de saturación contra cohesión efectiva ( $S_w - c'$ ).



**Figura 41.** Prueba Triaxial CD

#### **4.6 Pruebas con sodio**

Se incrementa el porcentaje de sodio presente en el suelo utilizando carbonato de sodio ( $Na_2CO_3$ ) y cloruro de sodio (NaCl) con la finalidad de aumentar el grado de dispersión a 100%.

Para lograr lo anterior, se valora la dispersión utilizando el método de doble hidrómetro incrementando el sodio en el suelo, de tal manera que el porcentaje de sodio final sea 10 y 20%. La cantidad a agregar de los reactivos para alcanzar dichos porcentajes se determina de acuerdo a su masa molecular.

Una vez determinada el porcentaje de sodio con el cual el suelo presenta un grado de dispersión del 100%. Se realizan nuevamente una serie de las pruebas mecánicas mencionadas en el punto anterior y se determina nuevamente la curva de retención para evaluar la influencia del sodio en el comportamiento hidromecánico del suelo.

#### **4.7 Modelación**

La modelación del comportamiento hidráulico del suelo dispersivo en estudio, se realiza obteniendo la curva de retención teórica del suelo mediante el modelo sólido poroso propuesto por Rojas et al. (Rojas, 2008). Se obtiene simultáneamente la distribución de tamaño de poro teórica del material y se determina el parámetro  $\chi$  considerando los aspectos hidráulicos del material en trayectoria de secado y humedecimiento.

Posteriormente la resistencia al cortante del suelo, se evalúa utilizando la ecuación de Bishop para suelos no saturados tomando los valores de  $\chi$  obtenidos previamente para los grados de saturación a los cuales se realizaron las pruebas triaxiales CD.

Finalmente, la modelación del comportamiento volumétrico se realiza utilizando la formulación planteada por Rojas y Chávez (Rojas & Chávez, 2013) y el marco elastoplástico con las consideraciones indicadas por Rojas (Rojas, 2022).

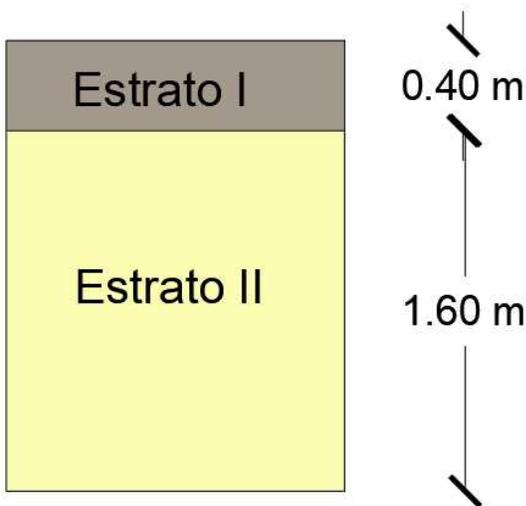
## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se muestran los resultados experimentales obtenidos en el desarrollo de la presente investigación. Los cálculos de dichos resultados se muestran detalladamente en los anexos A al I.

### 5.1 Caracterización del suelo

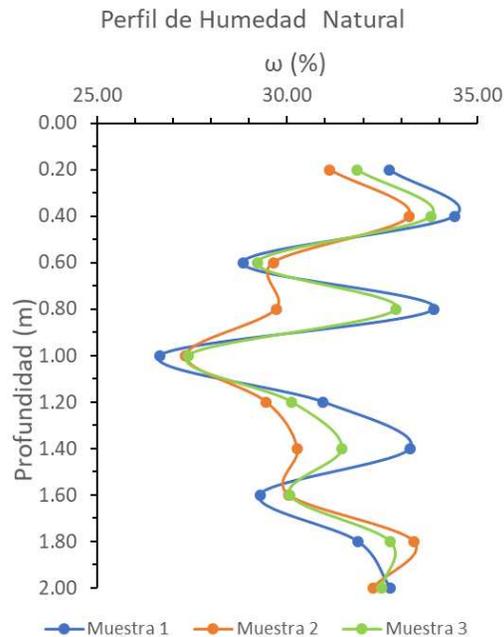
Las muestras utilizadas para esta investigación, se obtuvieron de la Ciudad de Rioverde, S.L.P., México. La excavación del pozo a cielo abierto se realizó a una profundidad de 2.00 m, donde se extrajo las muestras inalteradas y alteradas.

En el sitio de muestreo se encontró un estrato superior con un espesor de 40 cm, de color negro claro a gris con moderada presencia de materia orgánica. El segundo estrato se encontró hasta la profundidad de excavación de 2.00 m, presenta un color amarillo claro a blanco (**Figura 42**).



**Figura 42.** Perfil estratigráfico encontrado en la zona de estudio.

Con las muestras inalteradas tomadas a cada 20 cm, se obtuvo el perfil de humedad natural del sitio de exploración (**Figura 43**). El rango de humedades naturales que se presentan es del 26.65% a 34.41%,



**Figura 43.** Perfil de humedad natural del sitio obtenido el día 2 de junio de 2023.

A partir de la **Figura 43** se puede observar que la distribución de la humedad desde la superficie hasta la profundidad explorada permanece en valores cercanos a 33.00 %, esto puede deberse a que el agua penetra de manera uniforme en la estructura de suelo debido al fenómeno de tubificación, fenómeno que es característico de suelos con propiedades dispersivas.

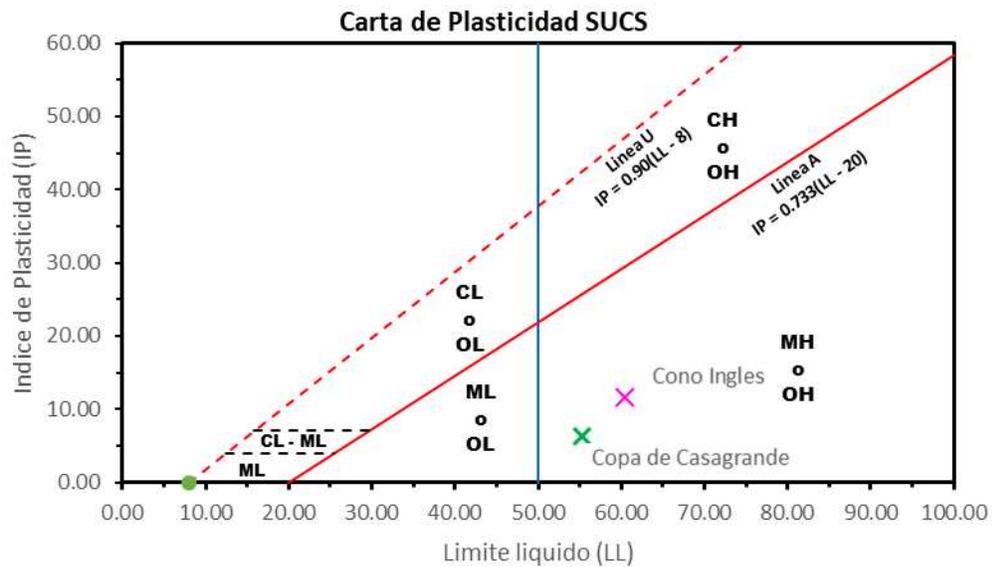
En la **Tabla 10** se presentan las propiedades índices obtenidas de la caracterización del suelo.

**Tabla 10.** Propiedades Índice del suelo en estudio.

Propiedades	Simbolo	Unidad	Valor
Gravas	G	%	0.00
Arenas	S	%	2.62
Limos	M	%	87.44
Arcillas	C	%	9.94
Limite Liquido (Cono Ingles)	LL	%	60.55
Limite Liquido (Copa de Casagrande)	LL	%	55.30
Limite Plastico	LP	%	48.98
Indice de Plasticidad (Cono Ingles)	PI	%	11.57
Indice de Plasticidad (Copa de Casagrande)	PI	%	6.32
Contraccion Lineal	LS	%	3.71
Contraccion Volumetrica	VS	%	11.62
Clasificacion del Suelo			MH
Contenido de Humedad Natural	$\omega$	%	33.21
Peso Volumetrico	$\gamma_m$	gr/cm <sup>3</sup>	1.62
Peso Volumetrico Seco	$\gamma_d$	gr/cm <sup>3</sup>	1.21
Gravedad especifica	$S_s$	gr/cm <sup>3</sup>	3.25

Se puede observar en la **Tabla 10** que la granulometría del material está constituida por 2.62% de arenas, 9.94% de arcillas y 87.44 % limos y cuenta con una gravedad especifica de 3.25, un peso volumétrico de 1.62 gr/cm<sup>3</sup> a un contenido de humedad del 33.21%, mientras que el peso volumétrico seco es de 1.21 gr/cm<sup>3</sup>.

Se presenta variación en los resultados obtenidos para el límite líquido dependiendo el método que se utilizó para determinarlo. Con el cono inglés se obtuvo un valor de límite líquido del 60.55% y con la copa de Casagrande valor de 55.30%. Sin embargo, esta diferencia no es representativa en la clasificación del material, utilizando la carta de plasticidad del sistema unificado de clasificación de suelos (**Figura 44**), donde al graficar los valores correspondientes al índice de plasticidad y límite líquido da como resultado un limo inorgánico de alta compresibilidad (MH).



**Figura 44.** Clasificación del suelo de Rioverde, S.L.P., México con la carta de plasticidad.

Con los datos obtenidos hasta el momento y aplicando la Ec. 2, se obtiene un coeficiente de subsidencia  $K_o = -2.49$ , por lo cual podemos decir inicialmente que se trata de un suelo altamente colapsable de acuerdo al criterio mostrado en la **Tabla 3**.

### 5.2 Evaluación de la dispersividad del suelo

Durante esta etapa de la investigación, se hizo la prueba de secar el material a  $105 \pm 5$  °C y posteriormente hidratar con agua destilada (**Figura 45**). El material presento una reacción exotérmica, elevando su temperatura hasta los 37°C y tuvo proceso de cementación. Esto puede deberse a cambio en las propiedades mineralógicas del suelo, lo que alteraría el comportamiento dispersivo del mismo. De esta manera se verifica por qué en las normas ASTM D 6572, D 4221 y D 4647 indican que se deber de realizar las pruebas con el material con humedad natural.



**Figura 45.** Reacción exotérmica observada al hidratar el material.

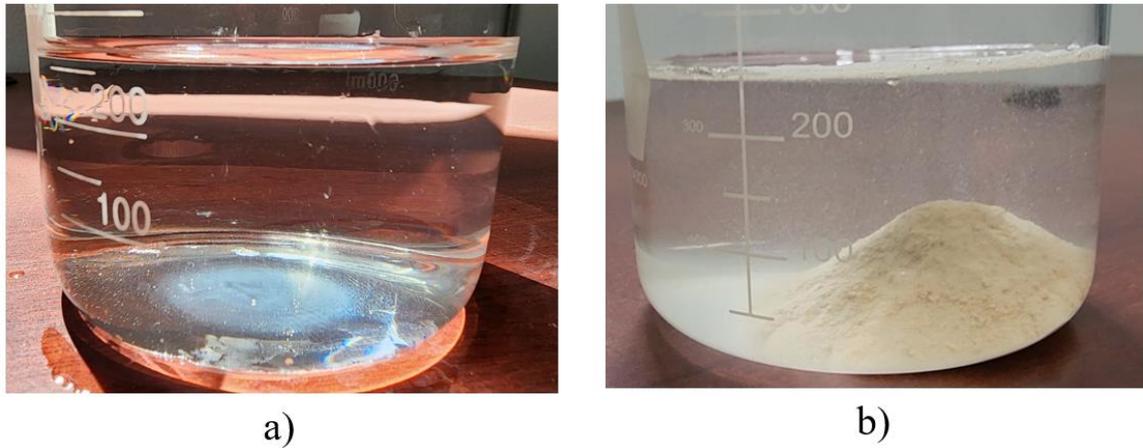
Las pruebas realizadas para la evaluación de la dispersividad del suelo, se realizaron con el material con humedad natural para las pruebas de Crumb y Pinhole, mientras que para la prueba de Doble Hidrómetro se secó a una temperatura de 60°C.

Los resultados obtenidos en la prueba de Crumb se muestran en la **Tabla 11**.

**Tabla 11.** Resultados de la Prueba de Crumb.

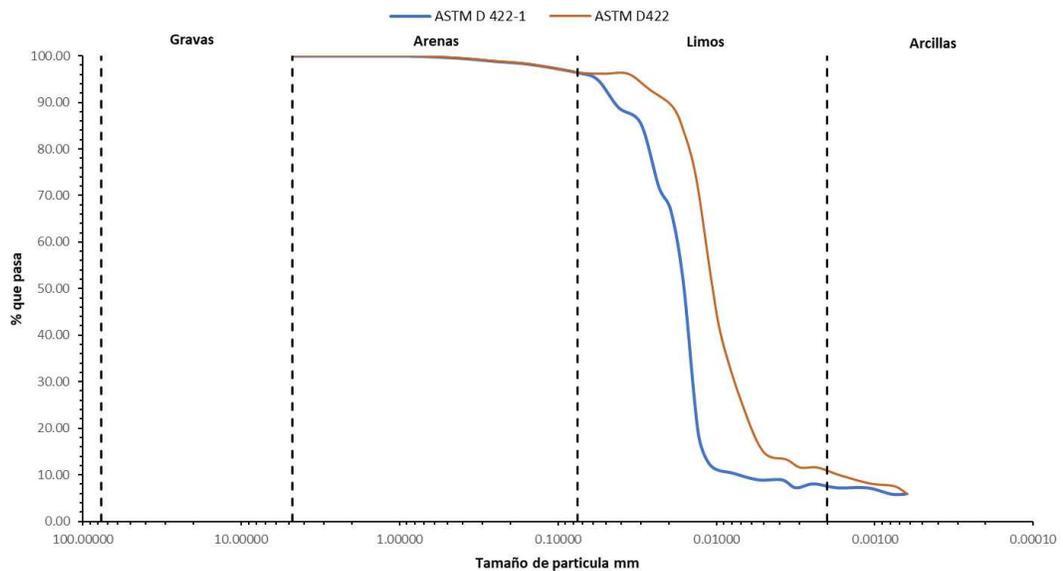
Muestra	Grado de Dispersion
1	Grado 2
2	Grado 2
3	Grado 2
4	Grado 2
5	Grado 2

En esta prueba, se ensayaron 5 especímenes cúbicos de 2 cm de dimensiones de cada lado. El suelo presenta reacción moderada al hidratar, observando una ligera turbidez en el agua, generada por las partículas que entran en suspensión, tal y como se muestra en la **Figura 46**, donde se hace el contraste del estado del agua previo y después del ensaye.



**Figura 46.** a) Agua destilada utilizada en la prueba de Crumb, b) Condición al término del ensaye.

En la **Figura 47**, se muestran las curvas granulométricas obtenidas en el análisis granulométrico vía hidrómetro usando el método descrito en la norma ASTM D422 y sin agente defloculante, ni agitación mecánica como lo indica la ASTM D4221. La **Tabla 12** muestra el porcentaje de partículas que pasan los 5  $\mu\text{m}$  en los ensayos mencionados.



**Figura 47.** Análisis granulométrico combinado.

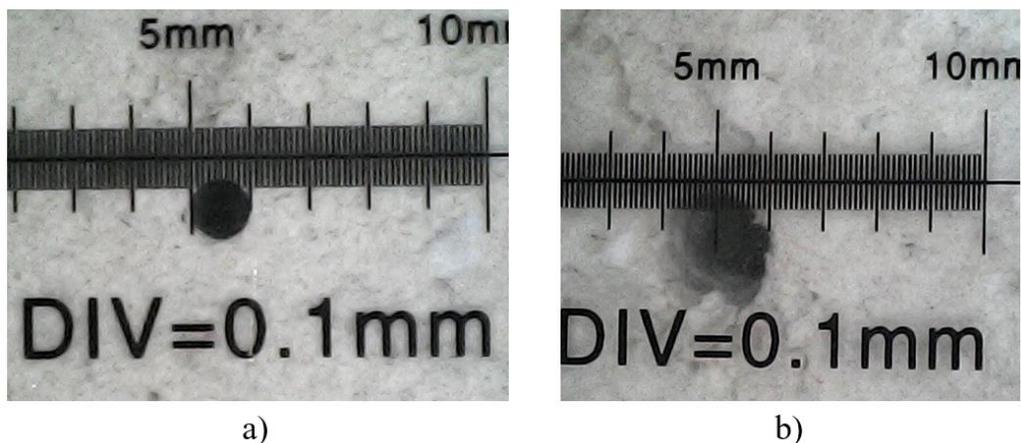
**Tabla 12.** Resultados de la Prueba del Doble Hidrómetro.

Tipo de Ensaye	% que pasa 5 $\mu$ m
ASTM D422	15.03
ASTM D4221	8.65
Porcentaje de Dispersion	57.56

En esta prueba se observa que el material a pesar de no mezclar con agente defloculante, tiende a mantenerse en suspensión. Esto se debe a la naturaleza dispersiva del material, que al hidratarse se rompen los enlaces entre las partículas y se mantiene una mínima atracción electroquímica por lo que no se forma flóculos de gran tamaño y su velocidad de sedimentación es menor.

El porcentaje de dispersión se obtiene mediante la Ec. 4, siendo este de 57.56% y utilizando el criterio de evaluación de la dispersividad de la **Tabla 6**, se clasifica el suelo como dispersivo.

La prueba de Pinhole se realizó en muestras inalteradas, en las cuales se hizo una perforación de 1 mm y se hizo pasar flujo de agua a distintas presiones. En la **Figura 48** se muestra la medición del diámetro del orificio antes y después de la prueba y los resultados obtenidos de la evaluación del potencial de erosión y turbidez se presentan en la **Tabla 13**.



**Figura 48.** Medición del orificio a) Previo b) Y después del ensaye.

**Tabla 13.** Resultados de la Prueba de Pinhole.

Muestra	Carga		Velocidad		Turbidez	Agujero Final mm	Clasificación
	Hidráulica ml	Flujo ml	s	de Flujo ml/s			
1	50	73.57	300	0.25	Poco Visible	1.90	Incrementar carga
	50	465.83	600	0.78	Poco Visible		Incrementar carga
	180	431.13	300	1.44	Ligeramente oscuro		ND3
2	50	64.51	300	0.22	Poco Visible	1.85	Incrementar carga
	50	426.71	600	0.71	Poco Visible		Incrementar carga
	180	412.87	300	1.38	Ligeramente oscuro		ND3
3	50	62.68	300	0.21	Poco Visible	1.92	Incrementar carga
	50	437.68	600	0.73	Poco Visible		Incrementar carga
	180	423.33	300	1.41	Ligeramente oscuro		ND3

En esta prueba se observa que, al someter la muestra de suelo a una carga hidráulica de 50 ml, aumenta ligeramente la velocidad del flujo después de 10 min del inicio de la prueba. Al aumentar la carga hidráulica a 180 ml se observa que se duplica la velocidad del flujo y se comienza a percibir turbidez en el flujo de salida.

La turbidez del flujo de salida se debe al arrastre de partículas de suelo generado por la erosión de la muestra de suelo. Al medir la dimensión final del agujero se observa un incremento del 85% - 90% de su tamaño inicial.

De acuerdo al criterio de evaluación de la dispersividad mostrado en la **Figura 12**, se clasifica el suelo como ND3 que corresponde a un grado de dispersión intermedia.

En la **Tabla 14** se resume los resultados de la evaluación de la dispersividad en los ensayos realizados.

**Tabla 14.** Resumen de resultados obtenidos en la evaluación de la dispersividad del material.

Prueba	Grado de Dispersión
Crumb	Intermedio
Doble Hidrometro	Dispersivo
Pinhole	Intermedio
Dictamen Final	Intermedio

En la **Tabla 14** se observa que por medio de la prueba de Crumb y Pinhole se obtiene que es medianamente dispersivo, mientras que por la prueba del Doble Hidrómetro se obtiene que

es dispersivo. Considerando que la prueba de Crumb y Pinhole representan condiciones comunes en campo de flujo estático y dinámico respectivamente, se determina clasificar el suelo con grado de dispersión intermedio.

En la **Tabla 15** se muestran los resultados obtenidos del análisis químico. Se puede observar que el suelo es alcalino al presentar un pH de 8.21, este valor se debe a la presencia de sodio intercambiable el cual corresponde a un valor de 45.59 meq/L.

**Tabla 15.** Resumen de resultados obtenidos del análisis químico del suelo en estudio.

Medición	Unidad	Valor
Ca	meq/L	539.00
Mg	meq/L	52.00
K	meq/L	2.80
Na	meq/L	45.59
CIC	meq/L	639.39
TDS	meq/L	639.39
PS	%	7.13
pH		8.21
Salinidad (CE Extracto)	dS/m	8.42

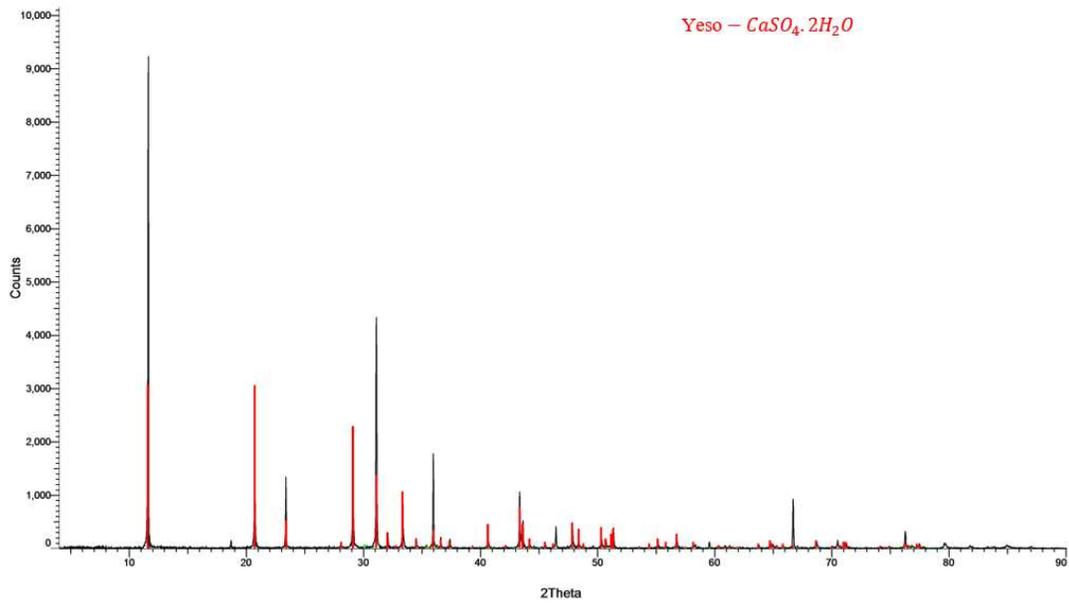
El suelo se considera un suelo salino al presentar un valor de 8.42 dS/m de salinidad de acuerdo al manual para el muestreo de suelos plantas y aguas e interpretación de análisis (Salgado-García et al., 2006).

Se presenta un porcentaje de sodio igual a 7.13%, por lo tanto, se clasifica el suelo como moderadamente dispersivo de acuerdo al Criterio para clasificar suelos dispersivos mostrado en la **Tabla 7**.

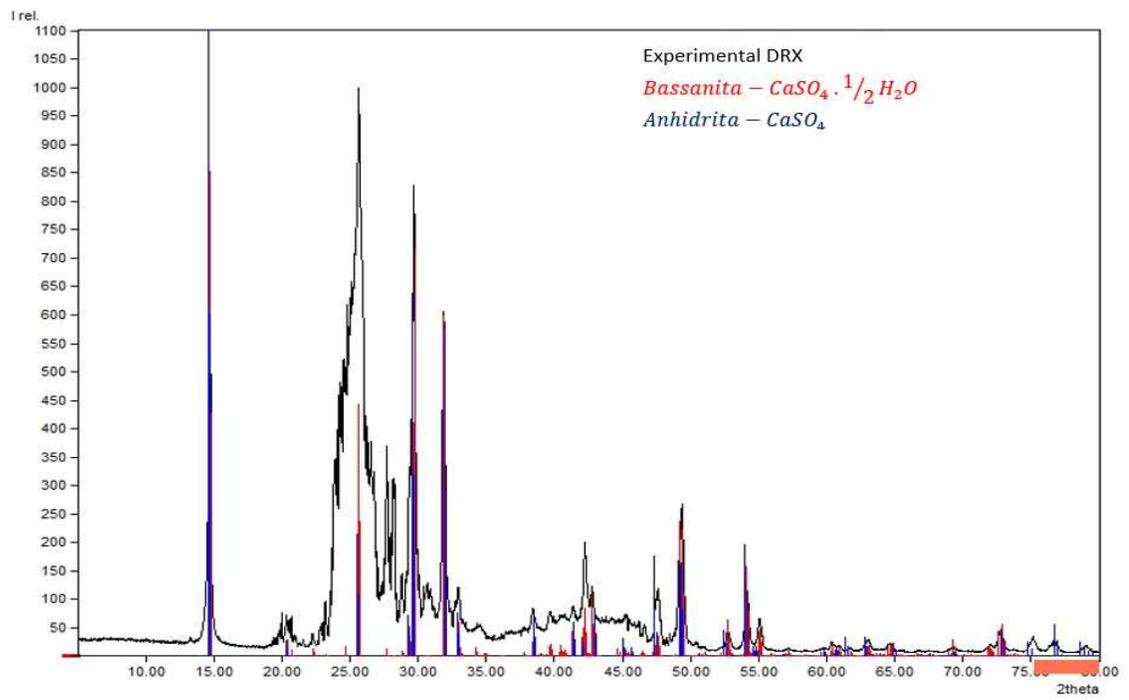
En la **Figura 49**, se muestran los difracto gramas resultantes del análisis de difracción de rayos x, en el cual se observa que el suelo tiene como mineral principal el yeso, la bassanita y la anhidrita, verificando así la alta presencia de calcio medida en el análisis químico.

Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.

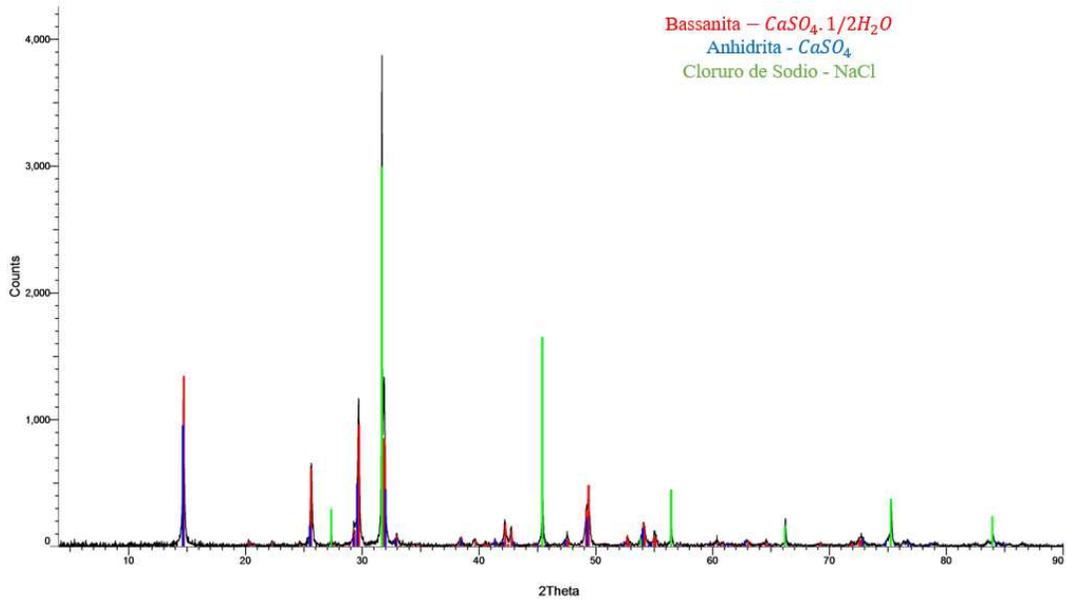
---



a)



b)

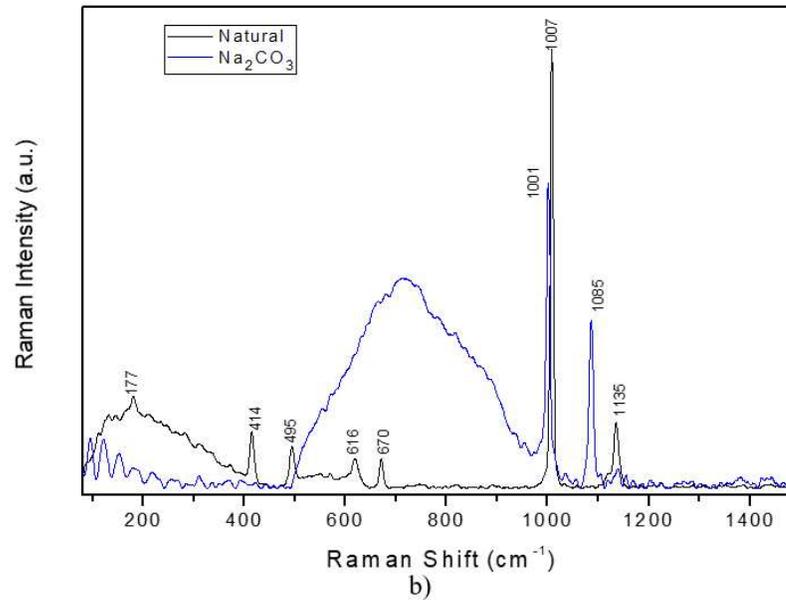
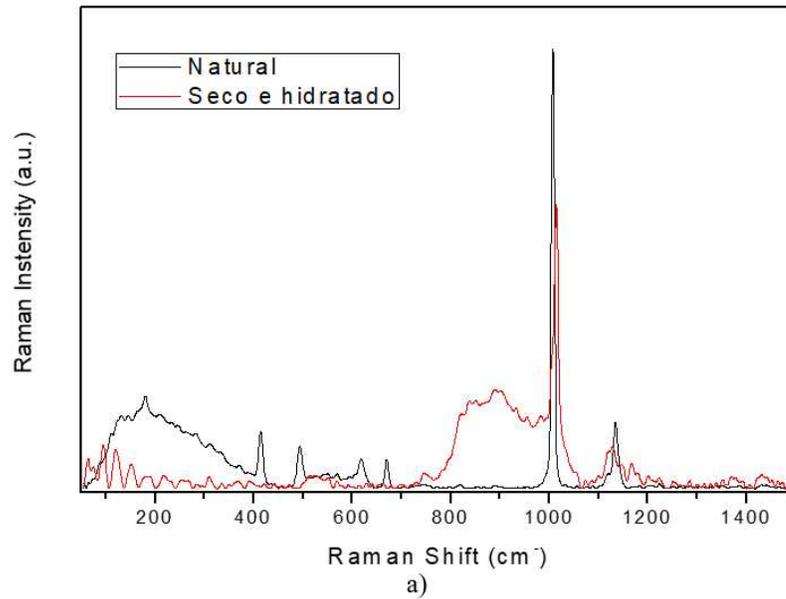


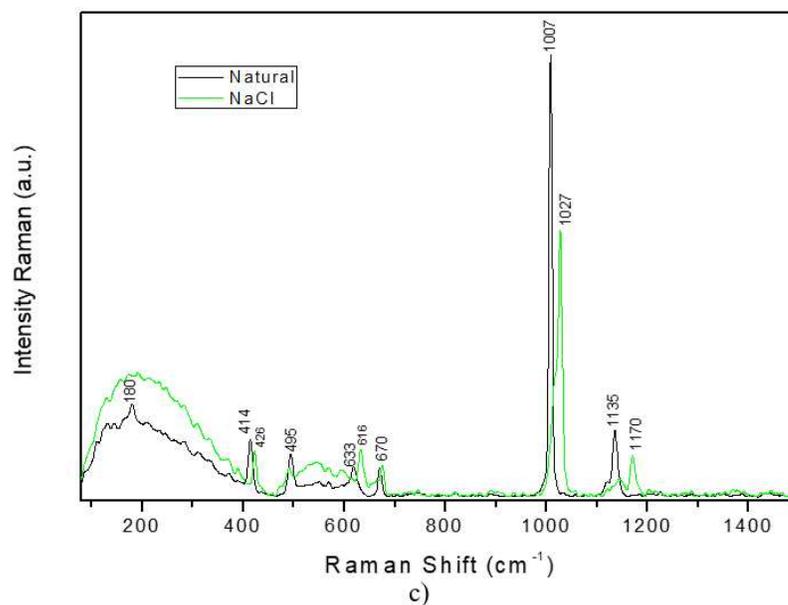
c)

**Figura 49.** Análisis mineralógico por difracción de rayos x del suelo dispersivo de la ciudad de Rioverde, S.L.P, México. a) Muestra de suelo en condiciones naturales, b) Muestra de suelo hidratada y secada en horno a 105 °C y c) Muestra de suelo mezclada con cloruro de sodio, hidratada y secada en horno a 105 °C.

En la **Figura 49a** se observa que el suelo en condiciones naturales su mineral principal es el yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) el cual es moderadamente soluble en agua (2.5 g/L) (Bock, 1961) y cuando es calentado pierde agua y se convierte primero en bassanita y posteriormente si continua el calentado en anhidrita (**Figura 49b**). La anhidrita es un mineral común en depósitos de sal, que junto con la bassanita al hidratarse se transforman en yeso. Este último fenómeno explica por qué se presentó la reacción exotérmica y cementación durante el proceso de secado del material en horno a 105°C y posterior hidratación. Al mezclar con cloruro de sodio el suelo por medio de la difracción de rayos X no es posible determinar si reacciona con los minerales del suelo de tal manera que lo detecta como un mineral adicional en el suelo (**Figura 49c**).

En la **Figura 50** se muestran los espectros resultantes del análisis Raman, donde se observa que el suelo presenta en su mayoría por sulfato de calcio ( $CaSO_4$ ), compuesto principal de los minerales determinados de la difracción de rayos x.





**Figura 50.** Comparación de espectros de Raman obtenidos del análisis del suelo dispersivo de la ciudad de Rioverde, S.L.P, México. de: a) Muestra de suelo en condiciones naturales y muestra de suelo, hidratada y secada en horno a 105° C, b) Muestra de suelo en condiciones naturales y muestra de suelo mezclada con carbonato de sodio, hidratada y secada en horno a 105° C y c) Muestra de suelo en condiciones naturales y muestra de suelo mezclada con cloruro de sodio, hidratada y secada en horno a 105 °C.

En la **Figura 50a** se observa que el suelo en condiciones naturales está compuesto en su mayoría por sulfato de calcio ( $CaSO_4$ ) aquí se presentan sus bandas de absorción características en 1135, 1007, 616 y 414  $cm^{-1}$ . Se observa que al secar el material a una temperatura de 105° C se modifica levemente la estructura química del suelo lo cual se ve reflejado en la banda ancha entre el intervalo de 800 a 1000  $cm^{-1}$  y en la reducción de la intensidad de las bandas del intervalo de 0 a 400  $cm^{-1}$ .

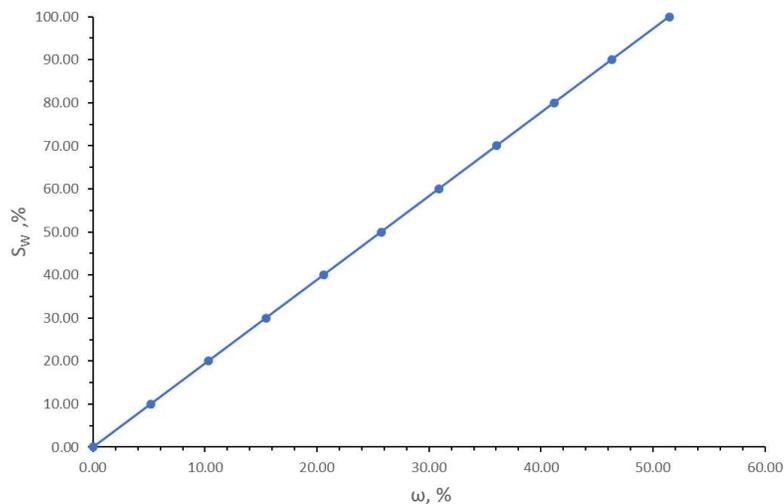
En la **Figura 50b** se aprecia en el espectro la banda en 1085  $cm^{-1}$  la cual corresponde al carbonato de sodio y se presenta una banda ancha en el intervalo de 500 a 900  $cm^{-1}$ , lo que probablemente se debe a la interacción con el sulfato de calcio del suelo natural al mezclarse con esta sal.

En la **Figura 50c** se aprecia en el espectro las bandas en  $1027$  y  $1170\text{ cm}^{-1}$  las cuales corresponden al cloruro de sodio mezclado al suelo. Además, se puede observar que la distribución de las bandas permanece muy similar, por lo que no se estaría presentando interacción del cloruro de sodio con los minerales del suelo.

### 5.3 Obtención de la curva de retención agua-suelo

Para analizar el comportamiento de los suelos dispersivos de Rioverde, S.L.P., es de gran importancia conocer la succión del suelo, la cual está en función del grado de saturación y se representara en una gráfica de succión contra grado de saturación. De igual manera es importante determinar los valores que tendrá la succión en el fenómeno de histéresis, durante la trayectoria de humedecimiento y secado.

Antes de iniciar la prueba, por medio de las relaciones gravimétricas y volumétricas, se obtiene el grado de saturación que alcanza el suelo en condiciones naturales a cierto contenido de humedad (**Figura 51**). De esta manera, se puede saber el contenido de humedad que deben tener los especímenes de suelo a utilizar en este ensaye para alcanzar el grado de saturación deseado.



**Figura 51.** Curva de grado de saturación contra contenido de humedad.

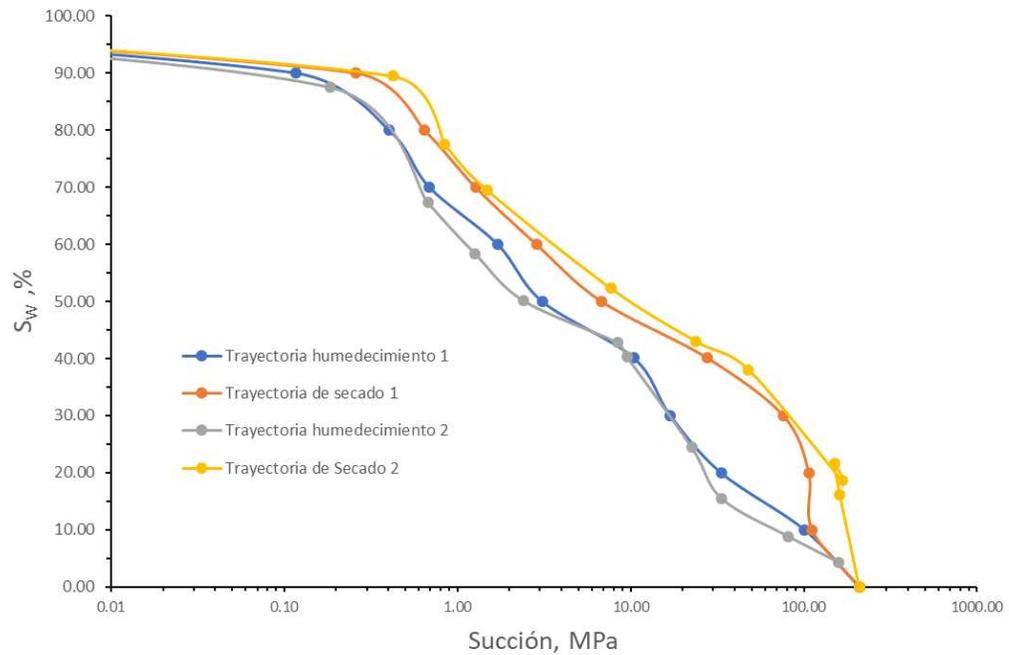
La prueba para medir la succión por el método de papel filtro, es una técnica económica pero complicada. Se recomienda utilizar guantes y cubrebocas para la manipulación del papel

filtro. La precisión de la medición de la succión puede variar considerablemente dependiendo de la rapidez con la que se realice el registro de su peso, ya que no se debe dejar expuesto al aire por tiempo prolongado para que no pierda o agarre humedad del ambiente.

La **Figura 52** muestra las curvas de retención obtenidas. Se puede observar que los valores de succión medida, aumentan significativamente al pasar de un grado de saturación de 50% a 40%, presentando valores de 3 y 10 Mpa respectivamente en trayectoria de humedecimiento. La máxima succión medida en el suelo a grados de saturación cercanos a 0% alcanzan valores de 208 Mpa. Los valores de succión determinados se utilizarán en cálculos posteriores.

Cabe mencionar que la muestra de suelo inalterado con contenido de humedad natural de 33.21% presenta un  $S_w = 64.44\%$ . Secando el material en horno a una temperatura de 60 °C se logra obtener  $S_w$  cercanos a 50%. Sin embargo, para poder secar el suelo a grados de saturación menores, es necesario secar el material a temperatura de  $105 \pm 5$  ° C.

La composición mineralógica del suelo secado a 105 °C y el sodio, se puede relacionar con el alto incremento de succión, ya que la anhidrita, bassanita y el sodio tienden a retener las moléculas de agua en su estructura, lo que dificultaría que el papel filtro que está en contacto con la muestra de suelo llegue al equilibrio del flujo de agua que se produce entre ambos y presente un bajo contenido de humedad y en consecuencia se mida un valor alto de succión.



**Figura 52.** Curva de retención agua – suelo del suelo de Rioverde, S.L.P., México.

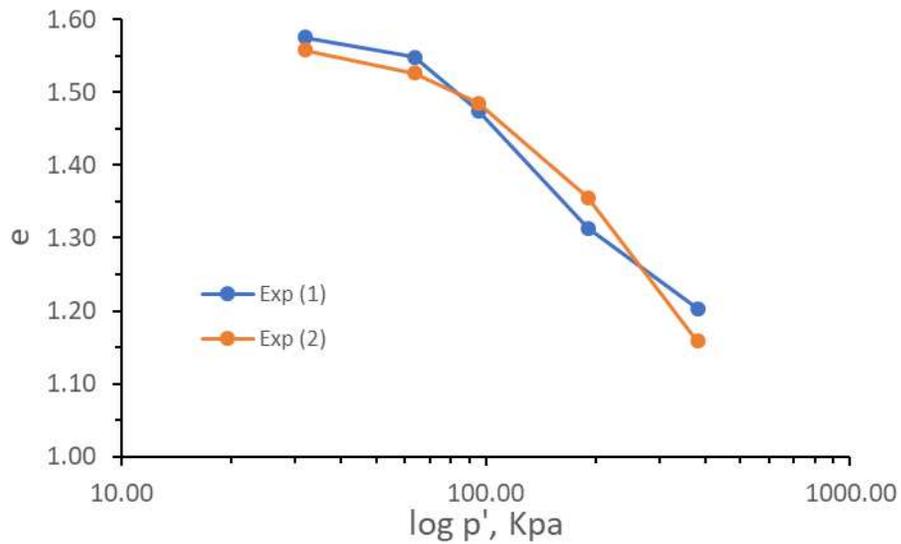
## 5.4 Pruebas mecánicas

### 5.4.1. Triple Odómetro

El primer grupo de ensayos edométricos realizadas se aplicaron las cargas de 31.78, 63.57 y 95.35 kPa. Sin embargo, el comportamiento que presentó el material en las primeras dos cargas fue elástico, por lo que fue necesario realizar dos ensayos adicionales duplicando las últimas cargas aplicadas para generar colapso. Estas cargas son de 190.71 y 381.42 kPa. Los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 16** y **Figura 53**.

**Tabla 16.** Resultados de ensayos edométricos.

$p'$ (kpa)	Réplica 1		Réplica 2	
	$e_f$	$\epsilon$ (%)	$e_f$	$\epsilon$ (%)
31.88	1.575	3.32	1.558	3.99
63.66	1.548	4.36	1.526	5.18
95.45	1.474	7.11	1.485	6.73
190.80	1.313	13.16	1.355	11.59
381.51	1.203	20.83	1.158	20.83



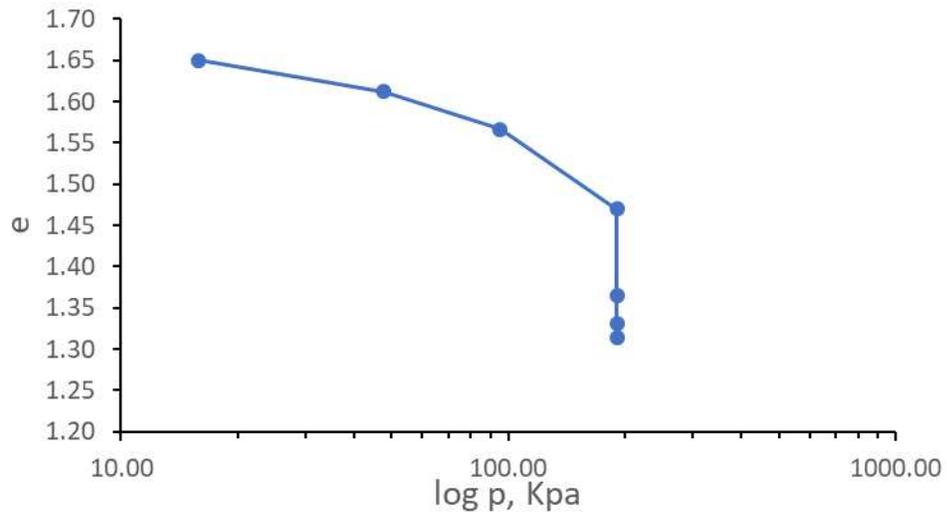
**Figura 53.** Curva de compresibilidad de ensayos edométricos.

De la curva de compresibilidad se obtiene el índice de compresión  $\lambda$  y el índice de carga-descarga  $\kappa$ , tal y como se muestra en la **Tabla 17**.

**Tabla 17.** Resultados de pendientes  $\kappa$  y  $\lambda$  de ensayos edométricos.

	$\kappa$	$\lambda$
Réplica 1	0.092	0.450
Réplica 2	0.105	0.392
Promedio	0.098	0.421

Adicionalmente de los ensayos edométricos donde se aplicó la carga de 190.71 kPa se evalúa el potencial de colapso (CP). En la **Figura 54** se muestra la variación de la relación de vacíos por carga y saturación.



**Figura 54.** Resultado de ensaye edométricos para determinar el potencial de colapso del suelo dispersivo de la ciudad de Rioverde, S.L.P.

Utilizando la Ec. 3 se determina un  $CP = 5.89\%$ , por lo cual el suelo es considerando como colapsable y susceptible a ocasionar daños considerables en cimentaciones de acuerdo al criterio de evaluación mostrado en la **Tabla 4**.

#### **5.4.2. Prueba Triaxial Consolidada Drenada (CD)**

Para evaluar la resistencia al corte a distintos grados de saturación, se realizaron ensayos triaxiales. Las probetas para la prueba triaxial se fabricaron en un molde cilíndrico de 3.71 cm de diámetro y 7.42 cm de altura, compactando en una prensa manual en tres capas hasta lograr replicar el peso volumétrico seco del material en campo y entre capas se logra el anclaje mediante escarificación.

Las probetas se prepararon a grados de saturación de 0%, 30%, 50%, 65% 80% y 100% siguiendo una trayectoria de humedecimiento. En cada prueba se ensayaron tres probetas aplicando esfuerzos de confinamiento de 10.00, 20.00 y 30.00 Ton/m<sup>2</sup>. Se realizan dos réplicas de cada prueba. Los diagramas  $p'-q'$  y  $p'-\epsilon$  obtenidos se muestran en el anexo E.

El análisis de los resultados de las pruebas triaxiales CD, se basa en la suposición de que no se presentan cambios significativos de succión en las probetas ensayadas durante la etapa de falla.

De los diagramas  $p' - q'$  se calcula el ángulo de fricción efectivo y la cohesión efectiva (**Tabla 18**) y posteriormente se grafican contra el grado de saturación. Los diagramas  $Sw - \phi'$  y  $Sw - c'$  se muestran en (**Figura 55a**) y (**Figura 55b**) respectivamente.

**Tabla 18.** Ángulo de fricción y cohesión obtenidos en ensayos triaxiales.

<b>Réplica 1</b>			
<b>Sw</b>	<b>Succión</b>	<b>c</b>	<b><math>\phi</math></b>
<b>%</b>	<b>kpa</b>	<b>Ton/m2</b>	<b>°</b>
100	0.01	0.00	33.00
80	403	3.50	35.50
65	890	10.50	37.00
50	2749	50.00	39.00
30	16971	18.00	40.50
0	208000	11.00	43.00
<b>Réplica 2</b>			
<b>Sw</b>	<b>Succión</b>	<b>c</b>	<b><math>\phi</math></b>
<b>%</b>	<b>kpa</b>	<b>Ton/m2</b>	<b>°</b>
100	0.01	0.00	34.00
84	290	3.50	34.50
66.5	700	8.00	36.50
55	1850	42.50	38.00
30	16971	22.00	40.50
0	208000	11.00	42.00

En la **Figura 55a** se observa que el ángulo de fricción efectivo se reduce de manera prácticamente lineal conforme el suelo se va saturando, teniendo valores en un rango 33 – 42 °. Este efecto puede estar ligado a la presencia del sodio y al correspondiente comportamiento dispersivo del suelo.

En la **Figura 55b** se observa que la cohesión se reduce de 50 Ton/m2 a 10.50 Ton/m2 cuando pasa de un grado de saturación de 55% a 65%. Este comportamiento es típico de los limos que al igual que las arenas presentan un máximo de cohesión. Sin embargo, en este caso la presencia de arcillas impide que la cohesión llegue a cero durante el secado.

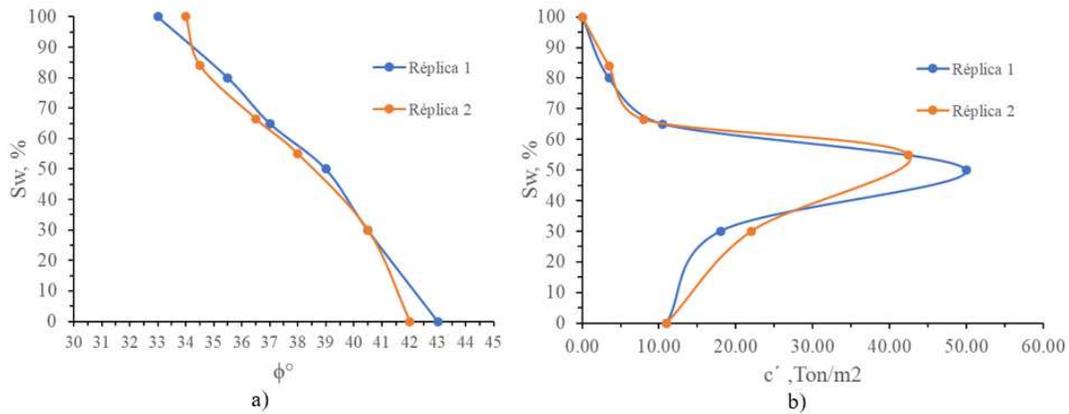


Figura 55. a) Diagrama Sw -  $\phi'$ , b) Diagrama Sw -  $c'$ .

Además, se determina el valor máximo del esfuerzo desviador en cada prueba y se gráfica contra la succión correspondiente al grado de saturación de cada prueba, tal y como se muestra en **Figura 56**.

En la **Figura 56** se observa que la resistencia al cortante se mantiene aproximadamente constante hasta succiones de 100 kPa. Posteriormente la resistencia se incrementa rápidamente hasta llegar a un valor máximo con una succión de 2749 kPa. Finalmente, la resistencia se reduce en un 60% para succiones mayores a 10000 kPa.

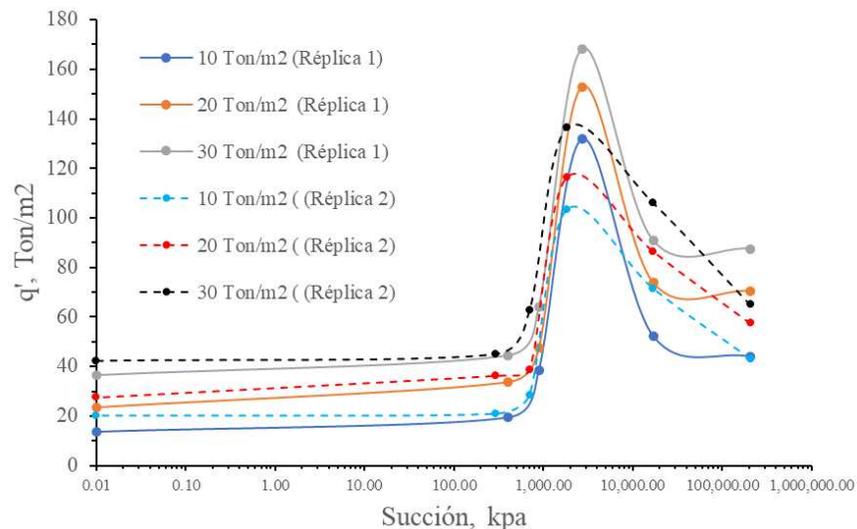
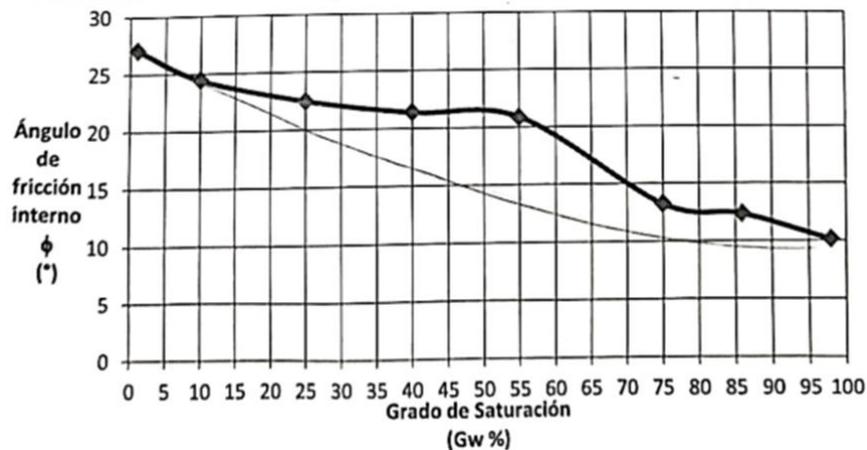
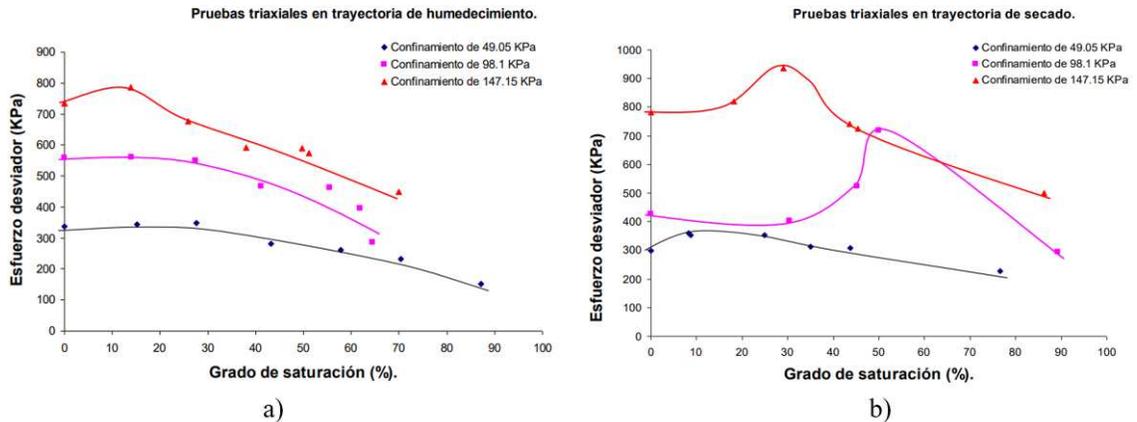


Figura 56. Diagrama  $q' - S$  para la trayectoria de humedecimiento del suelo dispersivo de la ciudad de Rioverde, S.L.P., México.

Un comportamiento de otros suelos similar a los obtenidos en esta investigación es el presentado por Paz Cruz (Paz Cruz, 2012) y por Leal Vaca (Leal Vaca, 2014) cuyos resultados se muestran en la **Figura 57** y **Figura 58** respectivamente.



**Figura 57.** Ángulo de fricción a diferentes grados de saturación de un limo altamente compresible (Paz Cruz, 2012).



**Figura 58.** Resultados de ensayos triaxiales de una arena limosa, grado de saturación – esfuerzo desviador, para confinamientos de 49.05 kPa, 98.10 kPa y 147.15 kPa a) Trayectoria de Humedecimiento, b) Trayectoria de Secado (Leal Vaca, 2014).

En la **Figura 57** se observa que, al incrementar el grado de saturación del limo de alta compresibilidad, su ángulo de fricción se reduce de manera casi lineal.

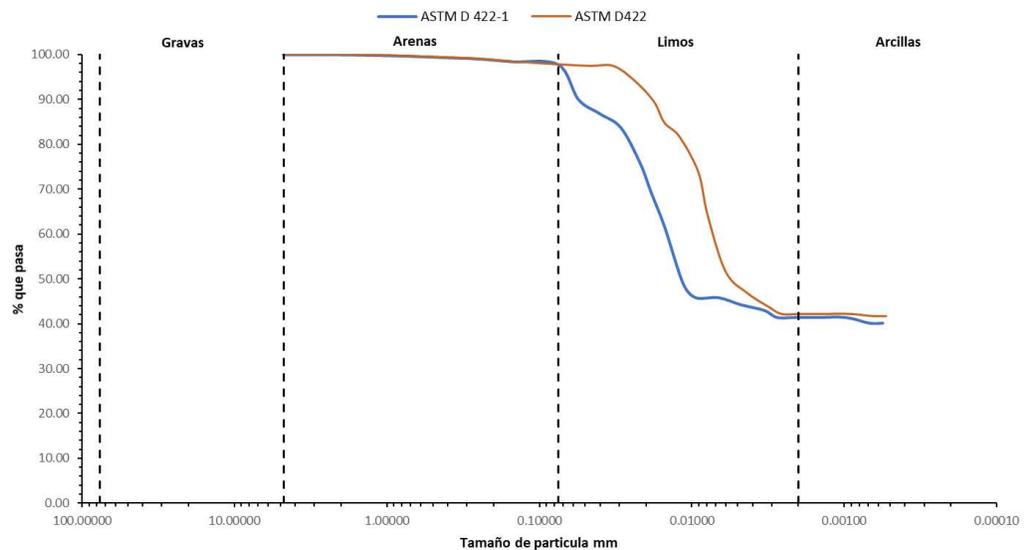
En la **Figura 58** se observa que se presenta un máximo de esfuerzo desviador en la arena limosa a cierto grado de saturación y se reduce para grados de saturación mayores y menores a este punto.

En el suelo en estudio, este fenómeno se debe a la combinación de la reducción del ángulo de fricción y de un máximo de cohesión conforme se incrementa el grado de saturación. Estos casos no han sido completamente documentados y analizados en la literatura, ya que en general, la succión incrementa la resistencia al corte de un suelo no saturado. En caso del suelo estudiado la presencia de sodio y yeso en la mineralogía del suelo además de un porcentaje reducido de arcilla (10%) puede estar detrás de este comportamiento.

### 5.4.3. Pruebas con Sodio

Para evaluar el efecto del sodio en el comportamiento hidromecánico del suelo, se aumenta su porcentaje de tal manera que el grado de dispersión sea del 100% medido utilizando la prueba de doble hidrómetro.

Se utilizó en primer lugar carbonato de sodio ( $Na_2CO_3$ ) aumentando el porcentaje de sodio en el suelo hasta un 22.13%. En la **Figura 59** y **Tabla 19**, se muestra las curvas granulométricas y resultados obtenidos en la prueba de doble hidrómetro respectivamente.



**Figura 59.** Análisis granulométrico combinado en suelo mezclado con carbonato de sodio.

**Tabla 19.** Resultados obtenidos en la prueba de Doble Hidrómetro en suelo mezclado con carbonato de sodio.

Tipo de Ensaye	% que pasa 5 $\mu$ m
ASTM D422	48.67
ASTM D4221	44.42
Porcentaje de Dispersion	91.26

Aumentando el porcentaje de sodio a 22.13 % el porcentaje de dispersión aumenta hasta un valor de 91.26%. Con este porcentaje se fabricaron las probetas para realizar los ensayos triaxiales. Sin embargo, la interacción determinada del análisis Raman del carbonato de sodio con el sulfato presente en el suelo mostrado en la **Figura 59** se observa de manera física en la reacción exotérmica al mezclar el suelo con el carbonato de sodio e hidratarlo.

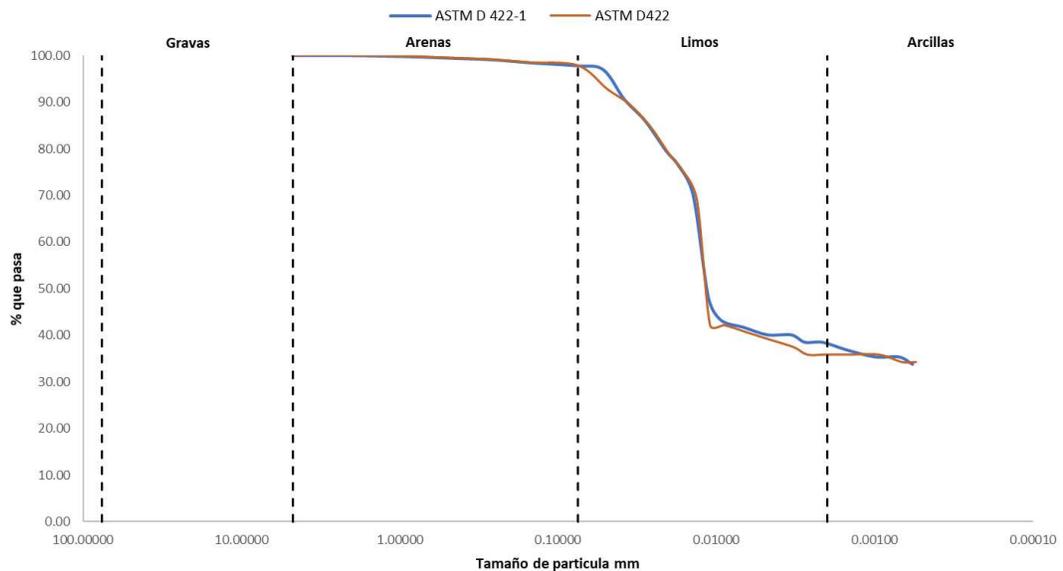
Minutos después de la fabricación de las probetas durante el proceso de secado a temperatura ambiente se observó un pequeño incremento en sus dimensiones y agrietamiento a causa de la reacción mencionada (**Figura 60**).



**Figura 60.** Agrietamiento presentado en probetas fabricadas con suelo mezclado con carbonato de sodio.

El agrietamiento que sufren las probetas induce a la falla al cortante incluso con la aplicación mínima de esfuerzos, esto generaría incertidumbre en los resultados que se obtuvieran en los ensayos triaxiales. Por esta razón se descartó mezclar carbonato de sodio con el suelo, ya que posiblemente el carbono está reaccionando con alguno de los elementos presentes en el suelo.

Como segunda opción se utilizó Cloruro de Sodio grado reactivo (NaCl) para aumentar el porcentaje sodio en el suelo de igual manera a 22.13% y se realizó la prueba del doble hidrómetro para evaluar el grado de dispersión. En la **Figura 61** y **Tabla 20**, se muestra las curvas granulométricas y resultados obtenidos en la prueba de doble hidrómetro respectivamente.



**Figura 61.** Análisis granulométrico combinado en suelo mezclado con cloruro de sodio.

**Tabla 20.** Resultados obtenidos en la prueba de Doble Hidrómetro en suelo mezclado con cloruro de sodio.

Tipo de Ensaye	% que pasa 5 $\mu$ m
ASTM D422	39.39
ASTM D4221	40.33
Porcentaje de Dispersion	102.38

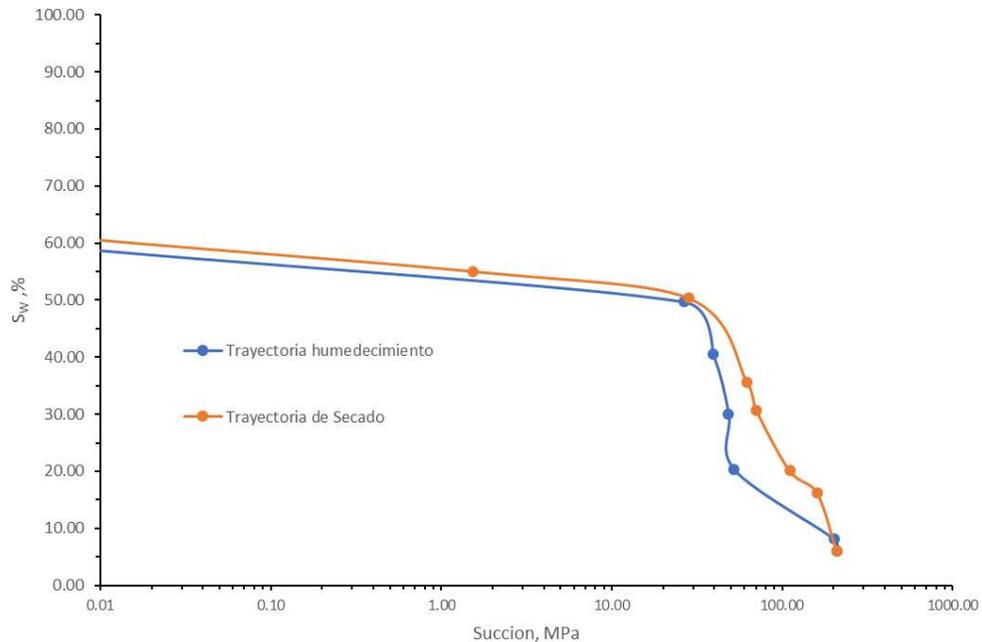
Aumentando el porcentaje de sodio a 22.13 % utilizando cloruro de sodio, el porcentaje de dispersión aumenta hasta un valor de 102.38% considerándolo como altamente dispersivo. Al fabricar las probetas para los ensayos triaxiales, se observa que la mezcla de cloruro de sodio con el suelo es más estable (**Figura 62**).



**Figura 62.** Comparación de probetas fabricadas con carbonato de sodio y cloruro de sodio.

Se determina la curva de retención agua - suelo utilizando el porcentaje de sodio mencionado. La **Figura 63** muestra las curvas de retención obtenidas. Se observa que para grados de saturación menores al 50% se presentan valores de succión mayores a 30Mpa, hasta alcanzar un valor de 208 Mpa en un grado de saturación cercano a 0%. Se presenta una

reducción considerable de la succión al pasar de 50 a 60% de grado de saturación y para grados de saturación mayores a 60% la succión es casi nula.



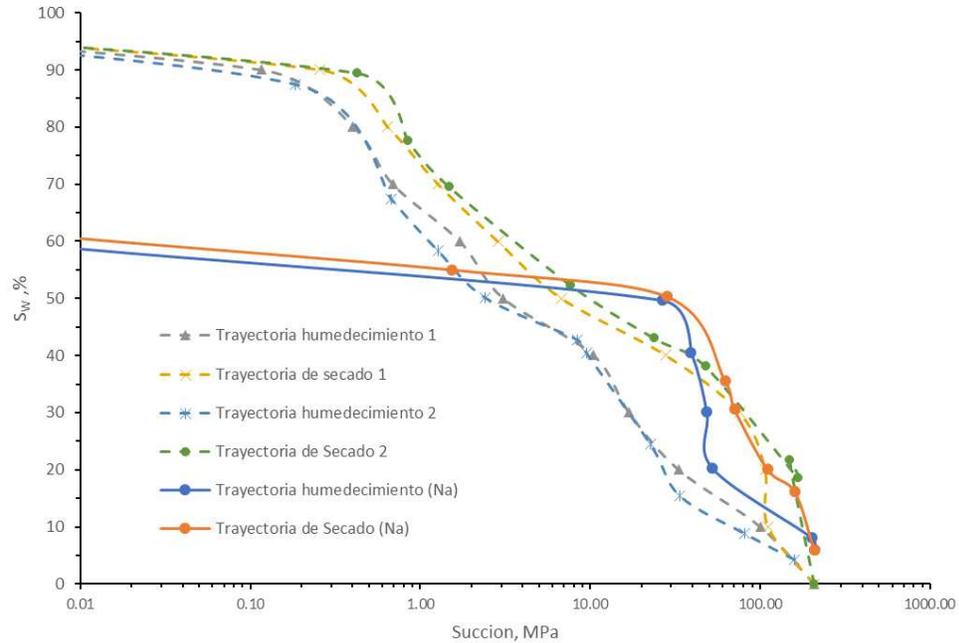
**Figura 63.** Curva de retención agua - suelo del suelo mezclado con cloruro de sodio.

Sobreponiendo las curvas de retención obtenidas en condiciones naturales del suelo y al aumentar su porcentaje de sodio (**Figura 64**), observamos que se presentan valores muy similares de succión para grados de saturación menores a 40%. Se verifica el comportamiento hidráulico observado por Garakani (Garakani et al., 2018), donde se menciona que el cloruro de sodio no tiene influencia significativa en la magnitud de la succión matricial.

La reducción de los valores de succión para grados de saturación mayores a 50% podría deberse más a un fenómeno físico. Durante la preparación de las muestras para realizar la medición de succión por el método de papel filtro, se observó que a grados de saturación mayores a 50% la estructura del suelo comienza a erosionarse.

Por lo tanto, al aumentar el grado de saturación a valores mayores del 50% ocurre un reacomodo en la estructura del suelo a causa de la dispersión del material. Esto generaría

poros de mayor tamaño en el suelo mezclado con cloruro de sodio y por lo tanto se obtienen valores bajos de succión a estos grados de saturación.

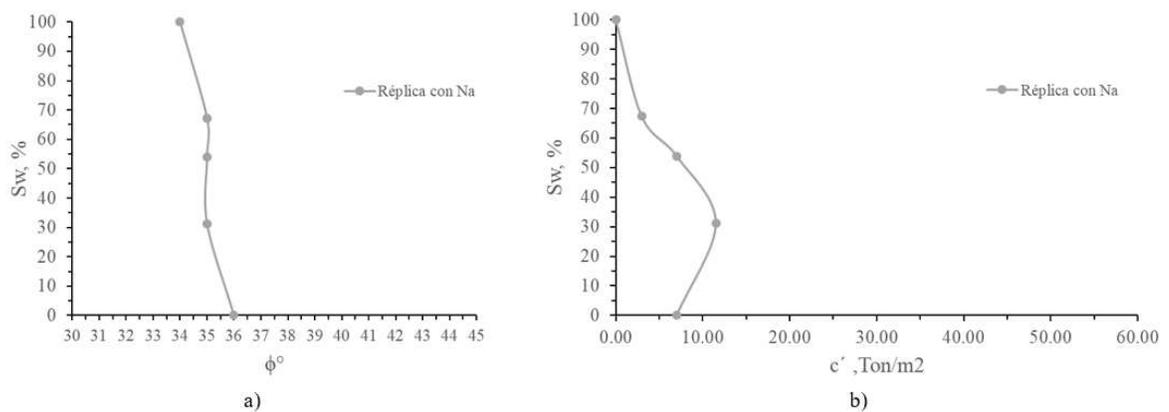


**Figura 64.** Comparativa de la curva de retención del suelo natural y suelo mezclado con cloruro de sodio.

Para los ensayos triaxiales, las probetas con cloruro de sodio se prepararon a grados de saturación de 0%, 30%, 50%, 65% y 100% siguiendo una trayectoria de humedecimiento. En cada prueba se ensayaron tres probetas aplicando esfuerzos de confinamiento de 10.00, 20.00 y 30.00 Ton/m<sup>2</sup>. Los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 21** los diagramas  $S_w - \phi'$  y  $S_w - c'$  en la **Figura 65a** y **Figura 65b** respectivamente.

**Tabla 21.** Ángulo de fricción y cohesión obtenidos en ensayos triaxiales de probetas de suelo mezclado con cloruro de sodio.

<b>Sw</b> <b>%</b>	<b>Succion</b> <b>kpa</b>	<b>c</b> <b>Ton/m2</b>	<b>φ</b> <b>°</b>
100	0.01	0.00	34.00
67	0.04	3.00	35.00
54	1100	7.00	35.00
31	48349	11.50	35.00
0	208000	7.00	36.00



**Figura 65.** a) Diagrama Sw -  $\phi'$ , b) Diagrama Sw -  $c'$  de suelo mezclado con cloruro de sodio.

En la **Figura 65a** se observa que el ángulo de fricción efectivo se reduce de manera prácticamente lineal conforme el suelo se va saturando, teniendo valores casi constantes en un rango 34 – 36 °.

En la **Figura 65b** se observa que la mayor cohesión se presenta a un grado de saturación de 31%, teniendo un valor de 11.50 Ton/m2 y se reduce a un valor de 3.00 Ton/m2 cuando pasa a un grado de saturación de 67%. Sin embargo, se observa una gran reducción de la cohesión y ángulo de fricción respecto a los obtenidos con el suelo en estado natural.

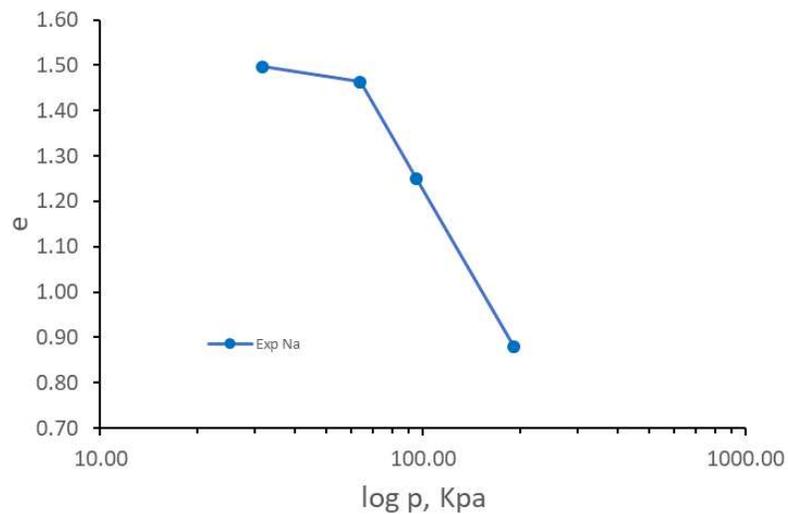
Al aumentar el porcentaje de sodio en el suelo, la cohesión se reduce en un 80% mientras que el ángulo de fricción se reduce un 20% aproximadamente. Esto se debe a que la

estructura del suelo se vuelve más inestable y entre más dispersivo sea un material, la reducción de la resistencia al cortante se presentara a menores grados de saturación.

Para evaluar el comportamiento volumétrico del suelo agregando sodio, se realizó una serie de ensayos edométricos aplicando cargas de 31.78, 63.57, 95.35 y 190.71 kPa. Los resultados obtenidos se presentan en la **Tabla 22 Y Figura 66**.

**Tabla 22.** Resultados de ensayos edométricos con suelo mezclado con cloruro de sodio.

$p'$ (kpa)	$e_f$	$\epsilon$ (%)
31.78	1.497	6.25
63.57	1.463	7.54
95.35	1.249	15.57
190.71	0.879	29.28



**Figura 66.** Curva de compresibilidad de ensayos edométricos de suelo mezclado con cloruro de sodio.

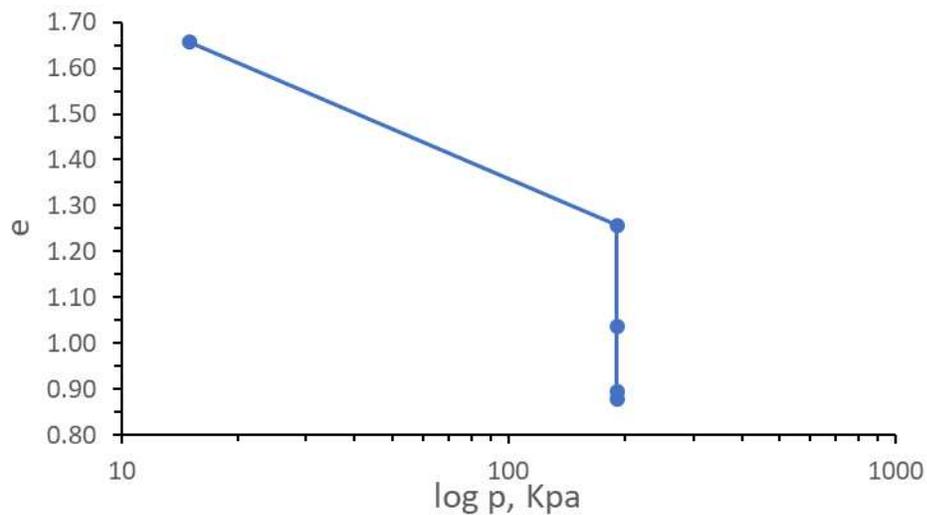
De la curva de compresibilidad se obtiene el índice de compresión  $\lambda$  y el índice de carga-descarga  $\kappa$  que se muestran en la **Tabla 23**.

**Tabla 23.** Resultados de pendientes  $\kappa$  y  $\lambda$  de ensayos edométricos de suelo mezclado con cloruro de sodio.

	$\kappa$	$\lambda$
Réplica con Na	0.114	1.224

Se observa que al aumentar el porcentaje de sodio en el suelo ocasiona mayores asentamientos, de tal manera que la relación de vacíos se reduzca 15 y 35 % más para las cargas de 95.35 y 190.71 kPa respectivamente. Por lo tanto, las pendientes  $\kappa$  y  $\lambda$  son mayores.

De la carga de 190.71 kPa se evalúa de igual manera el potencial de colapso, tal y como se muestra en la **Figura 67**.



**Figura 67.** Resultado de ensayo edométricos para determinar el potencial de colapso del suelo mezclado con cloruro de sodio.

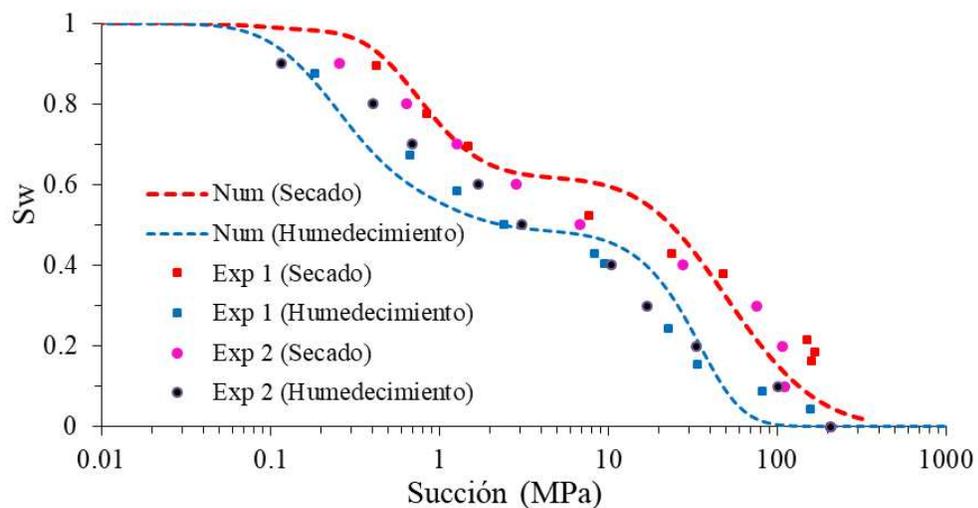
Utilizando la Ec. 3 se determina un potencial de colapso igual a 14.23% el cual corresponde a un suelo altamente colapsable y que generaría problemas muy severos en cimentaciones.

La reducción de la resistencia y el aumento del potencial de colapso del suelo mezclado con cloruro de sodio difiere al comportamiento observado por Abbeche (Abbeche et al., 2016) y Garakani (Garakani et al., 2018). Estos autores mencionan que el uso de cloruro de sodio en el suelo mejora las propiedades mecánicas por lo que no se confirman sus resultados para el suelo en estudio.

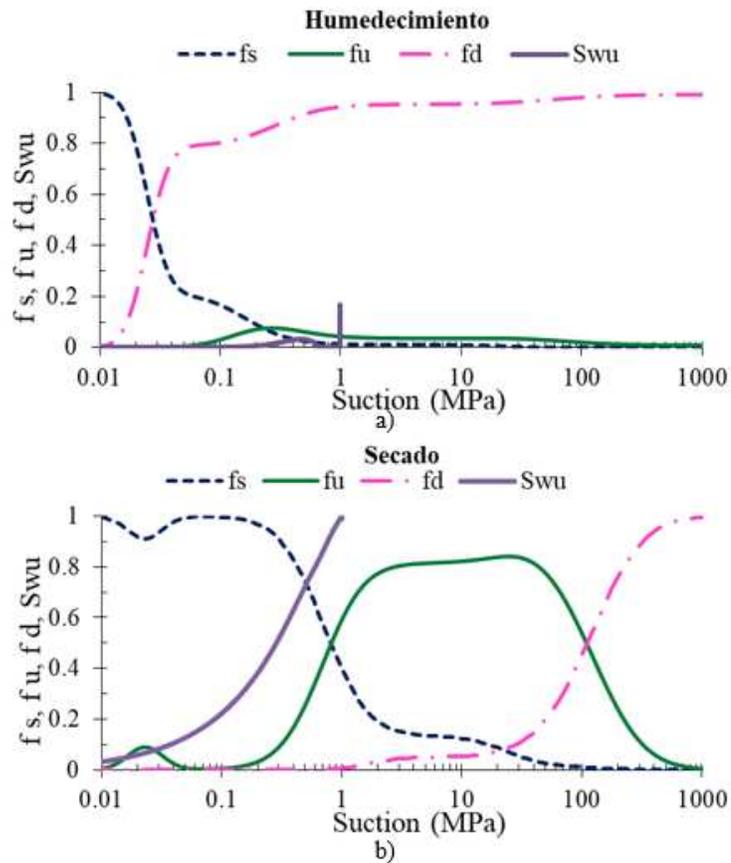
## 6. MODELACIÓN

Para simular el comportamiento volumétrico y resistencia al cortante del suelo en estudio basándose en el principio de esfuerzos efectivos de Bishop, es necesario determinar los valores del parámetro  $\chi$  de acuerdo a los ciclos de secado y humedecimiento del suelo.

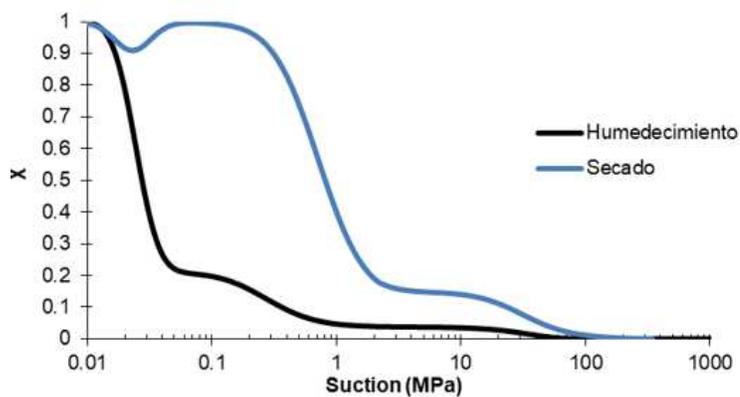
Para esto, utilizando el modelo sólido poroso descrito anteriormente en este documento se reproduce una curva de retención teórica y se ajusta con la curva de retención experimental (**Figura 68**). De esta manera se obtiene adicionalmente la distribución de tamaño de poro teórica de sólidos, cavidades y enlaces del suelo y cuantificar  $f^s$ ,  $f^u$ ,  $f^d$  y  $S_w^u$  (**Figura 69**) que son requeridos para determinar el parámetro  $\chi$  (**Figura 70**).



**Figura 68.** Simulación numérica de la curva de retención agua – suelo obtenida con el modelo sólido poroso.

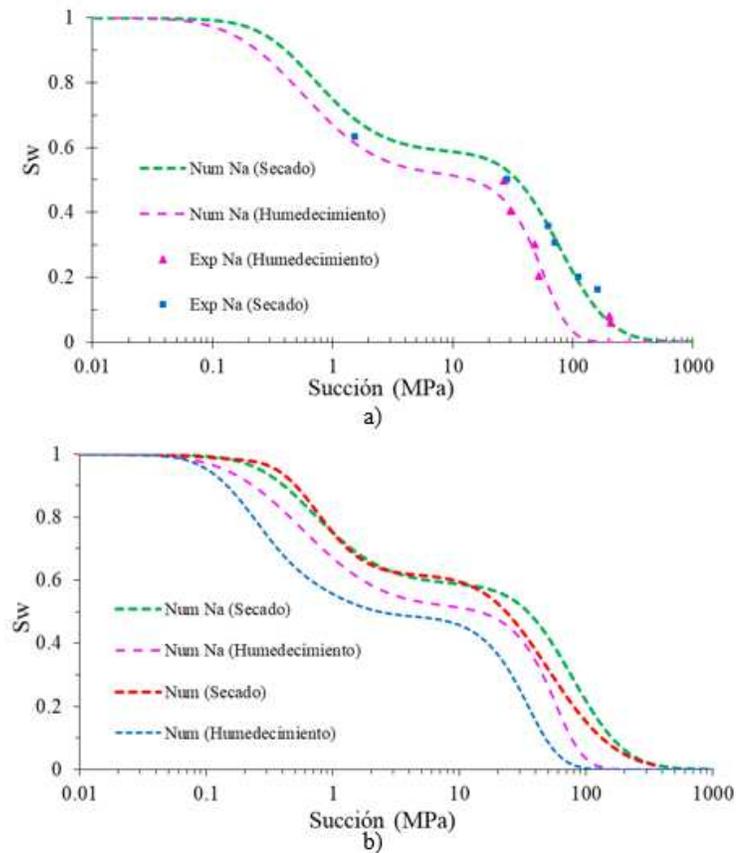


**Figura 69.** Simulación numérica con el modelo sólido poroso de parámetros  $f_s$ ,  $f_u$ ,  $f_d$  y  $S_{wu}$  para: a) Trayectoria de humedecimiento, b) Trayectoria de secado.



**Figura 70.** Simulación numérica con el modelo sólido poroso de valores del parámetro  $\chi$  en trayectoria de secado y humedecimiento.

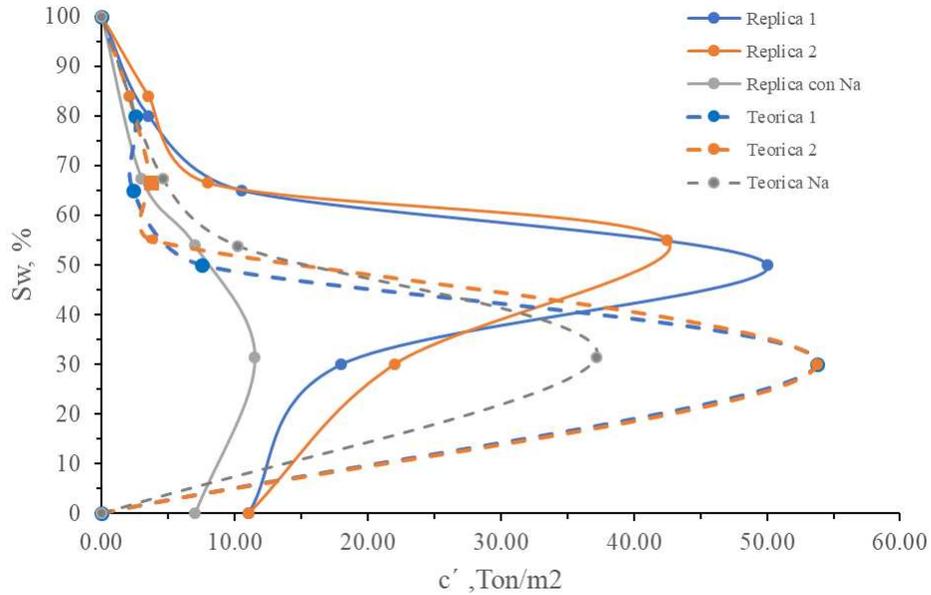
Se realiza la simulación de igual manera para el suelo mezclado con cloruro de sodio (**Figura 71**). Sin embargo, se observa que la curva de retención del suelo mezclado con cloruro de sodio mantiene una trayectoria similar a la obtenida con el suelo en estado natural. Esto se debe a que los valores de succión medidas para grados de saturación menores a 50% son muy parecidos en ambos suelos. Por lo tanto, se tienen los mismos valores de  $\chi$ .



**Figura 71.** a) Simulación numérica de la curva de retención del suelo mezclado con cloruro de sodio obtenida con el modelo sólido poroso; b) Comparación de la curva de retención del suelo natural y mezclado con cloruro de sodio.

Teniendo los valores del parámetro  $\chi$  utilizamos la ecuación de Bishop para evaluar la resistencia al corte teórica del suelo (**Figura 72**). Se obtiene un valor teórico máximo de resistencia al corte similar al experimental, el cual se presenta a un grado de saturación de 30%. Mientras que para el suelo mezclado con sodio el valor teórico difiere al obtenido

experimental. Esto se debe a que la disminución de resistencia es generada por el aumento del grado de dispersión del suelo.



**Figura 72.** Comparación teórica experimental de la resistencia al cortante del suelo en estudio.

La simulación del comportamiento volumétrico se realiza utilizando el marco teórico elastoplástico mencionado y se construye el modelo del suelo para los dos grupos correspondientes a las réplicas de los ensayos edométricos realizados al suelo en condiciones naturales y para el tercer grupo correspondiente a la réplica realizada al suelo mezclado con cloruro de sodio.

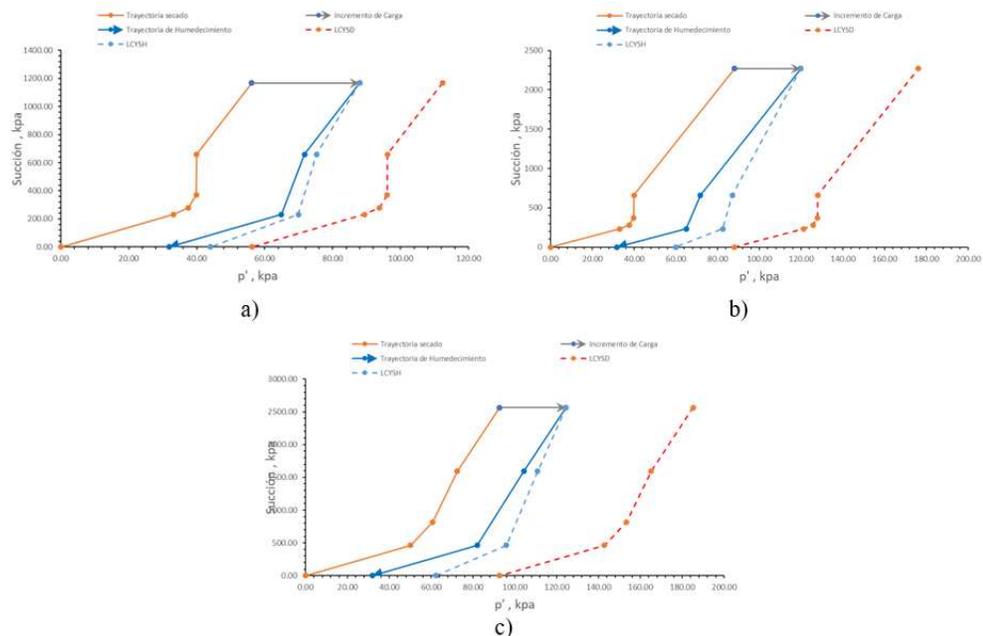
El modelo se inicia generando la trayectoria de secado hasta alcanzar la succión que tenía cada muestra al inicio de los ensayos edométricos y se obtiene su superficie de colapso por carga ( $LC_D$ ). Esta superficie  $LC_D$  nos indica el límite donde las deformaciones que se presentan en el suelo son recuperables (elásticas). Cuando se aplica un incremento de carga ( $\Delta P$ ) que sobrepase a la superficie  $LC_D$  se generaran deformaciones irreversibles (plásticas).

Posteriormente se realiza el incremento de carga ( $\Delta P$ ) al cual fue sometida cada muestra y se genera su trayectoria de humedecimiento que presenta durante el proceso de saturación. De igual manera se obtiene la superficie de colapso por carga para la trayectoria de humedecimiento ( $LC_H$ ) por medio de la Ec. 21 y la magnitud de las deformaciones se determinan con la Ec. 22. Los detalles de los cálculos se muestran en el anexo H.

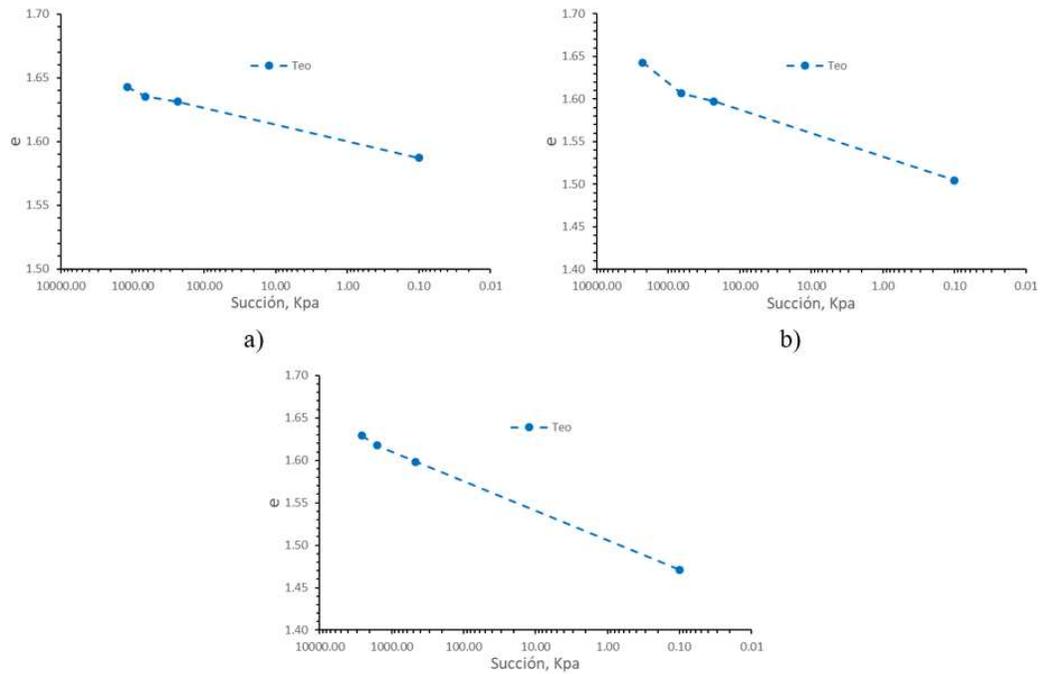
En la **Tabla 24** se muestran los parámetros necesarios para generar el modelo para las muestras cargadas con 31.78 kPa y saturada en tres incrementos. Los modelos generados y deformaciones calculadas se muestran en la **Figura 73** y **Figura 74** respectivamente.

**Tabla 24.** Parámetros para generar modelo de muestras cargadas a 31.78 kPa.

	<b>Réplica 1</b>	<b>Réplica 2</b>	<b>Réplica Na</b>
$\lambda$	-0.450	-0.392	-1.224
$\kappa$	-0.092	-0.105	-0.114
$S_w$	54.56	50.95	56.48
$\chi_0 S_0$	56.18	88.05	92.63
$\Delta P$	31.78	31.78	31.78
$e_H$	1.643	1.643	1.629



**Figura 73.** Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 31.78 kPa, a) Réplica 1, b) Réplica 2 y c) Réplica suelo mezclado con cloruro de sodio.

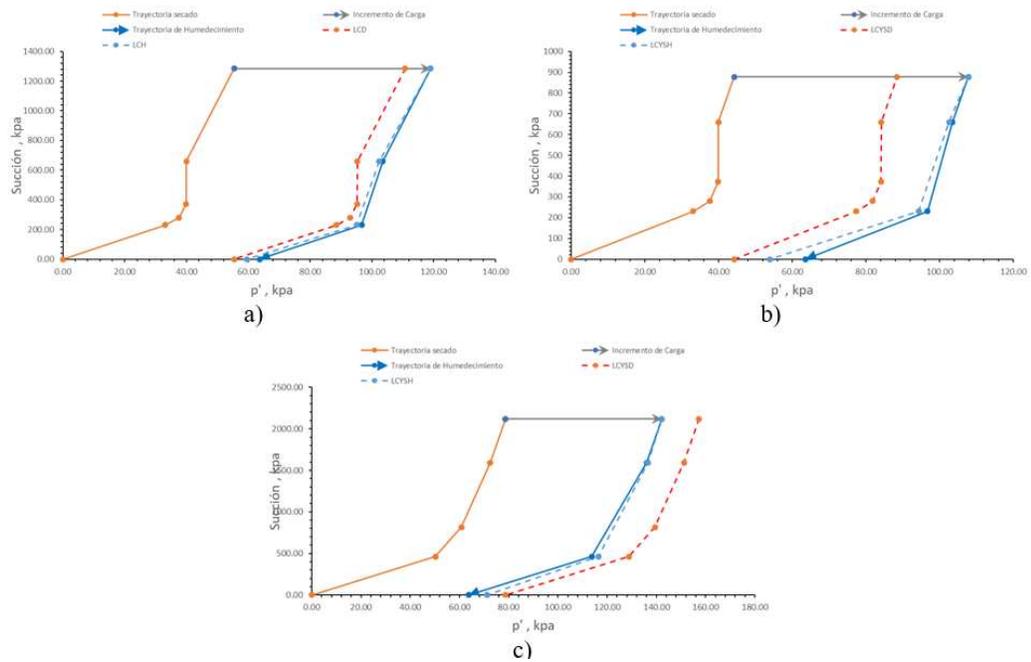


**Figura 74.** Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestras cargadas a 31.78 kPa, a) Réplica 1, b) Réplica 2 y c) Réplica suelo mezclado con cloruro de sodio.

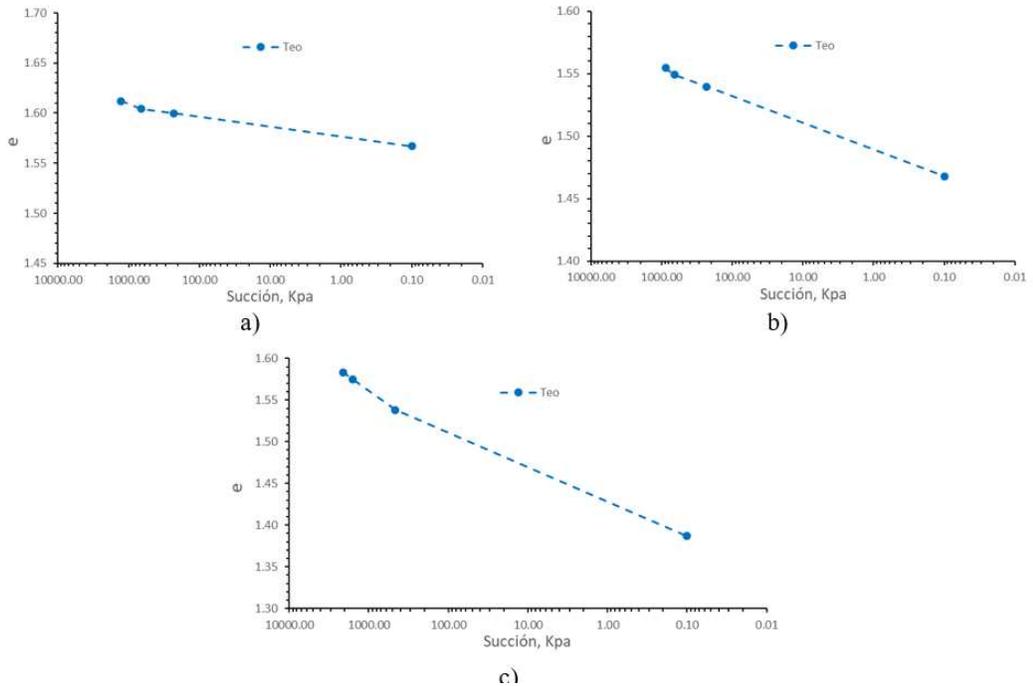
En la **Tabla 25** se muestran los parámetros necesarios para generar el modelo para las muestras cargadas con 63.57 kPa y saturada en tres incrementos. Los modelos generados y deformaciones calculadas se muestran en la **Figura 75** y **Figura 76** respectivamente.

**Tabla 25.** Parámetros para generar modelo de muestras cargadas a 63.57 kPa.

	<b>Réplica 1</b>	<b>Réplica 2</b>	<b>Réplica Na</b>
$\lambda$	-0.450	-0.392	-1.224
$\kappa$	-0.092	-0.105	-0.114
$S_w$	53.33	57.24	58.01
$\chi_0 S_0$	55.38	44.24	78.65
$\Delta P$	63.57	63.57	63.57
$e_H$	1.612	1.555	1.583



**Figura 75.** Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 63.57 kPa, a) Réplica 1, b) Réplica 2 y c) Réplica suelo mezclado con cloruro de sodio.

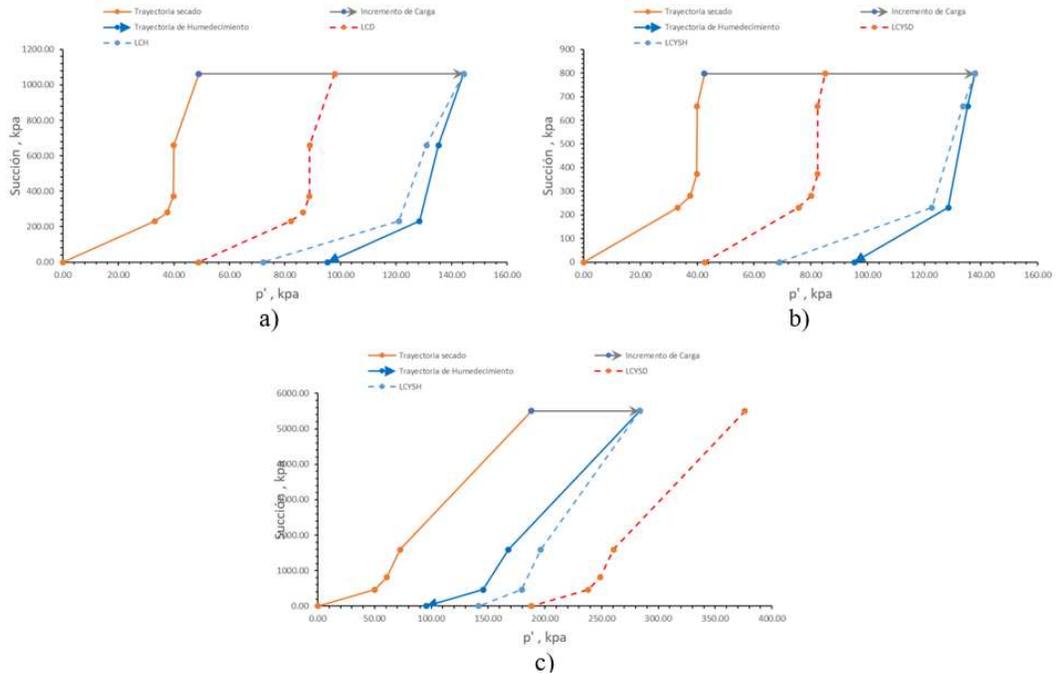


**Figura 76.** Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestras cargadas a 63.57 kPa, a) Réplica 1, b) Réplica 2 y c) Réplica suelo mezclado con cloruro de sodio.

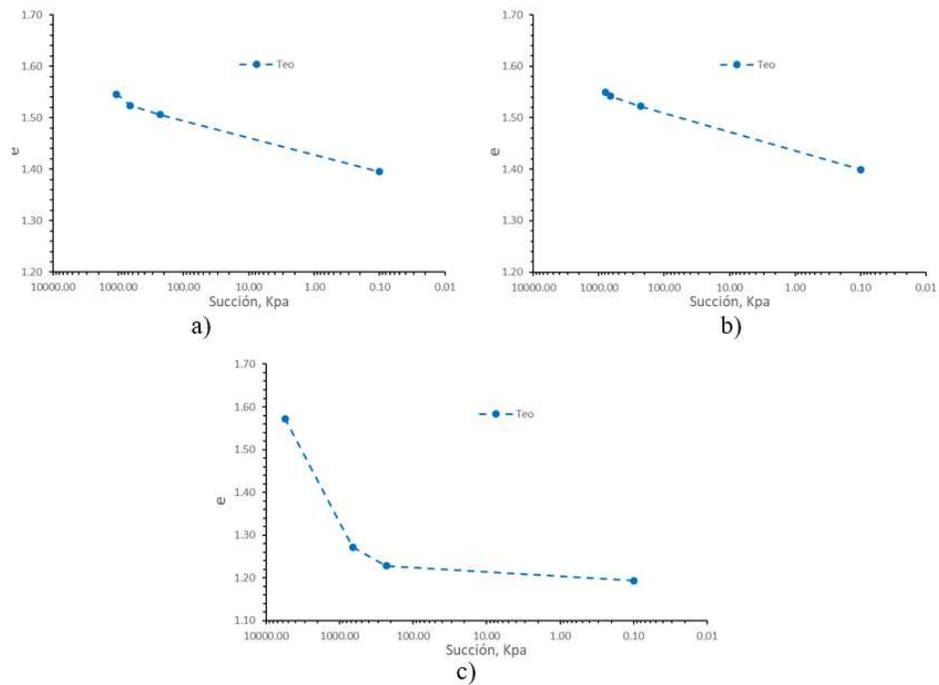
En la **Tabla 26** se muestran los parámetros necesarios para generar el modelo para las muestras cargadas con 95.35 kPa y saturada en tres incrementos. Los modelos generados y deformaciones calculadas se muestran en la **Figura 77** y **Figura 78** respectivamente.

**Tabla 26.** Parámetros para generar modelo de muestras cargadas a 95.35 kPa.

	<b>Réplica 1</b>	<b>Réplica 2</b>	<b>Réplica Na</b>
$\lambda$	-0.450	-0.392	-1.224
$\kappa$	-0.092	-0.105	-0.114
Sw	55.51	58.46	52.87
$\chi_0 S_0$	48.96	42.53	188.10
$\Delta P$	95.35	95.35	95.35
$e_H$	1.546	1.549	1.572



**Figura 77.** Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 95.35 kPa, a) Réplica 1, b) Réplica 2 y c) Réplica suelo mezclado con cloruro de sodio.

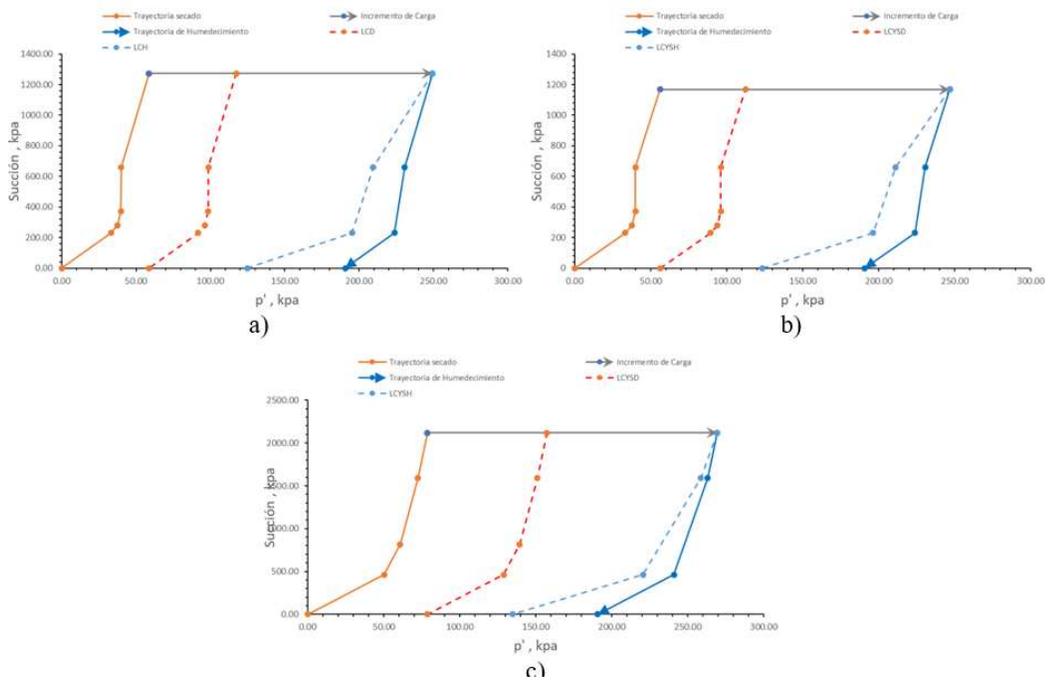


**Figura 78.** Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestras cargadas a 95.35 kPa, a) Réplica 1, b) Réplica 2 y c) Réplica suelo mezclado con cloruro de sodio.

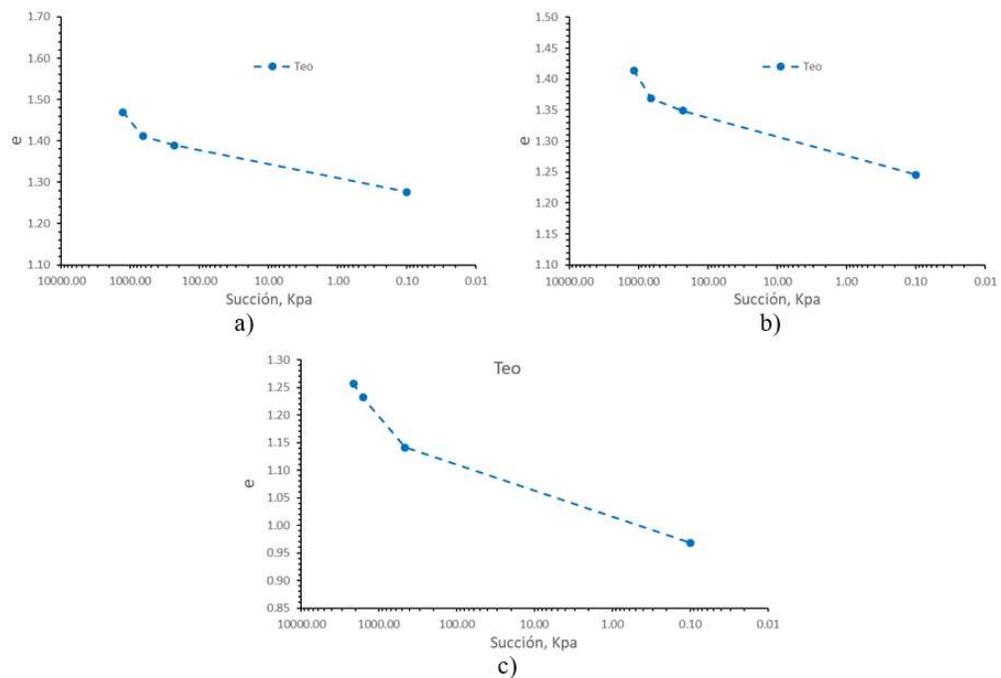
En la **Tabla 27** se muestran los parámetros necesarios para generar el modelo para las muestras cargadas con 190.71 kPa y saturada en tres incrementos. Los modelos generados y deformaciones calculadas se muestran en la **Figura 79** y **Figura 80** respectivamente.

**Tabla 27.** Parámetros para generar modelo de muestras cargadas a 190.71 kPa.

	Réplica 1	Réplica 2	Réplica Na
$\lambda$	-0.450	-0.392	-1.224
$\kappa$	-0.092	-0.105	-0.114
$S_w$	53.71	54.64	58.01
$\chi_0 S_0$	58.69	56.18	78.65
$\Delta P$	190.71	190.71	190.71
$e_H$	1.470	1.414	1.257



**Figura 79.** Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 190.71 kPa, a) Réplica 1, b) Réplica 2 y c) Réplica suelo mezclado con cloruro de sodio.

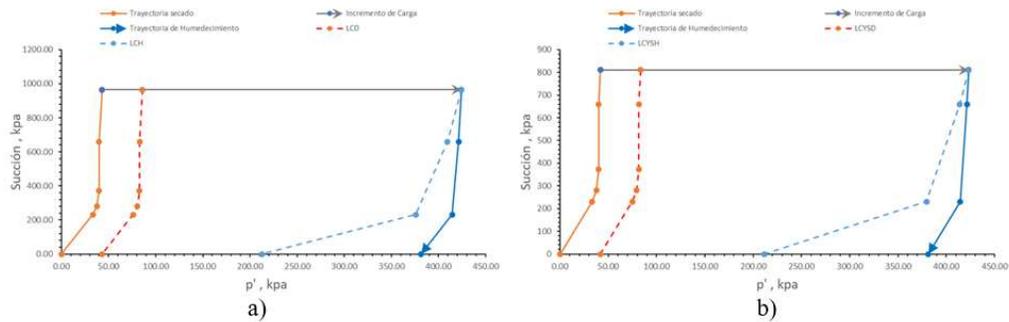


**Figura 80.** Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestras cargadas a 190.71 kPa, a) Réplica 1, b) Réplica 2 y c) Réplica suelo mezclado con cloruro de sodio.

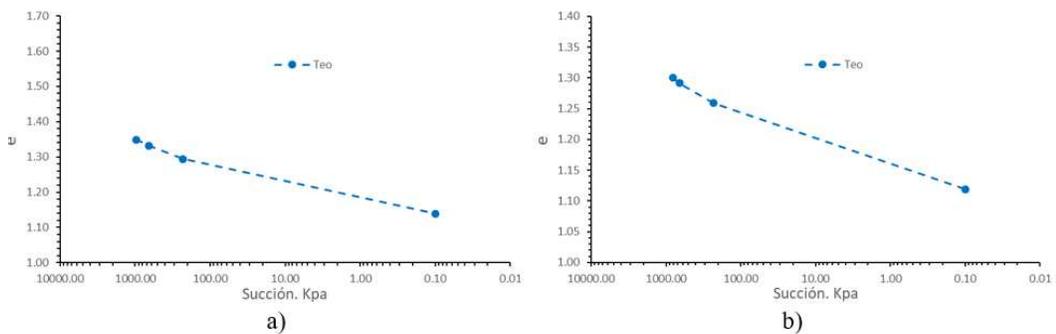
En la **Tabla 28** se muestran los parámetros necesarios para generar el modelo para las muestras cargadas con 381.41 kPa y saturada en tres incrementos. Los modelos generados y deformaciones calculadas se muestran en la **Figura 81** y **Figura 82** respectivamente.

**Tabla 28.** Parámetros para generar modelo de muestras cargadas a 381.41 kPa.

	Réplica 1	Réplica 2
$\lambda$	-0.450	-0.392
$\kappa$	-0.092	-0.105
Sw	55.89	57.24
$\chi_0 S_0$	42.96	41.74
$\Delta P$	381.41	381.41
$e_H$	1.349	1.300



**Figura 81.** Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 381.41 kPa, a) Réplica 1, b) Réplica 2.

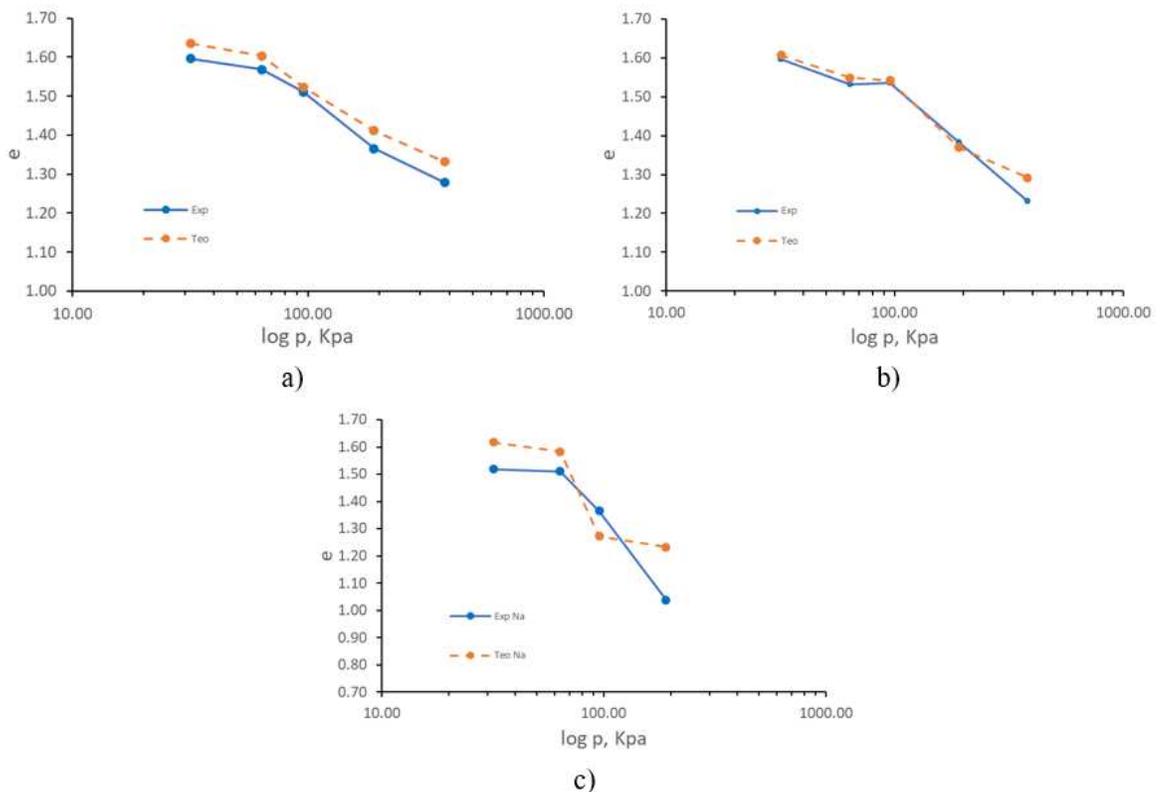


**Figura 82.** Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 381.41 kPa, a) Réplica 1, b) Réplica 2.

Se puede observar en la **Figura 73** y **Figura 75** que para las cargas de 31.78 y 63.57 kPa, el comportamiento volumétrico del suelo en estado natural se encuentra dentro de la zona elástica delimitada por la superficie  $LC_D$ . Para cargas superiores a estas el comportamiento volumétrico es plástico coincidiendo con el comportamiento obtenido experimentalmente en las pruebas edométricas mostrado en la **Figura 53**.

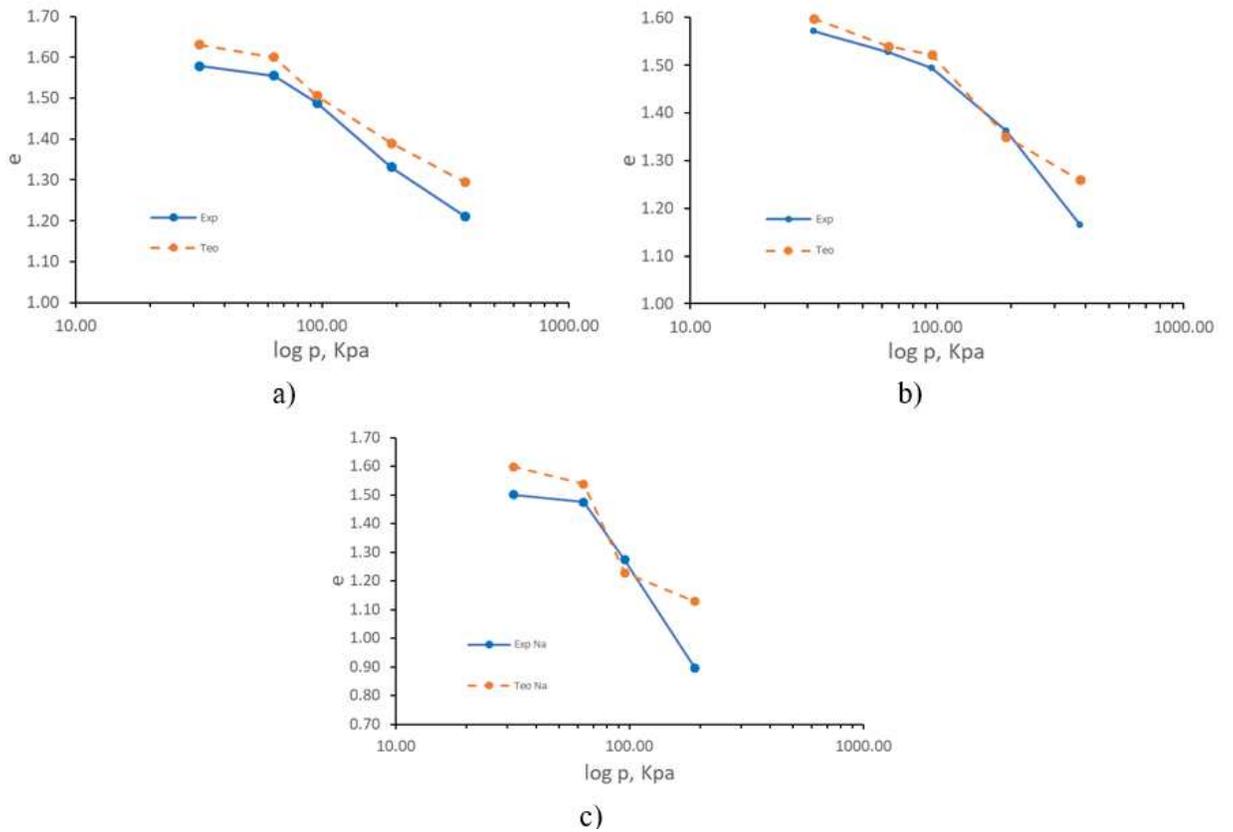
Sin embargo, en el modelo correspondiente al suelo mezclado con cloruro de sodio el comportamiento elástico se presenta hasta la carga de 95.31 kPa, mientras que experimentalmente bajo esta carga el comportamiento fue plástico.

En las **Figura 83**, **Figura 84** y **Figura 85** se muestran las comparaciones teórico experimentales de la evaluación de las deformaciones volumétricas de las muestras sometidas a diversos esfuerzos a grados de saturación de 60, 80 y 100% respectivamente.

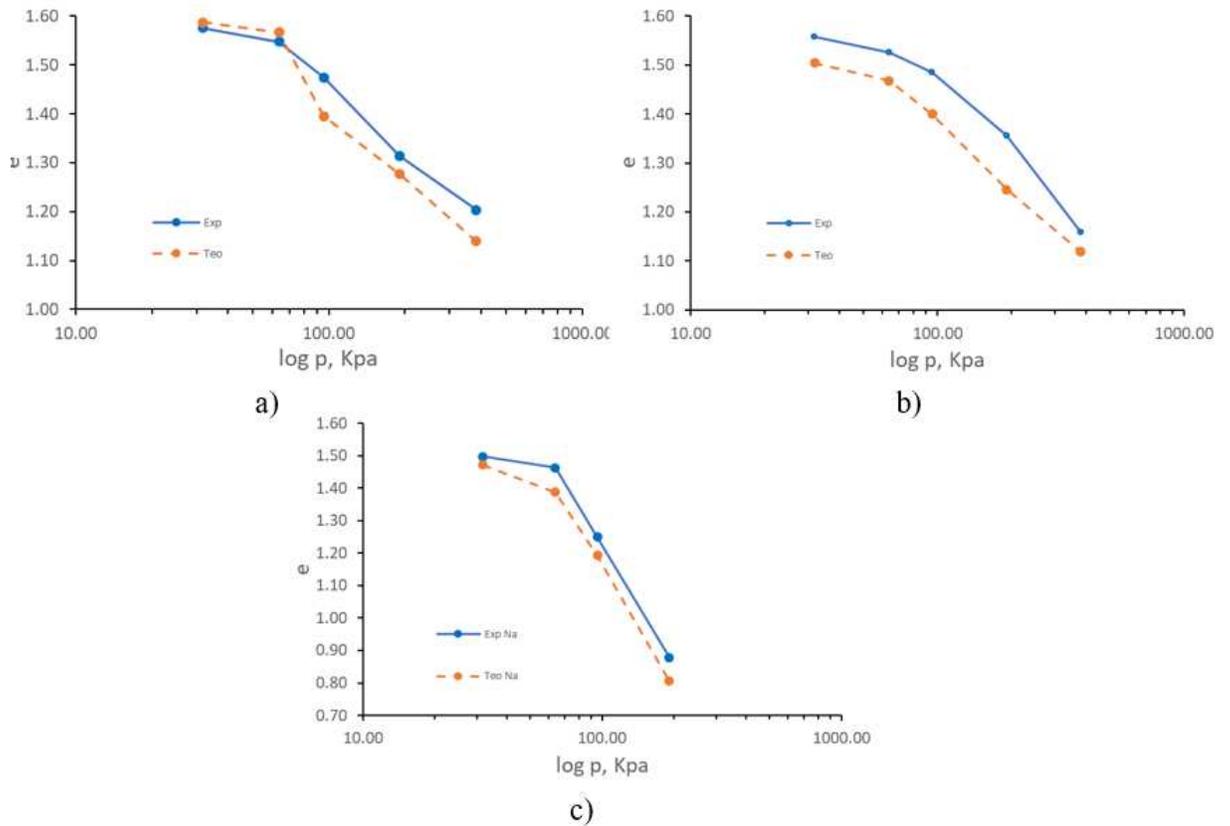


**Figura 83.** Comparación teórica – experimental de las curvas de compresibilidad de muestras a  $Sw = 60\%$ . a) Réplica 1, b) Réplica 2 y c) Réplica suelo mezclado con cloruro de sodio.

Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.



**Figura 84.** Comparación teórica – experimental de las curvas de compresibilidad de muestras a  $S_w = 80\%$ . a) Réplica 1, b) Réplica 2 y c) Réplica suelo mezclado con cloruro de sodio.



**Figura 85.** Comparación teórica – experimental de las curvas de compresibilidad de muestras a  $S_w = 100\%$ . a) Réplica 1, b) Réplica 2 y c) Réplica suelo mezclado con cloruro de sodio.

En las figuras anteriores se puede observar que el modelo es capaz de reproducir el comportamiento que presenta el suelo en condiciones naturales sometido a diversos esfuerzos e incrementos en su grado de saturación. Mientras que para el suelo mezclado con sodio se presenta variación en el comportamiento para grados de saturación de 60 y 80%, siendo más estable el comportamiento simulado para un grado de saturación de 100%

El valor de las deformaciones volumétricas para el suelo en condiciones naturales, simuladas para grados de saturación de 60 y 80 % se aproximan al valor experimental, aunque en menor magnitud.

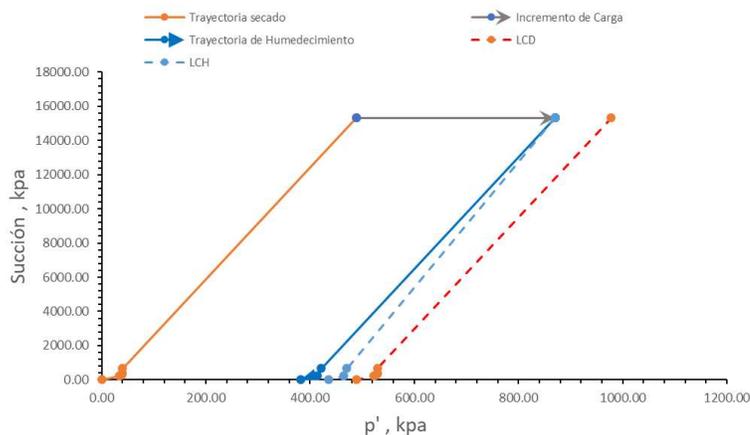
Esto se debe al comportamiento dispersivo del suelo, ya que, experimentalmente al realizar el primer incremento de humedad, la reducción en la relación de vacíos se produce

bruscamente y posteriormente no se presenta variación considerable entre el grado de saturación de 80 y 100%.

Sin embargo, se puede observar que la deformación volumétrica se sobrestima para la última etapa de incremento de humedad.

Durante la simulación se observó que, si se manejaban muestras a grados de saturación menor del 40%, no se generaría el colapso por humedecimiento con las cargas aplicadas ya que estas tendrían que ser de mayor magnitud para salir de la zona elástica (**Figura 86**). Sin embargo, este comportamiento no correspondería al observado experimentalmente.

Este comportamiento inusual en la modelación se debe a los valores altos de succión que se midieron en el suelo los cuales pudieron verse afectados por sus propiedades químicas y mineralógicas, tal y como se mencionó en la sección 5.3.



**Figura 86.** Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestra cargada a 381.41 kPa y  $S_w = 41.48 \%$ .

Se realiza un análisis estadístico para comparar los resultados teóricos con los experimentales. El resumen de los resultados se presenta en la **Tabla 29**.

**Tabla 29.** Análisis estadístico de correlación entre resultados del comportamiento volumétrico teórico y experimental.

<b>Grado de Dispersión</b>	<b>Variable comparada</b>	<b>Sw %</b>	<b>Error Cuadrático medio</b>	<b>Coef. De Correlación múltiple al Cuadrado</b>
Intermedio	Relacion de Vacios	60	0.0012	0.9859
	Relacion de Vacios	80	0.0026	0.9804
	Relacion de Vacios	100	0.0039	0.9732
Alto	Relacion de Vacios	60	0.0154	0.8482
	Relacion de Vacios	80	0.0174	0.9170
	Relacion de Vacios	100	0.0037	0.9977

De acuerdo a los valores obtenidos del coeficiente de correlación múltiple al cuadrado, se determina que el modelo es capaz de simular de manera adecuada el comportamiento volumétrico del suelo del suelo en estudio cuando se incrementa su grado de saturación.

## **7. CONCLUSIONES**

Se observa buena correlación entre los resultados obtenidos en la Prueba de Crumb y de Pinhole, las cuales hacen referencia a condiciones de flujo de agua estático y dinámico respectivamente.

De las tres pruebas físicas analizadas, se observa que los resultados pueden variar entre sí. Por esta razón, se puede considerar a la prueba de Pinhole ser la más confiable para evaluar el grado de dispersión del suelo, por ser una prueba cuantitativa y cualitativa. Sin embargo, por el tipo de equipo necesario en esta prueba impide poder realizarla en campo, además de que su tiempo de ejecución es relativamente largo, dando como lugar a que la prueba de Crumb sea la prueba índice más rápida y práctica para realizar en campo, pero no se debe de tomar decisiones solamente con resultados de esta prueba.

El suelo de la ciudad de Rioverde, S.L.P. presenta un ángulo de fricción de 42° en estado seco, el cual se reduce conforme aumenta el grado de saturación hasta un valor de 33° en

estado saturado. La dispersividad del suelo se ve reflejada en esta disminución prácticamente lineal del ángulo de fricción al aumentar el grado de saturación de 0 a 100 %.

Incrementando el porcentaje de sodio del suelo a 22.13% con cloruro de sodio se presenta una reducción del 15% en el ángulo de fricción en estado seco donde se tiene un valor de 36° y disminuye de manera constante conforme aumenta el grado de saturación hasta un valor de 34° en estado saturado, siendo similar al obtenido en estado natural del suelo.

De igual manera el suelo presenta una disminución de cohesión del 60% al pasar de un grado de saturación de 50% a 65%. Esto se debe a la presencia de sodio en el suelo, que a un bajo incremento de humedad genera inestabilidad en su estructura.

La curva de retención agua - suelo no se ve modificada considerablemente al incrementar el porcentaje de sodio del suelo a 22.13% con cloruro de sodio. Sin embargo, su resistencia al corte se ve reducida en un 77% aproximadamente. Esto se debe al incremento de la dispersividad del material.

El suelo dispersivo en estudio alcanza un valor de resistencia máximo para una succión de 2749 kPa y posteriormente se reduce para succiones mayores a 10000 kPa. Esto se debe a la combinación de la reducción del ángulo de fricción y de un máximo de cohesión conforme se incrementa el grado de saturación. Estos casos no han sido completamente documentados y analizados en la literatura, ya que en general, la succión incrementa la resistencia al corte de un suelo no saturado. En caso del suelo estudiado la presencia de sodio y yeso en la mineralogía del suelo además de un porcentaje reducido de arcilla (10%) puede estar detrás de este comportamiento.

Se desarrolla un modelo para el suelo dispersivo en estudio basado en el principio de esfuerzos efectivos de Bishop dentro de un marco elastoplástico propuesto por Rojas et al. capaz de simular de manera adecuada los cambios volumétricos del suelo cuando se presentan incrementos en su contenido de humedad natural. El modelo utiliza 5 parámetros tales como: relación de vacíos, succión, parámetro  $\chi$  de Bishop, índice de compresión y el índice de carga-descarga, los cuales pueden ser obtenidos de ensayos convencionales que cualquier laboratorio de geotecnia puede realizar sin complicaciones.

El modelo actualmente considera el ángulo de fricción como constante. Sin embargo, en el suelo en estudio se puede observar que presenta variación en función del grado de saturación el cual está dado por la Ec. 23 y 24 para el suelo en estado natural y mezclado con cloruro de sodio respectivamente.

$$\varphi = \frac{431.22 - S_w}{9.9225} \quad (23)$$

$$\varphi_{NaCl} = \frac{1800.50 - S_w}{50} \quad (24)$$

Se podría incluir la variación del ángulo de fricción en función del grado de saturación en el modelo para futuras investigaciones.

Para grados de saturación menores al 40% el modelo no simula el colapso por humedecimiento con las cargas aplicadas ya que estas tendrían que ser de mayor magnitud para salir de la zona elástica. Sin embargo, este comportamiento no corresponde al obtenido experimentalmente.

Este comportamiento inusual en la modelación se debe a los valores altos de succión que se midieron por el método de papel filtro, los cuales pudieron verse afectados por las propiedades químicas y mineralógicas del suelo.

## REFERENCIAS

- Abbaslou, H., Hadifard, H., & Ghanizadeh, A. R. (2020). Effect of cations and anions on flocculation of dispersive clayey soils. In *Heliyon* (Vol. 6, Issue 2).  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03462>
- Abbaslou, H., Hadifard, H., & Poorgohardi, A. (2016). Characterization of dispersive problematic soils and engineering improvements: A review. *Computations and Materials in Civil Engineering*, 1, 65–83.
- Abbeche, K., Bahloul, O., & Bahloul, A. (2016). Study of the influence of the saline solution NaCl on the potential collapse of soil. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 9).  
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160907001>
- AL-OBAIDI, Q. A. J. (2003). *Studies in Geotechnical and Collapsible Characteristics of Gypseous Soil*.
- Alabdullah, S. F. I., Hassab, Y., Teama, Z., & Aldahwi, S. (2022). Soil Retention Tests for Determining Dispersion of Clayey Soils. In *International Journal of GEOMATE* (Vol. 22, Issue 93, pp. 60–66). <https://doi.org/10.21660/2022.93.3054>
- Albadri, W., Md Noor, M. J., & Alhani, I. (2021). The relationship between the shear strength and water retention curve of unsaturated sand at different hydraulic phases. *Acta Geotechnica*, 16, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01189-7>
- Alfaro Soto, M. A. (2008). *Geotecnia en suelos no saturados*.
- Alonso, E. E., Gens, A., & Hight, D. (1987). Special Problem Soils. General Report. In Proceedings of the 9th European Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering. *Dublin*, 1087–1146.
- Alonso, E., Gens, A., & Josa, A. (1990). A Constitutive Model for Partially Saturated Soils. *Géotechnique*, 40. <https://doi.org/10.1680/geot.1990.40.3.405>
- Arroyo Chávez, H. (2015). *Modelo Constitutivo para suelos no saturados* (p. 222).
- ASTM D4221-99. (n.d.). Standard Test method for dispersive characteristics of clay soil by

- Double Hydrometer. In *ASTM International*. PA West Conshohocken.
- ASTM D4647-93. (n.d.). Standard Test Methods for Identification and Classification of Dispersive Clay Soils by the Pinhole Test. In *ASTM International*. PA West Conshohocken.
- ASTM D6572-06. (n.d.). Standard Test Method for Determining Dispersive Characteristics of Clayey Soils by Crumb Test. In *ASTM International*. PA West Conshohocken.
- Azam, S. (2000). Collapse and compressibility behaviour of arid calcareous soil formations. In *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* (Vol. 59, Issue 3, pp. 211–217). <https://doi.org/10.1007/s100640000060>
- Balmaceda, a, Josa, a, Gens, a, & Alonso, E. (1995). An elastoplastic model for partially saturated soils exhibiting a maximum of collapse. In *Geotechnique* (Vol. 45, Issue 1, pp. 35–53).
- Barrera, M., & Garnica, P. (2002). Introducción a la mecánica de suelos no saturados en vías terrestres. In *Publicación técnica* (Issue 198, p. 143). <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt198.pdf>
- Bhuvaneshwari, S., Soundra, B., Robinson, R. G., & Gandhi, S. R. (2007). Stabilization and microstructural modification of dispersive clayey soils. *1st International Conference on Soil and Rock Engineering, Srilankan Geotechnical Society, Columbo, Srilanka*, 1–7.
- Bock, E. (1961). on the Solubility of Anhydrous Calcium Sulphate and of Gypsum in Concentrated Solutions of Sodium Chloride At 25 °C, 30 °C, 40 °C, and 50 °C. In *Canadian Journal of Chemistry* (Vol. 39, Issue 9, pp. 1746–1751). <https://doi.org/10.1139/v61-228>
- Braja, D. (1985). Fundamentos de Ingeniería geotécnica. In *Thomson Learning* (p. 587).
- Briaud, J.-L. (2013). *Geotechnical engineering: unsaturated and saturated soils*. John Wiley & Sons.

- Burland, J., & Jennings, J. (1962). Limitations to the Use of Effective Stresses in Partly Saturated Soils. *Geotechnique*, 12, 125–144.  
<https://doi.org/10.1680/geot.1962.12.2.125>
- Chandra, S., & James, C. G. L. (1984). *Improvement of dispersive soils by using different additives*. 14, 202–216.
- Crespo, C. (2004). *Mecanica De Suelos - Crespo Villalaz.Pdf* (p. 652).
- Davidson, A. L. C., & Schofield, R. K. (1942). Measurement of the suction of soil water by Portland stone absorbers calibrated by a new method for determining vapour pressures near to saturation. In *The Journal of Agricultural Science* (Vol. 32, Issue 4, pp. 413–427). <https://doi.org/10.1017/S0021859600010340>
- DJOKOVIĆ, K., ČAKI, L., ŠUŠIĆ, N., & HADŽI-NIKOVIĆ, G. (2018). Methods for assessment and identification of dispersive soils. In *Ce/Papers* (Vol. 2, Issues 2–3, pp. 205–210). <https://doi.org/10.1002/cepa.672>
- Enríquez Haro, J. P. (2020). *Modelo general de suelos no saturados totalmente acoplado*.
- Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons.
- Fredlund, D. G., & Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4), 521–532.
- Gallegos Fonseca, G., Michel Cuello, C., Chavez Escalera, M., & Leal Vaca, J. C. (2014). *Identificación de los suelos dispersivos y colapsables del valle rio verde, en Rioverde S. L. P., Mexico*.
- Garakani, A. A., Haeri, S. M., Cherati, D. Y., Givi, F. A., Tadi, M. K., Hashemi, A. H., Chiti, N., & Qahremani, F. (2018). Effect of road salts on the hydro-mechanical behavior of unsaturated collapsible soils. *Transportation Geotechnics*, 17, 77–90.
- Garay, H., & Alva, J. E. (1999). Identificación y ensayos en suelos dispersivos. In *XII Congreso Nacional de Ingeniería Civil* (Issue 1, p. 12).

- Gens, A., Alonso, E. E., & Josa, A. (1989). *Elastoplastic modelling of partially saturated soils*. 163–170.
- Gens, A., Sánchez, M., & Sheng, D. (2006). On constitutive modelling of unsaturated soils. In *Acta Geotechnica* (Vol. 1, Issue 3, pp. 137–147). <https://doi.org/10.1007/s11440-006-0013-9>
- Glez Haramboure, Y., & Novoa, R. (2008). *Identificación y Estabilización de Suelos Dispersivos: Estado del Arte*.
- Gromko, G. J. (1974). Review of Expansive Soils. In *ASCE J Geotech Eng Div* (Vol. 100, Issue GT6). <https://doi.org/10.1061/ajgeb6.0000059>
- Holmgren, G., & Flanagan, C. (1977). Factors Affecting Spontaneous Dispersion of soil Materials as Evidenced by the Crumb Test. *Dispersive Clays, Related Piping, and Erosion in Geotechnical Projects, STP 623*, 218–239. <https://doi.org/10.1520/stp26990s>
- Indraratna, B., Muttuvel, T., & Khabbaz, H. (2008). *Investigating Erosional Behaviour of Chemically Stabilised Erodible Soils* (pp. 670–677). [https://doi.org/10.1061/40971\(310\)83](https://doi.org/10.1061/40971(310)83)
- Inglés, O. G., Aitchison, G. D., & others. (1970). Soil-water disequilibrium as a cause of subsidence in natural soils and earth embankments. *Publ. Int. Ass. Sci. Hydrol., Symp. Tokyo*, 89, 342–353.
- Jafari, H. R., Rad, M. H., & Hassanlou, M. R. (2012). Evaluating chemical stabilization of dispersive clay by aluminum sulfate (alum). In *World Applied Sciences Journal* (Vol. 18, Issue 5, pp. 613–616). <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2012.18.05.2561>
- Jotisankasa, A. (2005). Collapse Behaviour of a Compacted Silty Clay. In *Phd thesis* (Issue August, p. 422). <http://link.aip.org/link/?JGGEFK/133/867/1>
- Juarez Badillo, E. (1975). Constitutive relationships for soils. In *Symposium on Recent Developments in the Analysis of Soil Behaviour*. (Vol. 1, Issue July, p. 27).

- Kinney, J. L. (1979). *Laboratory procedures for determining the dispersibility of clayey soils*.
- Knodel, P. C. (1991). Characteristics and Problems of Dispersive Clay Soils. *Bureau of Reclamations, Denver Office, Research Al Laboratory Service Division Materials Engineering Branch, Report N°*(October).
- Laloui, L., & Nuth, M. (2005). An introduction to the constitutive modelling of unsaturated soils. In *Revue européenne de génie civil* (Vol. 9, Issues 5–6, pp. 651–669).  
<https://doi.org/10.3166/regc.9.651-669>
- Laloui, L., & Nuth, M. (2009). On the use of the generalised effective stress in the constitutive modelling of unsaturated soils. *Computers and Geotechnics*, 36, 20–23.  
<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2008.03.002>
- Leal-Vaca, J., Gallegos-Fonseca, G., & Rojas, E. (2013). Estimación de esfuerzos efectivos a partir del parámetro  $\chi$  de Bishop en una arena limosa. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 14, 139–151. [https://doi.org/10.1016/S1405-7743\(13\)72232-7](https://doi.org/10.1016/S1405-7743(13)72232-7)
- Leal Vaca, J. C. (2014). *Estudio teorico y experimental de la resistencia al cortante de los suelos no saturados*.
- Loret, B., & Khalili, N. (2000). A three-phase model for unsaturated soils. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 24(11), 893–927.
- Lu, N., & Likos, W. J. (2006). Suction Stress Characteristic Curve for Unsaturated Soil. In *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* (Vol. 132, Issue 2, pp. 131–142). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2006\)132:2\(131\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2006)132:2(131))
- Maharaj, A., & Green, P. P. (2015). The pinhole test for dispersive soil identification. In *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 5: Urban Geology, Sustainable Planning and Landscape Exploitation* (pp. 1299–1303).  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-09048-1\\_248](https://doi.org/10.1007/978-3-319-09048-1_248)
- Maharaj, A., & Paige-Green, P. (2013). The SCS Double Hydrometer Test in dispersive

- soil identification. In *18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Challenges and Innovations in Geotechnics, ICSMGE 2013* (Vol. 1, pp. 389–392).
- Marin Saucedo, K. J., & Cieza Benavides, R. A. (2021). *Comportamiento suelos dispersivos estabilizados con cemento portland, en la Zona Urbana del Distrito de Pilluana, Provincia de Picota y Region de San Martin - 2020*.
- McElroy, C. H. (1987). *Using Hydrated Lime to Control Erosion of Dispersive Clays*.
- Mohammad, T., Huat, B., Ali, F., & S, H. (2006). Relationship Between Shear Strength and Soil Water Characteristic Curve of an Unsaturated Granitic Residual Soil. *American Journal of Environmental Sciences*, 2. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2006.142.145>
- Paz Cruz, R. G. (2012). *efectos de humedecimiento en los parametros de resistencia de un suelo expansivo no saturado*.
- Pérez Garcia, E. D. (2019). *Modelo constitutivo general para suelos saturados y no saturados*.
- Rahardjo, H., & Leong, E. C. (2006). *Suction Measurements* (pp. 81–104). [https://doi.org/10.1061/40802\(189\)3](https://doi.org/10.1061/40802(189)3)
- Ramírez Jiménez, J. (2020). *Influencia de los ciclos de histeresis en el comportamiento mecanico de un suelo no saturado*.
- Rezaei, M., Ajalloeian, R., & Ghafoori, M. (2011). Geotechnical Properties of Problematic Soils Emphasis on Collapsible Cases. In *International Journal of Geosciences* (Vol. 03, Issue 01, pp. 105–110). <https://doi.org/10.4236/ijg.2012.31012>
- Reznik, Y. M. (2007). Influence of physical properties on deformation characteristics of collapsible soils. In *Engineering Geology* (Vol. 92, Issues 1–2, pp. 27–37). <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.03.001>
- Richards, L. A. (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils* (Vol. 78, Issue 2). LWW.

- Rojas, E. (2008). Equivalent stress equation for unsaturated soils. II: Solid-porous model. *International Journal of Geomechanics*, 8(5), 291–299.
- Rojas, E. (2022). *Towards a Unified Soil Mechanics Theory: The Use of Effective Stresses in Unsaturated Soils*. Bentham Science Publishers.
- Rojas, E., Arroyo, H., Horta, J., Pérez-Rea, M. de la L., López-Lara, T., & Hernández, J. B. (2021). Modeling the soil–water retention curves while the soil is deforming. In *Comptes Rendus - Mecanique* (Vol. 348, Issue 12, pp. 983–1001).  
<https://doi.org/10.5802/CRMECA.63>
- Rojas, E., & Chávez, O. (2013). Volumetric behavior of unsaturated soils. In *Canadian Geotechnical Journal* (Vol. 50, Issue 2, pp. 209–222). <https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0341>
- Rojas, E., Pérez-Rea, M., Lopez-Lara, T., Hernández, J., & Horta, J. (2015). Use of Effective Stresses to Model the Collapse upon Wetting in Unsaturated Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141, 4015007.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001251](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001251)
- Rojas González, E. (2013). La última pieza del rompecabezas: el comportamiento volumétrico de los suelos no saturados. *Ciencia@UAQ*, 2, 1–16.  
[http://www.uaq.mx/investigacion/revista\\_ciencia@uaq/ArchivosPDF/v6-n1/art8.pdf](http://www.uaq.mx/investigacion/revista_ciencia@uaq/ArchivosPDF/v6-n1/art8.pdf)
- Salgado-García, S., Palma-López, D., Lagunes-Espinoza, J., & Castelán-Estrada, M. (2006). Manual para el muestreo de suelos plantas y aguas e interpretación de análisis. In *Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco-ISPROTAB. H. Cárdenas, Tabasco, México*. (p. 90). <http://es.scribd.com/doc/110836442/Primer-Libro-de-Analisis-de-Suelo-Agua-y-Planta#scribd>
- Savaş, H. (2016). Consolidation and swell characteristics of dispersive soils stabilized with lime and natural zeolite. In *Science and Engineering of Composite Materials* (Vol. 23, Issue 6, pp. 589–598). <https://doi.org/10.1515/secm-2014-0202>
- Sayehvand, S., & Dehghani, M. (2014). Identification and management of dispersive soils.

- In *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* (Vol. 19, Issue Y, pp. 9023–9033).
- Secretaria de Desarrollo Urbano Vivienda y Obras Publicas. (n.d.). *Plan de Ordenación de la Zona Conurbada Intermunicipal de Rioverde y Ciudad Fernández 2012-2030*.  
<http://www.rioverdeslp.gob.mx/2015-2018/2INFORME/conurbada.pdf>
- Sheng, D., Sloan, S., & Gens, A. (2004). A Constitutive Model for Unsaturated Soils: Thermomechanical and Computational Aspects. *Computational Mechanics*, 33, 453–465. <https://doi.org/10.1007/s00466-003-0545-x>
- Sherard, J. L., Steele, E. F., Decker, R. S., & Dunnigan, L. P. (1976). Pinhole test for identifying dispersive soils. In *Journal of the Geotechnical Engineering Division* (Vol. 102, Issue 1, pp. 69–85).
- Shogui, H., Ghazavi, M., Kazemian, S., & Moayedi, H. (2013). A State of Art Review of Dispersive Soils : Identification Methods Perspective. In *European Journal of Scientific Research* (Vol. 107, Issue No. 3, pp. 322–328).
- Siosemarde, M., Kave, F., Pazira, E., Sedghi, H., & Ghaderi, S. J. (2010). Prediction of soil exchangeable sodium ratio based on soil sodium adsorption ratio. In *World Academy of Science, Engineering and Technology* (Vol. 46, pp. 255–257).
- Sivakumar, V. (1993). A critical state framework for unsaturated soils. In *Phd thesis* (Issue February).
- Srinivasa Murthy, B. R., Vatsala, A., & Nagaraj, T. S. (1989). Can cam-clay model be generalized? In *Journal of Geotechnical Engineering* (Vol. 115, Issue 8, pp. 1200–1202). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1989\)115:8\(1200\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1989)115:8(1200))
- Sun, D. A., Cui, H. B., Matsuoka, H., & Sheng, D. C. (2007). A Three-Dimensional Elastoplastic Model for Unsaturated Compacted Soils with Hydraulic Hysteresis. *Soils and Foundations*, 47(2), 253–264. <https://doi.org/https://doi.org/10.3208/sandf.47.253>
- Tuller, M., & Or, D. (2004). Retention of water in soil and the soil water characteristic curve. In *Encyclopedia of soils in the environment* (Vol. 4, pp. 278–289).

[http://www.engr.uconn.edu/environ/envphys/pdf/vadose\\_pdf/SWC\\_revised01.pdf](http://www.engr.uconn.edu/environ/envphys/pdf/vadose_pdf/SWC_revised01.pdf)

- Vakili, A. H., Selamat, M. R., Moayedi, H., & Amani, H. (2013). Stabilization of dispersive soils by pozzolan. In *Forensic Engineering 2012: Gateway to a Better Tomorrow - Proceedings of the 6th Congress on Forensic Engineering* (pp. 726–735). <https://doi.org/10.1061/9780784412640.077>
- Vaunat, J., Romero, E., & Jommi, C. (2000). An elastoplastic hydromechanical model for unsaturated soils. *Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils*, 121–138.
- Verdin Montes, C. I. (2018). *Modelacion de suelos expansivos mediante esfuerzos efectivos*.
- Volk, G. M. (1938). The Method of Determination of Degree of Dispersion of the Clay Fraction of Soils as Used in Investigation of Abnormal Characteristics of Soils in Region Eight of the Soil Conservation Service. *Soil Science Society of America Journal*, 2, 561–565.
- Wheeler, S. (1996). Inclusion of specific water volume within an elasto-plastic model for unsaturated soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 33, 42–57. <https://doi.org/10.1139/t96-023>
- Wheeler, S., Näätänen, A., Karstunen, M., & Lojander, M. (2003). An anisotropic model for soft clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 40, 403–418. <https://doi.org/10.1139/t02-119>
- Wheeler, S., Sharma, R., & Buisson, M. (2003). Coupling of Hydraulic Hysteresis and Stress–strain Behavior in Unsaturated Soils. *Geotechnique*, 53, 41–54. <https://doi.org/10.1680/geot.53.1.41.37252>
- Wheeler, S., & Sivakumar, V. (1995). An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil. *Geotechnique*, 45, 35–53. <https://doi.org/10.1680/geot.1995.45.1.35>
- Zhou, A., & Sheng, D. (2015). An advanced hydro-mechanical constitutive model for

unsaturated soils with different initial densities. *Computers and Geotechnics*, 63, 46–66. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.07.017>

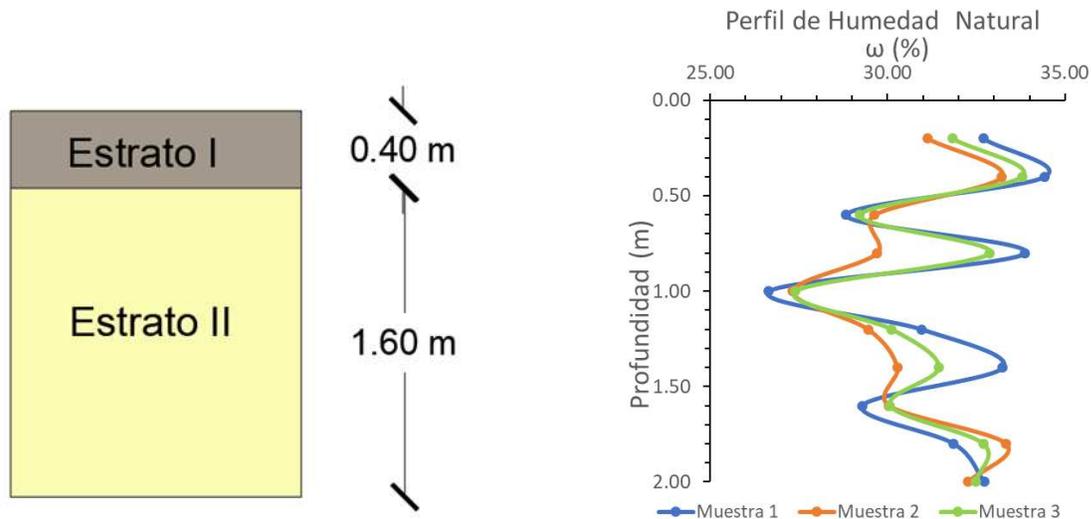
## ANEXO A. PROPIEDADES ÍNDICE DEL SUELO

### A.1 Perfil de humedad natural y estratigrafía de sitio.

**Tabla 30.** Contenido de humedad natural.

Prueba	Tara	Profundidad		W tara (gr)	W tara + suelo Humedo (gr)	W tara + suelo seco (gr)	Ww (gr)	Ws (gr)	ω (%)
		(m)	(m)						
1	1	0.00	0.20	121.90	176.70	163.20	13.50	41.30	32.69
	2	0.20	0.40	121.00	154.20	145.70	8.50	24.70	34.41
	3	0.40	0.60	124.20	166.20	156.80	9.40	32.60	28.83
	4	0.60	0.80	126.60	168.50	157.90	10.60	31.30	33.87
	5	0.80	1.00	121.70	183.00	170.10	12.90	48.40	26.65
	6	1.00	1.20	137.90	192.90	179.90	13.00	42.00	30.95
	7	1.20	1.40	116.80	162.10	150.80	11.30	34.00	33.24
	8	1.40	1.60	121.20	183.90	169.70	14.20	48.50	29.28
	9	1.60	1.80	120.90	162.70	152.60	10.10	31.70	31.86
	10	1.80	2.00	125.60	175.90	163.50	12.40	37.90	32.72
2	11	0.00	0.20	118.60	183.90	168.40	15.50	49.80	31.12
	12	0.20	0.40	123.80	160.70	151.50	9.20	27.70	33.21
	13	0.40	0.60	119.30	157.80	149.00	8.80	29.70	29.63
	14	0.60	0.80	123.20	176.90	164.60	12.30	41.40	29.71
	15	0.80	1.00	125.40	189.70	175.90	13.80	50.50	27.33
	16	1.00	1.20	146.30	214.00	198.60	15.40	52.30	29.45
	17	1.20	1.40	119.30	187.30	171.50	15.80	52.20	30.27
	18	1.40	1.60	120.90	180.20	166.50	13.70	45.60	30.04
	19	1.60	1.80	124.30	180.30	166.30	14.00	42.00	33.33
	20	1.80	2.00	122.80	176.10	163.10	13.00	40.30	32.26
3	21	0.00	0.20	120.25	180.30	165.80	14.50	45.55	31.83
	22	0.20	0.40	122.40	157.45	148.60	8.85	26.20	33.78
	23	0.40	0.60	121.75	162.00	152.90	9.10	31.15	29.21
	24	0.60	0.80	124.90	173.20	161.25	11.95	36.35	32.87
	25	0.80	1.00	123.55	186.55	173.00	13.55	49.45	27.40
	26	1.00	1.20	142.10	203.45	189.25	14.20	47.15	30.12
	27	1.20	1.40	118.05	174.70	161.15	13.55	43.10	31.44
	28	1.40	1.60	121.05	182.25	168.10	14.15	47.05	30.07
	29	1.60	1.80	122.60	171.50	159.45	12.05	36.85	32.70
	30	1.80	2.00	124.20	176.00	163.30	12.70	39.10	32.48

$$\omega \% = \frac{W_{Tara+Suelo\ humedo} - W_{Tara+Suelo\ seco}}{W_{Tara+Suelo\ seco} - W_{Tara}}$$



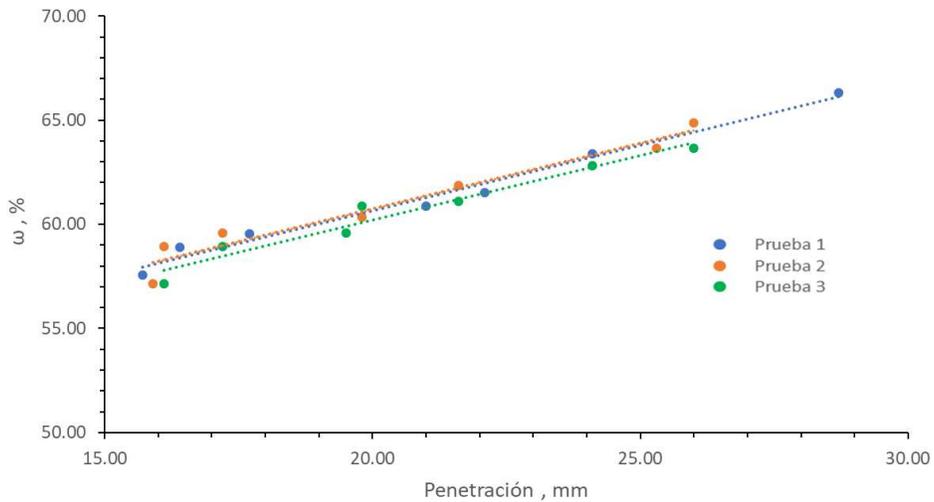
**Figura 87.** Perfil estratigráfico y perfil de humedad de sitio de exploración.

### A.2 Límites de Consistencia

**Tabla 31.** Límite líquido por método del cono inglés.

Prueba	Tara	Penetración (mm)	Límite Líquido (Cono Inglés)					
			W tara + suelo Humedo (gr)	W tara + suelo seco (gr)	Ww (gr)	Ws (gr)	ω (%)	
1	1	15.7	119.20	136.50	130.18	6.32	10.98	57.56
	2	16.4	126.10	140.40	135.10	5.30	9.00	58.89
	3	17.7	126.20	143.80	137.23	6.57	11.03	59.56
	4	21	125.10	139.90	134.30	5.60	9.20	60.87
	5	22.1	120.80	133.40	128.60	4.80	7.80	61.54
	6	24.1	135.40	151.90	145.50	6.40	10.10	63.37
	7	28.7	124.10	139.90	133.60	6.30	9.50	66.32
2	1	15.9	120.90	135.20	130.00	5.20	9.10	57.14
	2	16.1	121.80	136.90	131.30	5.60	9.50	58.95
	3	17.2	117.80	132.80	127.20	5.60	9.40	59.57
	4	19.8	117.50	132.30	126.73	5.57	9.23	60.35
	5	21.6	125.30	139.30	133.95	5.35	8.65	61.85
	6	25.3	121.10	138.30	131.61	6.69	10.51	63.65
	7	26	128.10	143.60	137.50	6.10	9.40	64.89
3	1	16.1	120.90	135.20	130.00	5.20	9.10	57.14
	2	17.2	121.80	136.90	131.30	5.60	9.50	58.95
	3	19.5	117.80	132.80	127.20	5.60	9.40	59.57
	4	19.8	117.50	132.30	126.70	5.60	9.20	60.87
	5	21.6	125.30	139.30	133.99	5.31	8.69	61.10
	6	24.1	128.10	143.60	137.62	5.98	9.52	62.82
	7	26	121.10	138.30	131.61	6.69	10.51	63.65

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**

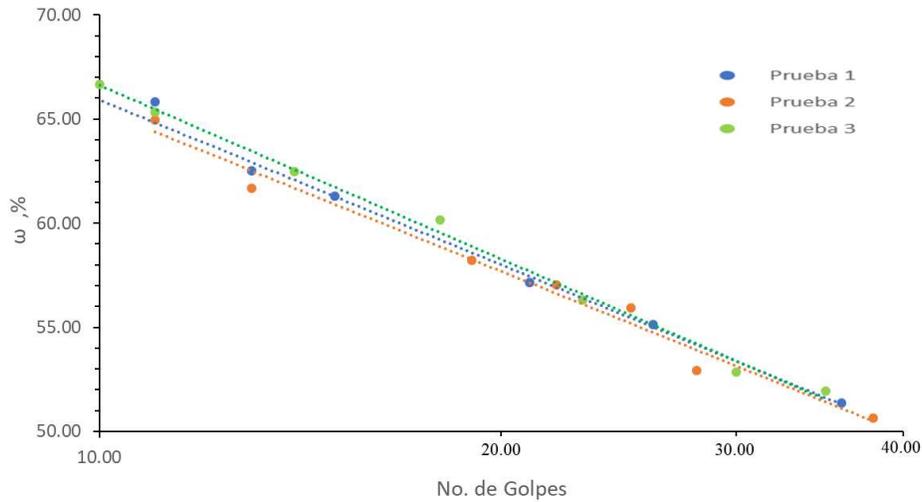


**Figura 88.** Límite líquido por método de cono inglés.

**Tabla 32.** Límite líquido por método de la copa de Casagrande.

Llímite Líquido (Copa de Casagrande)								
Prueba	Tara	No. Golpes #	W tara (gr)	W tara +	W tara +	Ww (gr)	Ws (gr)	ω (%)
				suelo Humedo (gr)	suelo seco (gr)			
1	1	9	124.10	136.10	131.30	4.80	7.20	66.67
	2	11	135.40	148.50	143.30	5.20	7.90	65.82
	3	13	119.30	132.30	127.30	5.00	8.00	62.50
	4	15	120.80	130.80	127.00	3.80	6.20	61.29
	5	21	125.20	139.50	134.30	5.20	9.10	57.14
	6	26	126.10	138.20	133.90	4.30	7.80	55.13
	7	36	126.30	137.50	133.70	3.80	7.40	51.35
2	1	11	121.10	137.10	130.80	6.30	9.70	64.95
	2	13	121.00	132.90	128.36	4.54	7.36	61.68
	3	19	125.30	135.90	132.00	3.90	6.70	58.21
	4	22	117.50	128.10	124.25	3.85	6.75	57.04
	5	25	128.10	137.30	134.00	3.30	5.90	55.93
	6	28	121.90	132.30	128.70	3.60	6.80	52.94
	7	38	117.80	129.40	125.50	3.90	7.70	50.65
3	1	10	124.10	137.10	131.90	5.20	7.80	66.67
	2	11	135.40	145.70	141.63	4.07	6.23	65.33
	3	14	119.30	134.80	128.84	5.96	9.54	62.47
	4	18	120.80	133.50	128.73	4.77	7.93	60.15
	5	23	125.20	141.30	135.50	5.80	10.30	56.31
	6	30	126.10	136.80	133.10	3.70	7.00	52.86
	7	35	126.30	136.10	132.75	3.35	6.45	51.94

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**



**Figura 89.** Límite líquido por método de copa de Casagrande.

**Tabla 33.** Resumen de límite líquido obtenido.

Prueba	%	Cono Ingles			Copa de Casagrande		
		1	2	3	1	2	3
Límite Líquido	%	60.65	60.80	60.20	55.50	54.70	55.70

**Tabla 34.** Límite plástico.

Muestra	Tara	W tara	Límite Plástico					
			W tara + suelo Humedo	W tara + suelo seco	Ww	Ws	ω	LP
			(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(%)	(%)
1	1	119.32	124.68	122.90	1.78	3.58	49.72	49.44
	2	126.18	130.84	129.30	1.54	3.12	49.36	
	3	126.34	130.31	129.00	1.31	2.66	49.25	
2	1	121.03	125.23	123.90	1.33	2.87	46.34	48.54
	2	121.95	125.48	124.30	1.18	2.35	50.21	
	3	117.89	121.93	120.60	1.33	2.71	49.08	
3	1	123.90	126.80	125.85	0.95	1.95	48.72	48.97
	2	118.80	122.30	121.15	1.15	2.35	48.94	
	3	117.00	120.00	119.01	0.99	2.01	49.25	

**Tabla 35.** Límite de contracción lineal y volumétrica.

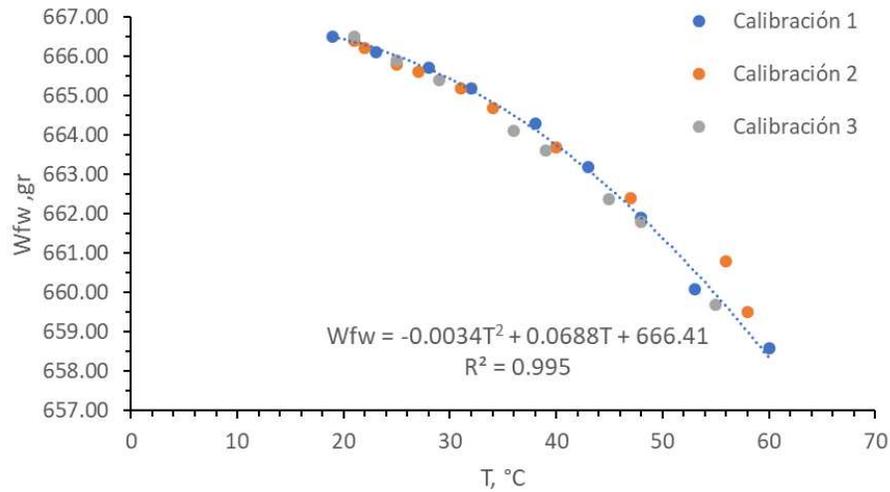
Prueba	Limite de Contracción												
	Molde				Muestra								
	Molde	Largo	Ancho	Alto	Volumen Inicial	Largo	Ancho	Alto	Volumen Final	Contracción Lineal	CL prom.	Contracción Volumetrica	CV prom.
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm <sup>3</sup> )	(mm)	(mm)	(mm)	(mm <sup>3</sup> )	(%)	(%)	(%)	(%)	
1	1	99.40	19.20	20.00	38169.60	96.30	18.70	18.80	33855.23	3.12	3.59	11.30	11.41
	2	100.90	20.20	20.30	41375.05	96.80	19.80	19.10	36607.82	4.06		11.52	
2	1	101.30	21.60	19.70	43105.18	97.40	20.30	19.35	38259.21	3.85	3.91	11.24	11.69
	2	100.60	21.30	20.00	42855.60	96.60	20.90	18.65	37653.23	3.98		12.14	
3	1	101.18	21.67	20.68	45342.36	97.40	21.60	18.90	39762.58	3.74	3.62	12.31	11.76
	2	100.72	21.16	19.67	41921.40	97.20	20.70	18.50	37222.74	3.49		11.21	

### A.3 Peso específico relativo de sólidos

**Tabla 36.** Calibración de matraz para prueba de peso específico relativo de sólidos.

Calibración de matraz					
W <sub>f</sub> = 167.60		gr			
Calibración 1		Calibración 2		Calibración 3	
T	W <sub>fw</sub>	T	W <sub>fw</sub>	T	W <sub>fw</sub>
(°C)	(gr)	(°C)	(gr)	(°C)	(gr)
60	658.60	58	659.50	55	659.70
53	660.10	56	660.80	48	661.80
48	661.90	47	662.40	45	662.37
43	663.20	40	663.70	39	663.60
38	664.30	34	664.70	36	664.10
32	665.20	31	665.20	29	665.40
28	665.70	27	665.60	25	665.90
23	666.10	25	665.80	21	666.50
19	666.50	22	666.20		
		21	666.40		

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**



**Figura 90.** Curva de calibración de matraz para prueba de peso específico relativo de sólidos.

$$S_s = \frac{W_s}{W_{fw} + W_s - W_{fws}}$$

Donde:

- $W_f$  = Peso del matraz
- $W_{fw}$  = Peso del matraz + agua destilada
- $W_s$  = Peso de sólidos secos
- $W_{fws}$  = Peso del matraz + agua destilada + sólidos

**Tabla 37.** Peso relativo de sólidos.

<b>Prueba 1</b>		<b>Prueba 2</b>		<b>Prueba 3</b>	
$W_s$ (gr) =	<b>48.80</b>	$W_s$ (gr) =	<b>48.80</b>	$W_s$ (gr) =	<b>48.90</b>
<b>T</b>	<b><math>W_{fws}</math></b>	<b>T</b>	<b><math>W_{fws}</math></b>	<b>T</b>	<b><math>W_{fws}</math></b>
(°C)	(gr)	(°C)	(gr)	(°C)	(gr)
56	694.30	56	694.00	55	694.10
50	695.80	51	695.40	48	696.30
44	696.40	45	696.70	41	697.70
38	697.90	41	697.40	35	698.40
35	698.30	35	698.10	30	699.00
32	699.10	31	698.90	26	699.60
25	699.70	26	699.40	23	699.70
21	700.50	21	700.30	21	700.10

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**

Valor	Unidad	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
$W_s$	gr	48.80	48.80	48.90
$W_f$	gr	167.60	167.60	167.60
$W_{fws}$	gr	699.78	699.59	699.6
Ss		3.27	3.26	3.23
T	°C	26.00	26.00	26.00

**A.4 Peso volumétrico de la masa de suelo**

$$\rho_p = 0.96 \text{ gr/cm}^3$$

**Tabla 38.** Peso volumétrico de la masa de suelo.

Muestra	$W_m$ (gr)	$W_{mp}$ (gr)	$W'_{mp}$ (gr)	$W_p$ (gr)	$V_P$ $\text{cm}^3$	$V_{mp}$ ( $\text{cm}^3$ )	$V_m$ ( $\text{cm}^3$ )	$\gamma_m$ ( $\text{gr/cm}^3$ )	$\gamma_m \text{ prom}$ ( $\text{gr/cm}^3$ )
1	92.30	152.90	31.70	60.60	63.13	120.31	57.18	1.61	
2	65.80	81.10	23.20	15.30	15.94	57.47	41.54	1.58	
3	49.50	87.60	16.30	38.10	39.69	70.78	31.09	1.59	1.62
4	159.00	181.80	61.90	22.80	23.75	119.02	95.27	1.67	
5	58.10	86.00	20.60	27.90	29.06	64.92	35.86	1.62	
6	17.60	30.10	6.00	12.50	13.02	23.92	10.90	1.61	
7	24.20	35.30	8.30	11.10	11.56	26.80	15.24	1.59	
8	98.20	118.60	35.30	20.40	21.25	82.69	61.44	1.60	1.60
9	38.50	48.60	13.90	10.10	10.52	34.44	23.92	1.61	
10	40.50	56.00	14.00	15.50	16.15	41.69	25.55	1.59	
11	24.20	31.60	8.40	7.40	7.71	23.03	15.32	1.58	
12	51.60	59.70	20.40	8.10	8.44	39.01	30.57	1.69	
13	33.60	41.40	12.30	7.80	8.13	28.89	20.76	1.62	1.63
14	37.10	46.20	13.60	9.10	9.48	32.36	22.88	1.62	
15	40.50	49.10	15.30	8.60	8.96	33.55	24.59	1.65	

**Tabla 39.** Testigo de humedad de muestras utilizadas para determinar el peso volumétrico de la masa de suelo.

Testigo de humedad					
Muestra	$W_m$ (gr)	$W_s$ (gr)	$W_w$ (gr)	$\omega$ (%)	$\omega_{prom}$ (%)
1	123.80	93.10	30.70	32.98%	
2	65.80	49.30	16.50	33.47%	
3	65.90	49.70	16.20	32.60%	33.02
4	159.00	119.70	39.30	32.83%	
5	73.00	54.80	18.20	33.21%	
6	23.40	17.70	5.70	32.20%	
7	30.30	22.70	7.60	33.48%	
8	98.20	73.90	24.30	32.88%	32.93
9	38.50	29.00	9.50	32.76%	
10	41.60	31.20	10.40	33.33%	
11	24.20	18.10	6.10	33.70%	
12	51.60	38.60	13.00	33.68%	
13	33.60	25.10	8.50	33.86%	33.67
14	37.10	27.80	9.30	33.45%	
15	40.50	30.30	10.20	33.66%	

$$W_p = W_{mp} - W_p$$

$$V_p = \frac{W_p}{\rho_p}$$

$$V_{mp} = \frac{(W_{mp} - W'_{mp})}{\gamma_w}$$

$$V_m = V_{mp} - V_p$$

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m}$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{1 + \omega}$$

Donde:

- $V_{pw}$  = Volumen desplazado de muestra mas parafina
- $V_p$  = Volumen de parafina
- $V_{mp}$  = Volumen de la muestra + parafina
- $V_m$  = Volumen de la muestra
- $W_s$  = Peso de solidos secos
- $W_m$  = Peso de la muestra
- $W_{mp}$  = Peso dela muestra + parafina
- $W'_{mp}$  = Peso dela muestra + parafina sumergido
- $\rho_p$  = densidad de la parafina

### A.5 Análisis granulométrico

**Tabla 40.** Análisis granulométrico (prueba 1).

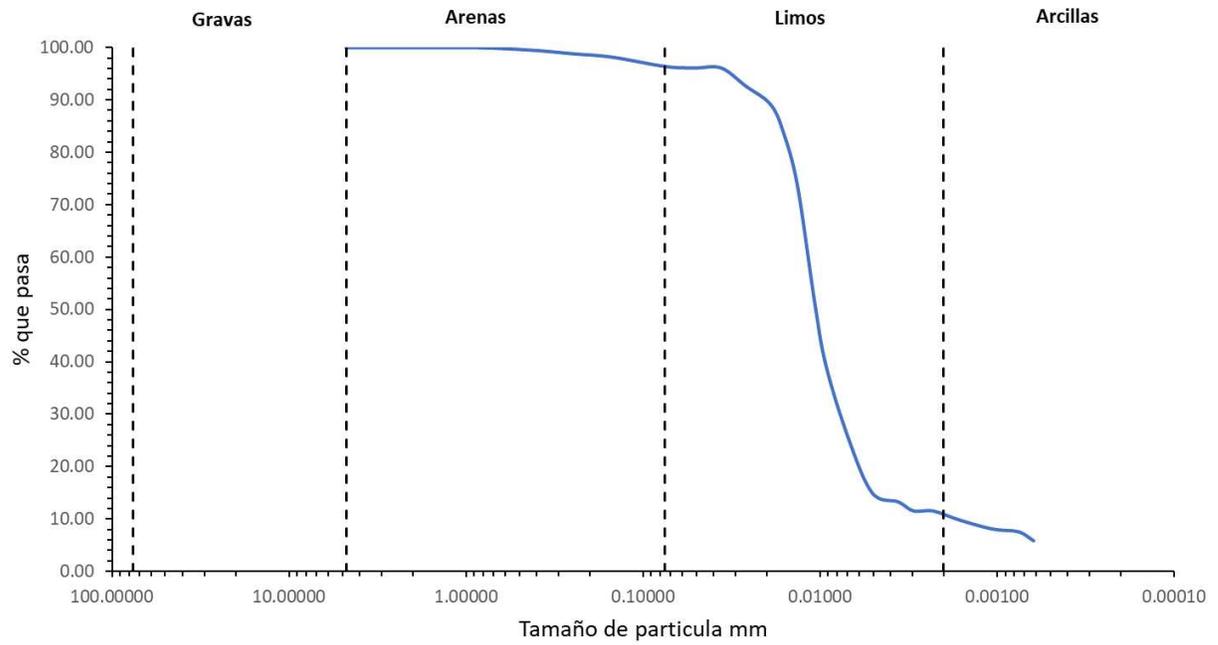
<b>Prueba 1</b>					
<b>Malla No.</b>	<b>abertura (mm)</b>	<b>Retenido en gr</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Retenido acumulado</b>	<b>% Que Pasa</b>
No 4	4.750	0.000	0.00	0.00	100.00
10	2.000	0.000	0.00	0.00	100.00
20	0.850	0.000	0.00	0.00	100.00
40	0.425	1.700	0.46	0.46	99.54
60	0.250	2.500	0.68	1.14	98.86
100	0.150	2.400	0.65	1.79	98.21
200	0.075	6.600	1.79	3.58	96.42
P No. 200		355.800	96.42	100.00	0.00
Muestra =		369.000			

<b>Hidrometro :</b> <u>152H</u>	<b>Agente Dispersante :</b> <u>NaPO<sub>3</sub>)<sub>1</sub></u>	<b>Ws (gr) :</b> <u>50</u>	
<b>Correccion por defloculante (Cd) :</b> <u>5.00</u>	<b>Correccion por menisco (C<sub>m</sub>) :</b> <u>1.00</u>	<b>Ss:</b> <u>3.25</u>	
<b>Volumen del hidrometro (V<sub>b</sub>, cm<sup>3</sup>) :</b> <u>63.00</u>	<b>Concentracion :</b> <u>0.05 N</u>	<b>a :</b> <u>0.895</u>	<b>Muestra N°</b> <u>1</u>

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Tiempo min</b>	<b>T °C</b>	<b>R<sub>H</sub></b>	<b>R<sub>m</sub></b>	<b>L cm</b>	<b>C<sub>t</sub></b>	<b>R<sub>H</sub></b>	<b>W<sub>D</sub> %</b>	<b>L/t cm/min</b>	<b>K</b>	<b>D mm</b>	<b>% Que Pasa</b>
		0.25	23.0	59.00	60.00	5.26	0.70	55.70	99.71	21.04	0.01118	0.05128	96.14
		0.5	23.0	59.00	60.00	5.26	0.70	55.70	99.71	10.52	0.01118	0.03626	96.14
		1	23.0	57.00	58.00	5.57	0.70	53.70	96.13	5.57	0.01118	0.02637	92.69
		2	23.0	55.00	56.00	5.87	0.70	51.70	92.55	2.94	0.01118	0.01915	89.24
		3	23.0	52.00	53.00	6.33	0.70	48.70	87.18	2.11	0.01118	0.01624	84.06
		5	23.0	46.00	47.00	7.25	0.70	42.70	76.44	1.45	0.01118	0.01346	73.70
	11:45	10	23.0	33.00	34.00	9.24	0.70	29.70	53.17	0.92	0.01118	0.01074	51.26
	01:45	15	23.0	26.00	27.00	10.31	0.70	22.70	40.63	0.69	0.01118	0.00927	39.18
	02:45	30	23.0	18.00	19.00	11.53	0.70	14.70	26.31	0.38	0.01118	0.00693	25.37
	03:45	60	23.0	12.00	13.00	12.45	0.70	8.70	15.57	0.21	0.01118	0.00509	15.02
	06:00	120	23.0	11.00	12.00	12.61	0.70	7.70	13.78	0.11	0.01118	0.00362	13.29
	08:00	180	23.0	10.00	11.00	12.76	0.70	6.70	11.99	0.07	0.01118	0.00298	11.56
	09:00	300	23.0	10.00	11.00	12.76	0.70	6.70	11.99	0.04	0.01118	0.00231	11.56
	10:00	600	23.0	9.00	10.00	12.91	0.70	5.70	10.20	0.02	0.01118	0.00164	9.84
	11:00	1440	23.0	8.00	9.00	13.06	0.70	4.70	8.41	0.01	0.01118	0.00106	8.11
	12:00	2880	22.0	8.00	9.00	13.06	0.40	4.40	7.88	0.00	0.01129	0.00076	7.59
	13:00	4320	22.0	7.00	8.00	13.22	0.40	3.40	6.09	0.00	0.01129	0.00062	5.87

**% PASANTE TAMIZ N°**  
**200**                      96.42

<b>D µm</b>	<b>% Que Pasa</b>	<b>Dif D mm</b>	<b>% Que Pasa/mm</b>	<b>% Que Pasa 5 µ</b>
3.62	13.29	1.4694	1.1747	14.91
5.09	15.02			



**Figura 91.** Curva granulométrica (prueba 1).

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**

**Tabla 41.** Análisis granulométrico (prueba 2).

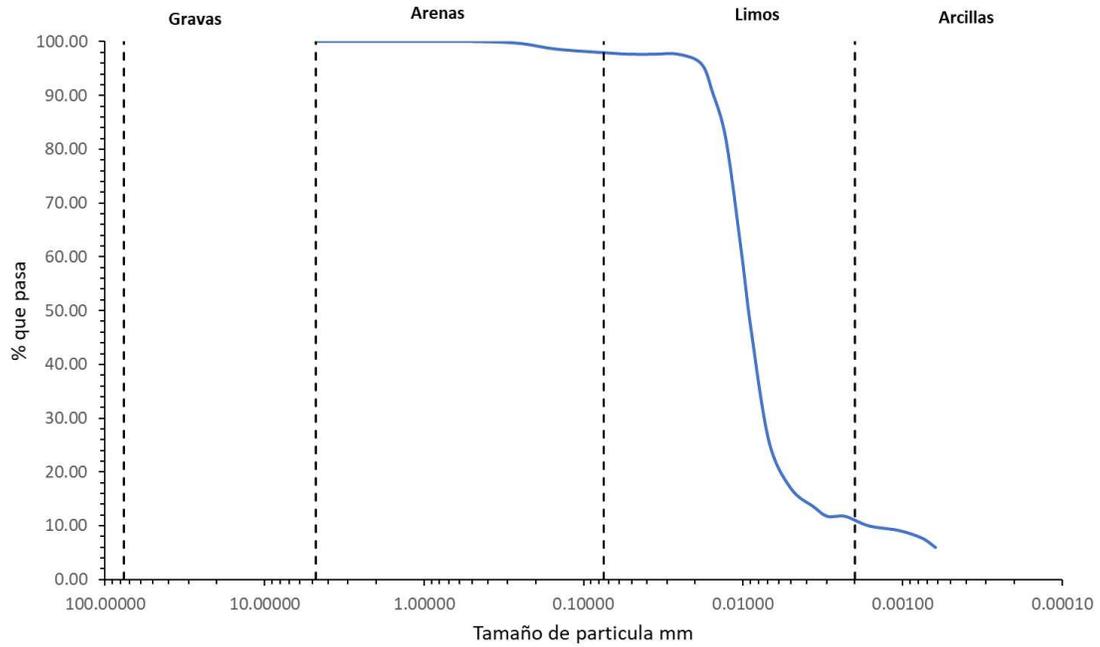
Prueba 2													
Malla No.	apertura (mm)	Retenido en gr	% Retenido	% Retenido acumulado	% Que Pasa								
No 4	4.750	0.000	0.00	0.00	100.00								
10	2.000	0.000	0.00	0.00	100.00								
20	0.850	0.000	0.00	0.00	100.00								
40	0.425	0.200	0.05	0.05	99.95								
60	0.250	1.200	0.32	0.38	99.62								
100	0.150	3.900	1.05	1.42	98.58								
200	0.075	2.500	0.67	2.09	97.91								
P No. 200		364.700	97.91	100.00	0.00								
Muestra =		372.500											
Hidrometro : 152H		Agente Dispersante : (NaPO <sub>3</sub> ) <sub>6</sub> Ws (gr) :		50									
defloculante (Cd): 5.00		(C <sub>m</sub> ) :		1.00	Ss:		3.25						
Volumen del hidrometro				Concentracion :		0.05 N	a :		0.895	Muestra 2			
		(V <sub>b</sub> , cm <sup>3</sup> ) :		63.00									

Fecha	Hora	Tiempo min	T °C	R' <sub>H</sub>	R <sub>m</sub>	L cm	C <sub>t</sub>	R <sub>H</sub>	W <sub>D</sub> %	L/t cm/min	K	D mm	% Que Pasa
		0.25	23.0	59.00	60.00	5.26	0.70	55.70	99.71	21.04	0.01118	0.05128	97.62
		0.5	23.0	59.00	60.00	5.26	0.70	55.70	99.71	10.52	0.01118	0.03626	97.62
		1	23.0	59.00	60.00	5.26	0.70	55.70	99.71	5.26	0.01118	0.02564	97.62
		2	23.0	58.00	59.00	5.41	0.70	54.70	97.92	2.71	0.01118	0.01839	95.87
		3	23.0	55.00	56.00	5.87	0.70	51.70	92.55	1.96	0.01118	0.01564	90.61
		5	23.0	50.00	51.00	6.64	0.70	46.70	83.60	1.33	0.01118	0.01288	81.85
	11:45	10	23.0	38.00	39.00	8.47	0.70	34.70	62.12	0.85	0.01118	0.01029	60.82
	01:45	15	23.0	30.00	31.00	9.70	0.70	26.70	47.80	0.65	0.01118	0.00899	46.79
	02:45	30	23.0	18.00	19.00	11.53	0.70	14.70	26.31	0.38	0.01118	0.00693	25.76
	03:45	60	23.0	13.00	14.00	12.30	0.70	9.70	17.36	0.20	0.01118	0.00506	17.00
	06:00	120	23.0	11.00	12.00	12.61	0.70	7.70	13.78	0.11	0.01118	0.00362	13.50
	08:00	180	23.0	10.00	11.00	12.76	0.70	6.70	11.99	0.07	0.01118	0.00298	11.74
	09:00	300	23.0	10.00	11.00	12.76	0.70	6.70	11.99	0.04	0.01118	0.00231	11.74
	10:00	600	23.0	9.00	10.00	12.91	0.70	5.70	10.20	0.02	0.01118	0.00164	9.99
	11:00	1440	23.0	8.50	9.50	12.99	0.70	5.20	9.31	0.01	0.01118	0.00106	9.11
	12:00	2880	22.0	8.00	9.00	13.06	0.40	4.40	7.88	0.00	0.01129	0.00076	7.71
	13:00	4320	22.0	7.00	8.00	13.22	0.40	3.40	6.09	0.00	0.01129	0.00062	5.96

**% PASANTE TAMIZ N° 200 97.91**

D µm	% Que Pasa	Dif D mm	Que Pasa/m	% Que Pasa 5 µ
3.62	13.50	1.4380	2.4375	16.85
5.06	17.00			



**Figura 92.** Curva granulométrica (prueba 2).

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**

**Tabla 42.** Análisis granulométrico (prueba 3).

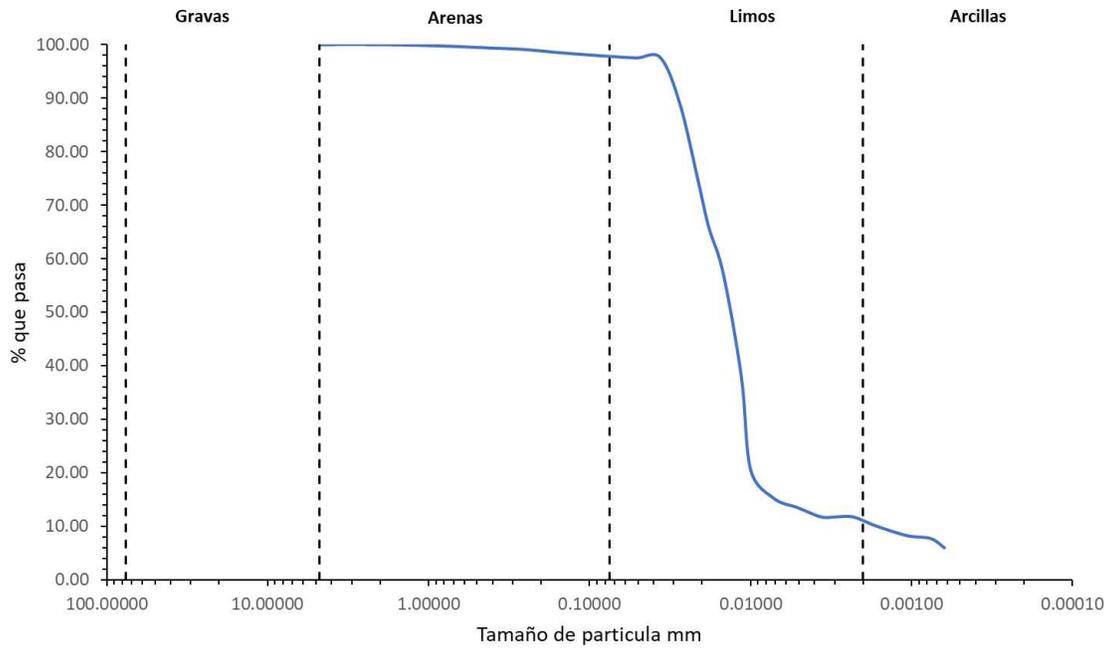
Prueba 3					
Malla No.	apertura (mm)	Retenido en gr	% Retenido	% Retenido acumulado	% Que Pasa
No 4	4.750	0.000	0.00	0.00	100.00
10	2.000	0.000	0.00	0.00	100.00
20	0.850	0.900	0.24	0.24	99.76
40	0.425	1.400	0.37	0.61	99.39
60	0.250	1.200	0.32	0.92	99.08
100	0.150	2.300	0.61	1.53	98.47
200	0.075	2.500	0.66	2.19	97.81
P No. 200		370.200	97.81	100.00	0.00
Muestra =		378.500			

Hidrometro :	152H	:	(NaPO <sub>3</sub> ) <sub>6</sub> Ws (gr) :	50
Correccion por defloculante (Cd):	5.00	Correccion por menisco (C <sub>m</sub> ):	1.00	Ss: 3.25
Volumen del hidrometro (V <sub>b</sub> , cm <sup>3</sup> ):	63.00	Concentracion :	0.05 N	a : 0.895
				Muestra 3

Fecha	Hora	Tiempo min	T °C	R' <sub>H</sub>	R <sub>m</sub>	L cm	C <sub>t</sub>	R <sub>H</sub>	W <sub>D</sub> %	L/t cm/min	K	D mm	% Que Pasa
		0.25	23.0	59.00	60.00	5.25	0.70	55.70	99.71	21.01	0.01118	0.05124	97.52
		0.5	23.0	59.00	60.00	5.25	0.70	55.70	99.71	10.51	0.01118	0.03623	97.52
		1	23.0	54.00	55.00	6.02	0.70	50.70	90.76	6.02	0.01118	0.02742	88.77
		2	23.0	46.00	47.00	7.24	0.70	42.70	76.44	3.62	0.01118	0.02127	74.76
		3	23.0	41.00	42.00	8.01	0.70	37.70	67.49	2.67	0.01118	0.01826	66.01
		5	23.0	36.00	37.00	8.77	0.70	32.70	58.54	1.75	0.01118	0.01481	57.25
	11:45	10	23.0	25.00	26.00	10.46	0.70	21.70	38.84	1.05	0.01118	0.01143	37.99
	01:45	15	23.0	15.00	16.00	11.99	0.70	11.70	20.94	0.80	0.01118	0.00999	20.48
	02:45	30	23.0	12.00	13.00	12.44	0.70	8.70	15.57	0.41	0.01118	0.00720	15.23
	03:45	60	23.0	11.00	12.00	12.60	0.70	7.70	13.78	0.21	0.01118	0.00512	13.48
	06:00	120	23.0	10.00	11.00	12.75	0.70	6.70	11.99	0.11	0.01118	0.00364	11.73
	08:00	180	23.0	10.00	11.00	12.75	0.70	6.70	11.99	0.07	0.01118	0.00297	11.73
	09:00	300	23.0	10.00	11.00	12.75	0.70	6.70	11.99	0.04	0.01118	0.00230	11.73
	10:00	600	23.0	9.00	10.00	12.90	0.70	5.70	10.20	0.02	0.01118	0.00164	9.98
	11:00	1440	23.0	8.00	9.00	13.06	0.70	4.70	8.41	0.01	0.01118	0.00106	8.23
	12:00	2880	22.0	8.00	9.00	13.06	0.40	4.40	7.88	0.00	0.01129	0.00076	7.70
	13:00	4320	22.0	7.00	8.00	13.21	0.40	3.40	6.09	0.00	0.01129	0.00062	5.95

**% PASANTE TAMIZ N° 200** 97.81

D μm	% Que Pasa	Dif D mm	% Que Pasa/mm	% Que Pasa 5 μ
3.64	11.73	1.4782	1.1844	13.34
5.12	13.48			



**Figura 93.** Curva granulométrica (prueba 3).

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**

**Tabla 43.** Análisis granulométrico de suelo mezclado con carbonato de sodio.

Suelo mezclado con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$

Ws (gr) : 55.42

Hidrometro : 152H    Agente Dispersante :  $(\text{NaPO}_3)_6$     Correccion por menisco ( $C_m$ ) : 1.00    Ss: 3.25

Correccion por defloculante (Cd): 5.00

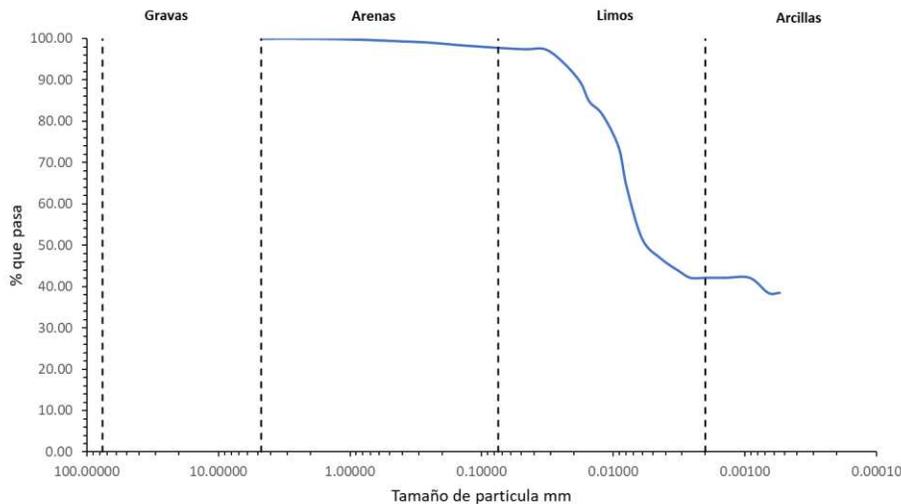
Volumen del hidrometro ( $V_b, \text{cm}^3$ ): 63.00    Concentracion : 0.05 N    a : 0.895

Muestra N°  $\text{Na}_2\text{CO}_3$

Fecha	Hora	tiempo min	T °C	$R'_H$	$R_m$	L cm	$C_t$	$R_H$	$W_D$ %	L/t cm/min	K	D mm	% Que Pasa
		0.25	23.0	65.00	66.00	4.33	0.70	61.70	99.65	17.33	0.01118	0.04653	97.46
		0.5	23.0	65.00	66.00	4.33	0.70	61.70	99.65	8.67	0.01118	0.03290	97.46
		1	23.0	63.00	64.00	4.64	0.70	59.70	96.42	4.64	0.01118	0.02407	94.30
		2	23.0	60.00	61.00	5.10	0.70	56.70	91.57	2.55	0.01118	0.01785	89.56
		3	23.0	57.00	58.00	5.56	0.70	53.70	86.73	1.85	0.01118	0.01521	84.82
		5	23.0	55.00	56.00	5.86	0.70	51.70	83.50	1.17	0.01118	0.01211	81.67
	11:45	10	23.0	50.00	51.00	6.63	0.70	46.70	75.42	0.66	0.01118	0.00910	73.77
	01:45	15	23.0	44.00	45.00	7.55	0.70	40.70	65.73	0.50	0.01118	0.00793	64.29
	02:45	30	23.0	36.00	37.00	8.77	0.70	32.70	52.81	0.29	0.01118	0.00605	51.65
	03:45	60	23.0	33.00	34.00	9.23	0.70	29.70	47.97	0.15	0.01118	0.00439	46.91
	06:00	120	23.0	31.00	32.00	9.54	0.70	27.70	44.74	0.08	0.01118	0.00315	43.76
	08:00	180	23.0	30.00	31.00	9.69	0.70	26.70	43.12	0.05	0.01118	0.00259	42.18
	09:00	300	23.0	30.00	31.00	9.69	0.70	26.70	43.12	0.03	0.01118	0.00201	42.18
	10:00	600	23.0	30.00	31.00	9.69	0.70	26.70	43.12	0.02	0.01118	0.00142	42.18
	11:00	1440	23.0	30.00	31.00	9.69	0.70	26.70	43.12	0.01	0.01118	0.00092	42.18
	12:00	2880	22.0	28.00	29.00	10.00	0.40	24.40	39.41	0.00	0.01129	0.00067	38.54
	13:00	4320	22.0	28.00	29.00	10.00	0.40	24.40	39.41	0.00	0.01129	0.00054	38.54

**% PASANTE TAMIZ N° 200 97.81**

D $\mu\text{m}$	% Que Pasa	Dif D mm	% Que Pasa/mm	% Que Pasa $5 \mu$
4.39	46.91	1.6601	2.8546	48.67
6.05	51.65			



**Figura 94.** Curva granulométrica (suelo mezclado con carbonato de sodio).

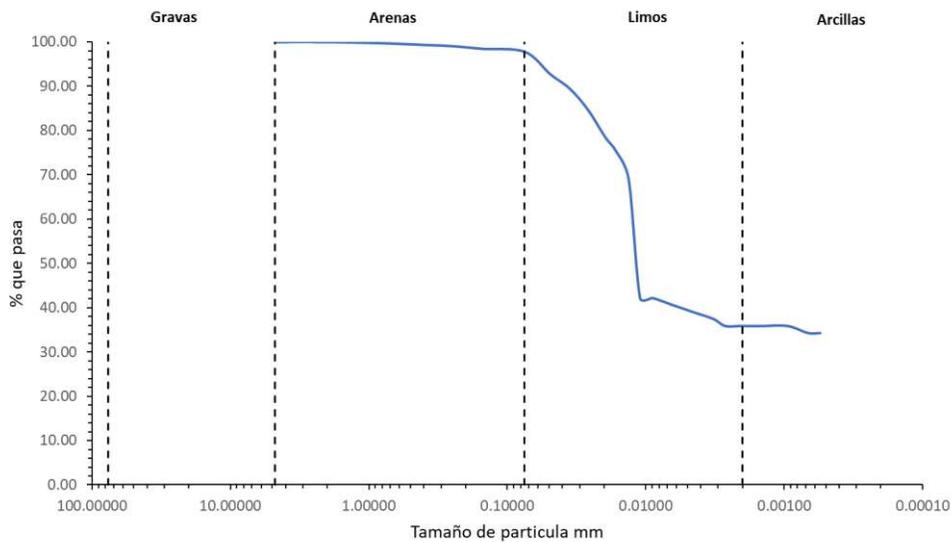
**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**

**Tabla 44.** Análisis granulométrico de suelo mezclado con cloruro de sodio.

Suelo mezclado con NaCl														
													Ws (gr)	
Hidrometro : 152H			Agente Dispersante : (NaPO <sub>3</sub> ) <sub>6</sub>									: 55.42		
Correccion por defloculante (Cd): 5.00			Correccion por menisco (C <sub>m</sub> ): 1.00									Ss: 3.25		
Volumen del hidrometro (V <sub>b</sub> , cm <sup>3</sup> ): 63.00			Concentracion : 0.05 N									a : 0.895		
													Muestra	NaCl
Fecha	Hora	Tiempo min	T °C	R' <sub>H</sub>	R <sub>m</sub>	L cm	C <sub>t</sub>	R <sub>H</sub>	W <sub>D</sub> %	L/t cm/min	K	D mm	Que Pasa	
		0.25	23.0	62.00	63.00	4.80	0.70	58.70	94.80	19.20	0.01118	0.04898	92.72	
		0.5	23.0	60.00	61.00	5.11	0.70	56.70	91.57	10.21	0.01118	0.03572	89.56	
		1	23.0	57.00	58.00	5.57	0.70	53.70	86.73	5.57	0.01118	0.02637	84.82	
		2	23.0	53.00	54.00	6.18	0.70	49.70	80.27	3.09	0.01118	0.01965	78.51	
		3	23.0	51.00	52.00	6.48	0.70	47.70	77.04	2.16	0.01118	0.01643	75.35	
		5	23.0	47.00	48.00	7.10	0.70	43.70	70.58	1.42	0.01118	0.01332	69.03	
	11:45	10	23.0	30.00	31.00	9.70	0.70	26.70	43.12	0.97	0.01118	0.01101	42.18	
	01:45	15	23.0	30.00	31.00	9.70	0.70	26.70	43.12	0.65	0.01118	0.00899	42.18	
	02:45	30	23.0	29.00	30.00	9.85	0.70	25.70	41.51	0.33	0.01118	0.00641	40.60	
	03:45	60	23.0	28.00	29.00	10.01	0.70	24.70	39.89	0.17	0.01118	0.00457	39.02	
	06:00	120	23.0	27.00	28.00	10.16	0.70	23.70	38.28	0.08	0.01118	0.00325	37.44	
	08:00	180	23.0	26.00	27.00	10.31	0.70	22.70	36.66	0.06	0.01118	0.00268	35.86	
	09:00	300	23.0	26.00	27.00	10.31	0.70	22.70	36.66	0.03	0.01118	0.00207	35.86	
	10:00	600	23.0	26.00	27.00	10.31	0.70	22.70	36.66	0.02	0.01118	0.00147	35.86	
	11:00	1440	23.0	26.00	27.00	10.31	0.70	22.70	36.66	0.01	0.01118	0.00095	35.86	
	12:00	2880	23.0	25.00	26.00	10.47	0.70	21.70	35.05	0.00	0.01118	0.00067	34.28	
	13:00	4320	23.0	25.00	26.00	10.47	0.70	21.70	35.05	0.00	0.01118	0.00055	34.28	

**% PASANTE TAMIZ N° 200 97.81**

D μm	% Que Pas a	Dif D mm	% Que Pas a/mm	% Que Pas a 5 μ
4.57	39.02	1.8413	0.8579	39.39
6.41	40.60			



**Figura 95.** Curva granulométrica (suelo mezclado con cloruro de sodio).

## Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde, S.L.P.

Donde :

$R'_H$  : Lectura aparente del Hidrometro

$R_m$  : Lectura Corregida por menisco

$C_t$  : Correccion por temperatura

$R_H$  : Lectura corregida del Hidrometro  $R_H = R - C_d + C_t$

$W_D$  : Porcentaje del peso

$L$  : Longitud efectiva, cm  $L = L_1 + \frac{1}{2} \left( L_2 - \left( \frac{V_B}{A} \right) \right)$

$K$  : Constante para el calculo del diametro de la particula, dependiente de la temperatura y el Ss del s

$a$  : Factor de correccion a para diferentes gravedades especificas del suelo

$D$  : Diametro de la particula, mm

### A.1 Tabla resumen de propiedades índice

**Tabla 45.** Resumen de propiedades índice del suelo dispersivo de la ciudad de Rioverde, S.L.P.

Propiedades	Simbolo	Unidad	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Valor Promedio
Gravas	G	%	0.00	0.00	0.00	0.00
Arenas	S	%	3.58	2.09	2.19	2.62
Limos	M	%	86.58	87.92	87.83	87.44
Arcillas	C	%	9.84	9.99	9.98	9.94
Limite Liquido (Cono Ingles)	LL	%	60.65	60.8	60.2	60.55
Limite Liquido (Copa de Casagrande)	LL	%	55.5	54.7	55.7	55.30
Limite Plastico	LP	%	49.44	48.54	48.97	48.98
Indice de Plasticidad (Cono Ingles)	PI	%	11.21	12.26	11.23	11.57
Indice de Plasticidad (Copa de Casagrande)	PI	%	6.06	6.16	6.73	6.32
Contraccion Lineal	LS	%	3.59	3.91	3.62	3.71
Contraccion Volumetrica	VS	%	11.41	11.69	11.76	11.62
Clasificacion del Suelo			MH	MH	MH	MH
Contenido de Humedad Natural	$\omega$	%	33.02	32.93	33.67	33.21
Peso Volumetrico	$\gamma_m$	gr/cm3	1.62	1.60	1.63	1.62
Peso Volumetrico Seco	$\gamma_d$	gr/cm3	1.22	1.20	1.22	1.21
Gravedad especifica	$S_s$		3.23	3.26	3.27	3.25

**ANEXO B. EVALUACIÓN DE LA DISPERSIVIDAD**

**B.1 Prueba del Doble Hidrómetro**

**Tabla 46.** Prueba del doble hidrómetro (prueba 1)

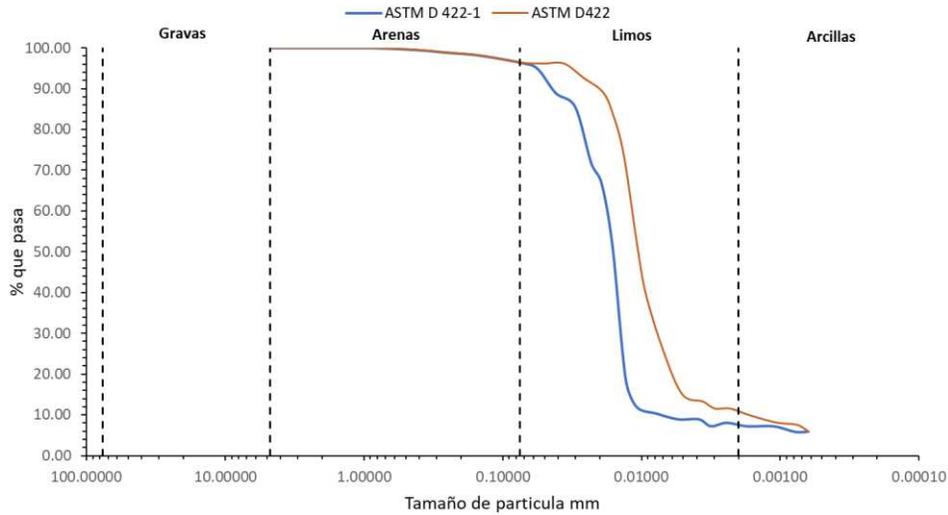
Hidrometro : <u>152H</u>	Agente Dispersante : <u>(NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub></u>	Vs (gr) : <u>50.45</u>	
Correccion por defloculante (Cd): <u>0.00</u>	Correccion por menisco (C <sub>m</sub> ): <u>1.00</u>	Ss: <u>3.25</u>	
Volumen del hidrometro (V <sub>b</sub> , cm <sup>3</sup> ): <u>63.00</u>	Concentracion : <u>0.05 N</u>	a : <u>0.895</u>	Muestra <u>1</u>

Fecha	Hora	Tiempo min	T °C	R' <sub>H</sub>	R <sub>m</sub>	L cm	C <sub>t</sub>	R <sub>H</sub>	W <sub>D</sub> %	L/t cm/min	K	D mm	% Que Pasa
		0.25	20.0	54.50	55.50	5.95	0.00	55.50	98.46	23.80	0.01159	0.05654	94.94
		0.5	20.0	51.00	52.00	6.49	0.00	52.00	92.25	12.97	0.01159	0.04174	88.95
		1	20.0	49.00	50.00	6.79	0.00	50.00	88.71	6.79	0.01159	0.03021	85.53
		2	20.0	41.00	42.00	8.02	0.00	42.00	74.51	4.01	0.01159	0.02320	71.85
		3	20.0	38.00	39.00	8.47	0.00	39.00	69.19	2.82	0.01159	0.01948	66.72
		5	20.0	29.00	30.00	9.85	0.00	30.00	53.22	1.97	0.01159	0.01627	51.32
	11:45	10	20.0	10.00	11.00	12.76	0.00	11.00	19.52	1.28	0.01159	0.01309	18.82
	01:45	15	20.0	6.00	7.00	13.37	0.00	7.00	12.42	0.89	0.01159	0.01094	11.97
	02:45	30	20.0	5.00	6.00	13.52	0.00	6.00	10.64	0.45	0.01159	0.00778	10.26
	03:45	60	21.0	4.00	5.00	13.68	0.20	5.20	9.23	0.23	0.01146	0.00547	8.90
	06:00	120	21.0	4.00	5.00	13.68	0.20	5.20	9.23	0.11	0.01146	0.00387	8.90
	08:00	180	21.0	3.00	4.00	13.83	0.20	4.20	7.45	0.08	0.01146	0.00318	7.18
	09:00	300	21.0	3.50	4.50	13.75	0.20	4.70	8.34	0.05	0.01146	0.00245	8.04
	10:00	600	21.0	3.00	4.00	13.83	0.20	4.20	7.45	0.02	0.01146	0.00174	7.18
	11:00	1440	21.0	3.00	4.00	13.83	0.20	4.20	7.45	0.01	0.01146	0.00112	7.18
	12:00	2880	22.0	2.00	3.00	13.98	0.40	3.40	6.03	0.00	0.01129	0.00079	5.82
	13:00	4320	22.0	2.00	3.00	13.98	0.40	3.40	6.03	0.00	0.01129	0.00064	5.82

**% PASANTE TAMIZ N° 200** 96.42

D µm	% Que Pasa	Dif D mm	% Que Pasa/mm	% Que Pasa 5 µ
3.87	8.90	1.6027	0.0000	8.90
5.47	8.90			

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**



**Figura 96.** Análisis granulométrico combinado (prueba 1).

**Tabla 47.** Prueba del doble hidrómetro (prueba 2).

Hidrometro :	152H	Agente Dispersante :	(NaPO <sub>3</sub> ) <sub>6</sub>	Ws (gr) :	50
Correccion por defloculante (Cd):	0.00	Correccion por menisco (C <sub>m</sub> ) :	1.00	Ss:	3.25
Volumen del hidrometro (V <sub>h</sub> , cm <sup>3</sup> ) :	63.00	Concentracion :	0.05 N	a :	0.895
					Muestra <u>2</u>

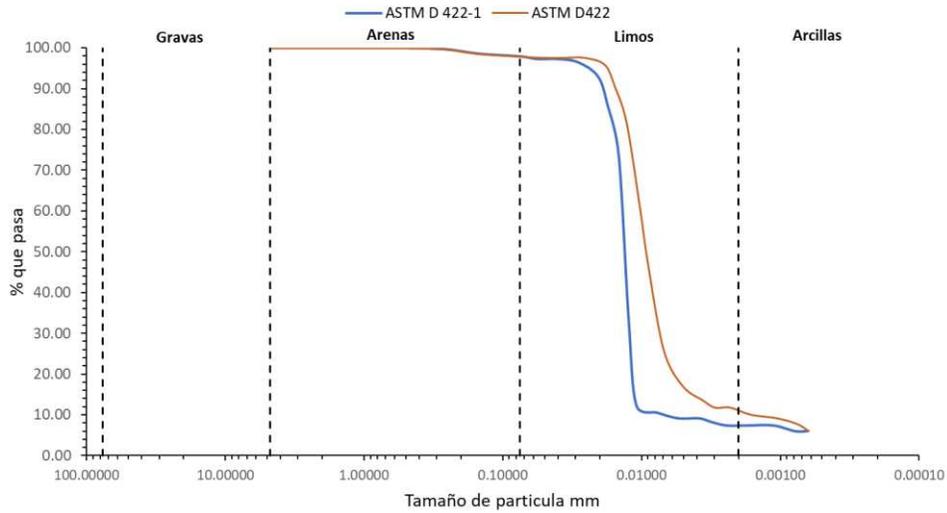
  

Fecha	Hora	Tiempo min	T °C	R' <sub>H</sub>	R <sub>m</sub>	L cm	C <sub>t</sub>	R <sub>H</sub>	W <sub>D</sub> %	L/t cm/min	K	D mm	% Que Pasa
		0.25	20.0	54.50	55.50	5.95	0.00	55.50	99.35	23.80	0.01159	0.05654	97.27
		0.5	20.0	54.50	55.50	5.95	0.00	55.50	99.35	11.90	0.01159	0.03998	97.27
		1	20.0	54.00	55.00	6.03	0.00	55.00	98.45	6.03	0.01159	0.02845	96.39
		2	20.0	52.00	53.00	6.33	0.00	53.00	94.87	3.17	0.01159	0.02062	92.89
		3	20.0	48.00	49.00	6.94	0.00	49.00	87.71	2.31	0.01159	0.01763	85.88
		5	20.0	41.00	42.00	8.02	0.00	42.00	75.18	1.60	0.01159	0.01468	73.61
	11:45	10	20.0	18.00	19.00	11.53	0.00	19.00	34.01	1.15	0.01159	0.01245	33.30
	01:45	15	20.0	6.00	7.00	13.37	0.00	7.00	12.53	0.89	0.01159	0.01094	12.27
	02:45	30	20.0	5.00	6.00	13.52	0.00	6.00	10.74	0.45	0.01159	0.00778	10.52
	03:45	60	21.0	4.00	5.00	13.68	0.20	5.20	9.31	0.23	0.01146	0.00547	9.11
	06:00	120	21.0	4.00	5.00	13.68	0.20	5.20	9.31	0.11	0.01146	0.00387	9.11
	08:00	180	21.0	3.50	4.50	13.75	0.20	4.70	8.41	0.08	0.01146	0.00317	8.24
	09:00	300	21.0	3.00	4.00	13.83	0.20	4.20	7.52	0.05	0.01146	0.00246	7.36
	10:00	600	21.0	3.00	4.00	13.83	0.20	4.20	7.52	0.02	0.01146	0.00174	7.36
	11:00	1440	21.0	3.00	4.00	13.83	0.20	4.20	7.52	0.01	0.01146	0.00112	7.36
	12:00	2880	22.0	2.00	3.00	13.98	0.40	3.40	6.09	0.00	0.01129	0.00079	5.96
	13:00	4320	22.0	2.00	3.00	13.98	0.40	3.40	6.09	0.00	0.01129	0.00064	5.96

<b>% PASANTE TAMIZ N° 200</b>		97.91	
<b>D</b>	<b>% Que Pasa</b>	<b>Dif D</b>	<b>% Que Pasa/mm</b>
<b>µm</b>		<b>mm</b>	<b>% Que Pasa</b>
3.87	9.11	1.6027	0.0000
5.47	9.11		

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**



**Figura 97.** Análisis granulométrico combinado (prueba 2).

**Tabla 48.** Prueba del doble hidrómetro (prueba 3).

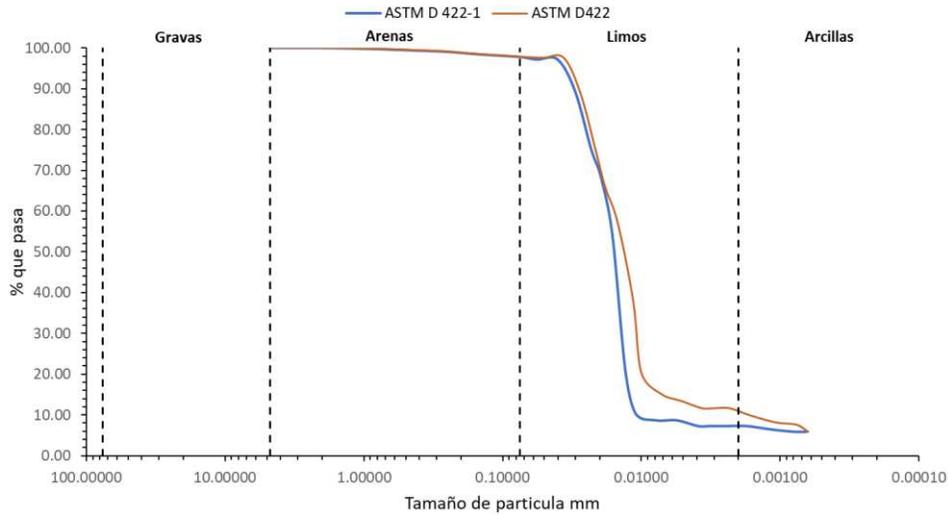
Hidrometro : 152H Agente Dispersante : (NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub> Ws (gr) : 50  
 Correccion por defloculante (Cd): 0.00 Correccion por menisco (C<sub>m</sub>): 1.00 Ss: 3.25  
 Volumen del hidrometro (V<sub>b</sub>, cm<sup>3</sup>): 63.00 Concentracion : 0.05 N a : 0.895 Muestra 3

Fecha	Hora	Tiempo min	T °C	R' <sub>H</sub>	R <sub>m</sub>	L cm	C <sub>t</sub>	R <sub>H</sub>	W <sub>D</sub> %	L/t cm/min	K	D mm	% Que Pasa
		0.25	20.0	54.50	55.50	5.95	0.00	55.50	99.35	23.80	0.01159	0.05654	97.17
		0.5	20.0	54.50	55.50	5.95	0.00	55.50	99.35	11.90	0.01159	0.03998	97.17
		1	20.0	50.00	51.00	6.64	0.00	51.00	91.29	6.64	0.01159	0.02986	89.29
		2	20.0	42.00	43.00	7.86	0.00	43.00	76.97	3.93	0.01159	0.02298	75.29
		3	20.0	38.00	39.00	8.47	0.00	39.00	69.81	2.82	0.01159	0.01948	68.28
		5	20.0	30.00	31.00	9.70	0.00	31.00	55.49	1.94	0.01159	0.01614	54.28
	11:45	10	20.0	11.00	12.00	12.61	0.00	12.00	21.48	1.26	0.01159	0.01301	21.01
	01:45	15	20.0	5.00	6.00	13.52	0.00	6.00	10.74	0.90	0.01159	0.01101	10.50
	02:45	30	20.0	4.00	5.00	13.68	0.00	5.00	8.95	0.46	0.01159	0.00783	8.75
	03:45	60	20.0	4.00	5.00	13.68	0.00	5.00	8.95	0.23	0.01159	0.00553	8.75
	06:00	120	21.0	3.00	4.00	13.83	0.20	4.20	7.52	0.12	0.01146	0.00389	7.35
	08:00	180	21.0	3.00	4.00	13.83	0.20	4.20	7.52	0.08	0.01146	0.00318	7.35
	09:00	300	21.0	3.00	4.00	13.83	0.20	4.20	7.52	0.05	0.01146	0.00246	7.35
	10:00	600	21.0	3.00	4.00	13.83	0.20	4.20	7.52	0.02	0.01146	0.00174	7.35
	11:00	1440	21.0	2.50	3.50	13.91	0.20	3.70	6.62	0.01	0.01146	0.00113	6.48
	12:00	2880	22.0	2.00	3.00	13.98	0.40	3.40	6.09	0.00	0.01129	0.00079	5.95
	13:00	4320	22.0	2.00	3.00	13.98	0.40	3.40	6.09	0.00	0.01129	0.00064	5.95

**% PASANTE TAMIZ N° 200** 97.81

D μm	% Que Pasa	Dif D mm	% Que Pasa/mm	% Que Pasa 5 μ
3.89	7.35	1.6431	0.8525	8.30
5.53	8.75			

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**



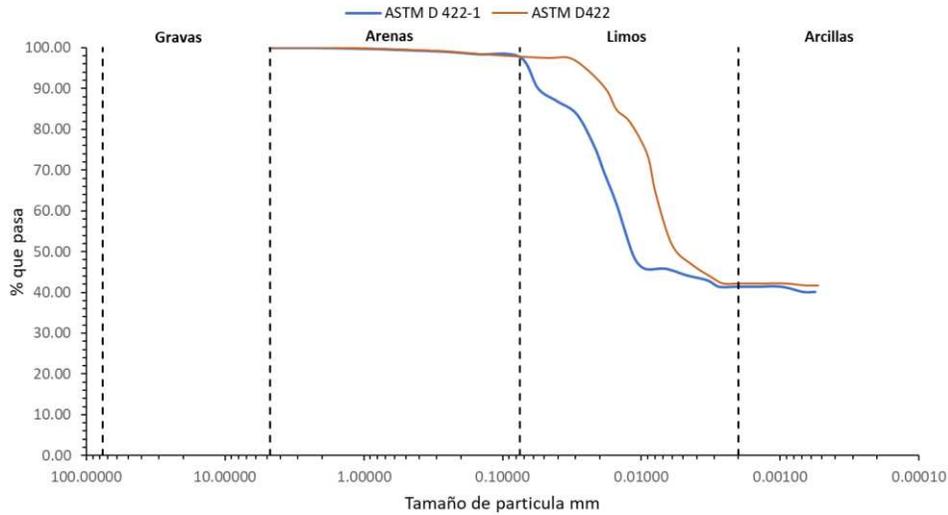
**Figura 98.** Análisis granulométrico combinado (prueba 3).

**Tabla 49.** Prueba del doble hidrómetro de suelo mezclado con carbonato de sodio.

Suelo mezclado con Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>													
Hidrometro :		152H		Agente Dispersante :		(NaPO <sub>3</sub> ) <sub>6</sub>		Ws (gr) :		55.42			
Correccion por defloculante (Cd):		0.00		Correccion por menisco (C <sub>m</sub> ):		1.00		Ss:		3.25			
Volumen del hidrometro (V <sub>b</sub> , cm <sup>3</sup> ):		63.00		Concentracion :		0.05 N		a :		0.895			
Muestra # Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>													
Fecha	Hora	Tiempo min	T °C	R' <sub>H</sub>	R <sub>m</sub>	L cm	C <sub>t</sub>	R <sub>H</sub>	W <sub>D</sub> %	L/t cm/min	K	D mm	% Que Pasa
		0.25	20.0	56.00	57.00	5.72	0.00	57.00	92.06	22.86	0.01159	0.05542	90.04
		0.5	20.0	54.00	55.00	6.02	0.00	55.00	88.83	12.04	0.01159	0.04023	86.88
		1	20.0	52.00	53.00	6.33	0.00	53.00	85.60	6.33	0.01159	0.02916	83.72
		2	20.0	47.00	48.00	7.09	0.00	48.00	77.52	3.55	0.01159	0.02183	75.82
		3	20.0	43.00	44.00	7.71	0.00	44.00	71.06	2.57	0.01159	0.01858	69.50
		5	20.0	38.00	39.00	8.47	0.00	39.00	62.99	1.69	0.01159	0.01509	61.60
	11:45	10	20.0	30.00	31.00	9.70	0.00	31.00	50.07	0.97	0.01159	0.01141	48.97
	01:45	15	20.0	28.00	29.00	10.00	0.00	29.00	46.84	0.67	0.01159	0.00947	45.81
	02:45	30	20.0	28.00	29.00	10.00	0.00	29.00	46.84	0.33	0.01159	0.00669	45.81
	03:45	60	20.0	27.00	28.00	10.16	0.00	28.00	45.22	0.17	0.01159	0.00477	44.23
	06:00	120	21.0	26.00	27.00	10.31	0.20	27.20	43.93	0.09	0.01146	0.00336	42.97
	08:00	180	21.0	25.00	26.00	10.46	0.20	26.20	42.31	0.06	0.01146	0.00276	41.39
	09:00	300	21.0	25.00	26.00	10.46	0.20	26.20	42.31	0.03	0.01146	0.00214	41.39
	10:00	600	21.0	25.00	26.00	10.46	0.20	26.20	42.31	0.02	0.01146	0.00151	41.39
	11:00	1440	21.0	25.00	26.00	10.46	0.20	26.20	42.31	0.01	0.01146	0.00098	41.39
	12:00	2880	22.0	24.00	25.00	10.62	0.40	25.40	41.02	0.00	0.01129	0.00069	40.12
	13:00	4320	22.0	24.00	25.00	10.62	0.40	25.40	41.02	0.00	0.01129	0.00056	40.12
		<b>% PASANTE TAMIZ N° 200</b>		97.81									

D μm	% Que Pasa	Dif D mm	% Que Pasa/mm	% Que Pasa 5 μ
4.77	44.23	1.9244	0.8208	44.42
6.69	45.81			

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**



**Figura 99.** Análisis granulométrico combinado (suelo mezclado con carbonato de sodio).

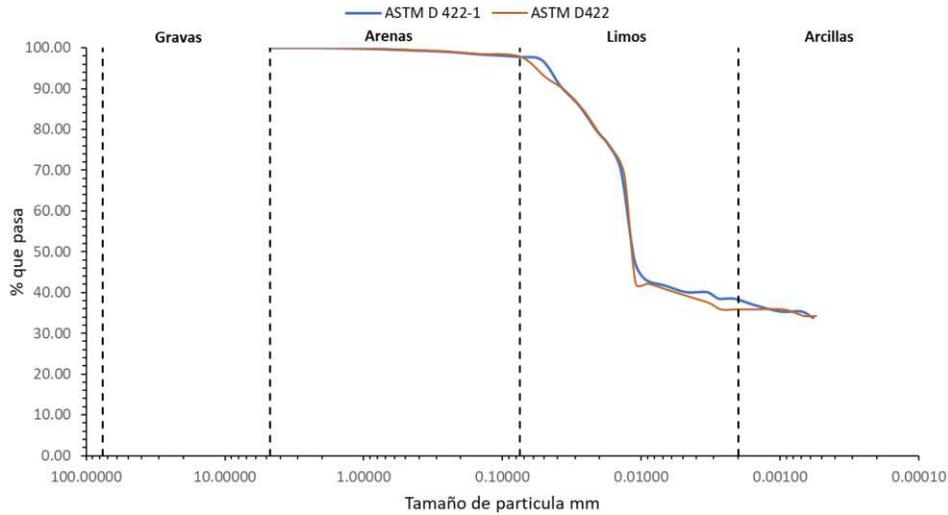
**Tabla 50.** Prueba del doble hidrómetro de suelo mezclado con cloruro de sodio.

Suelo mezclado con NaCl													
Hidrometro :		152H		Agente Dispersante :		(NaPO <sub>3</sub> ) <sub>6</sub>		Ws (gr) :		55.42			
Correccion por defloculante (Cd):		0.00		Correccion por menisco (C <sub>m</sub> ):		1.00		Ss:		3.25			
Volumen del hidrometro (V <sub>h</sub> , cm <sup>3</sup> ):		63.00		Concentracion :		0.05 N		a :		0.895			
												Muestra NaCl	
Fecha	Hora	Tiempo min	T °C	R' <sub>H</sub>	R <sub>m</sub>	L cm	C <sub>t</sub>	R <sub>H</sub>	W <sub>D</sub> %	L/t cm/min	K	D mm	% Que Pasa
		0.25	22.0	60.00	61.00	5.26	0.40	61.40	99.16	21.04	0.01129	0.05180	96.99
		0.5	22.0	56.00	57.00	5.72	0.40	57.40	92.70	11.44	0.01129	0.03820	90.67
		1	22.0	53.00	54.00	6.18	0.40	54.40	87.86	6.18	0.01129	0.02807	85.93
		2	22.0	49.00	50.00	6.79	0.40	50.40	81.40	3.40	0.01129	0.02081	79.61
		3	22.0	47.00	48.00	7.10	0.40	48.40	78.17	2.37	0.01129	0.01737	76.45
		5	22.0	43.00	44.00	7.71	0.40	44.40	71.71	1.54	0.01129	0.01402	70.13
	11:45	10	22.0	29.00	30.00	9.85	0.40	30.40	49.10	0.99	0.01129	0.01121	48.02
	01:45	15	22.0	26.00	27.00	10.31	0.40	27.40	44.25	0.69	0.01129	0.00937	43.28
	02:45	30	22.0	25.00	26.00	10.47	0.40	26.40	42.64	0.35	0.01129	0.00667	41.70
	03:45	60	22.0	24.00	25.00	10.62	0.40	25.40	41.02	0.18	0.01129	0.00475	40.12
	06:00	120	22.0	24.00	25.00	10.62	0.40	25.40	41.02	0.09	0.01129	0.00336	40.12
	08:00	180	22.0	23.00	24.00	10.77	0.40	24.40	39.41	0.06	0.01129	0.00276	38.54
	09:00	300	22.0	23.00	24.00	10.77	0.40	24.40	39.41	0.04	0.01129	0.00214	38.54
	10:00	600	22.0	22.00	23.00	10.93	0.40	23.40	37.79	0.02	0.01129	0.00152	36.96
	11:00	1440	22.0	21.00	22.00	11.08	0.40	22.40	36.18	0.01	0.01129	0.00099	35.38
	12:00	2880	22.0	21.00	22.00	11.08	0.40	22.40	36.18	0.00	0.01129	0.00070	35.38
	13:00	4320	22.0	20.00	21.00	11.23	0.40	21.40	34.56	0.00	0.01129	0.00058	33.80

% PASANTE TAMIZ N° 200 97.81

D μm	% Que Pasa	Dif D mm	% Que Pasa/mm	% Que Pasa 5 μ
4.75	40.12	1.9196	0.8229	40.33
6.67	41.70			

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**



**Figura 100.** Análisis granulométrico combinado (suelo mezclado con cloruro de sodio).

**B.1 Prueba de Pinhole**

**Tabla 51.** Prueba de Pinhole (prueba 1).

Muestra No. : 1 material inalterado  
 Contenido de Humedad : 28%

Tiempo seg	Carga Hidráulica ml	Flujo ml	Velocidad del Flujo ml/s	Turbidez del flujo final						Observaciones
				Muy Oscuro	Oscuro	Moderadamen te Oscuro	Ligeramente Oscuro	Poco Visible	Completament e claro	
60	50	14.85	0.25					x		
180	50	43.46	0.24					x		
300	50	73.57	0.25					x		
360	50	122.98	0.34				x			se observan
480	50	270.01	0.56				x			algunas
600	50	465.83	0.78				x			partículas
60	180	78.83	1.31				x			
180	180	254.28	1.41				x			
300	180	431.13	1.44				x			

Diámetro final : 1.90 mm

**Tabla 52. Prueba de Pinhole (prueba 2).**

Muestra No. : 2 material inalterado  
 Contenido de Humedad : 28%

Tiempo	Carga Hidraulica	Flujo	Velocidad del Flujo	Turbidez del flujo final					Observaciones
				Muy Oscuro	Oscuro	Moderadamente Oscuro	Ligeramente Oscuro	Poco Visible	
seg	ml	ml	ml/s						
60	50	10.25	0.17					x	
180	50	35.68	0.20					x	
300	50	64.51	0.22					x	
360	50	86.24	0.24						se observan
480	50	195.74	0.41						algunas
600	50	426.71	0.71						particulas
60	180	82.62	1.38					x	
180	180	253.87	1.41					x	
300	180	412.87	1.38					x	

Diametro final : 1.85 mm

**Tabla 53. Prueba de Pinhole (prueba 3).**

Muestra No. : 3 material inalterado  
 Contenido de Humedad : 28%

Tiempo	Carga Hidraulica	Flujo	Velocidad del Flujo	Turbidez del flujo final					Observaciones
				Muy Oscuro	Oscuro	Moderadamente Oscuro	Ligeramente Oscuro	Poco Visible	
seg	ml	ml	ml/s						
60	50	10.27	0.17					x	
180	50	34.33	0.19					x	
300	50	62.68	0.21					x	
360	50	92.68	0.26						se observan
480	50	182.68	0.38						algunas
600	50	437.68	0.73						particulas
60	180	77.30	1.29					x	
180	180	245.62	1.36					x	
300	180	423.33	1.41					x	

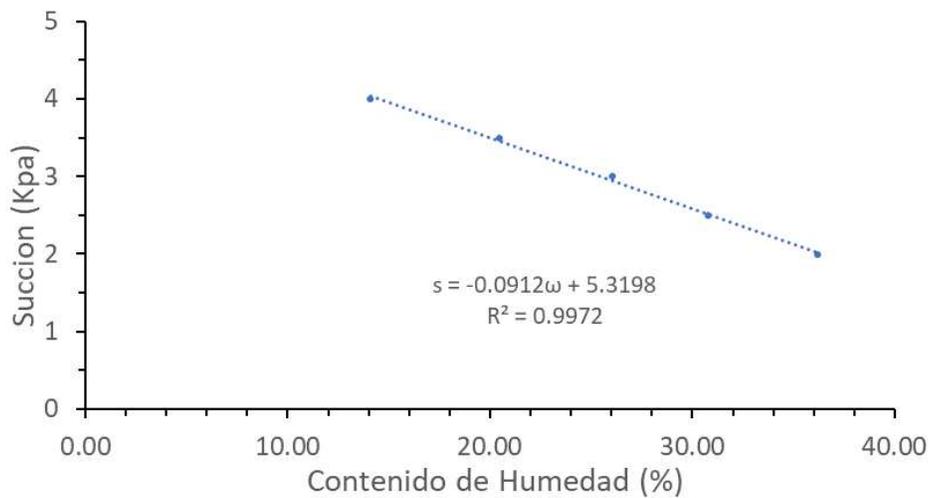
Diametro final : 1.92 mm

**ANEXO C. DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE RETENCIÓN AGUA - SUELO**

**C.1 Calibración de papel filtro Whatman No. 42 Lot No. 17398518.**

**Tabla 54.** Concentración de la solución salina para la calibración del papel filtro.

kPa	log kPa	pF	atm	R <sub>h</sub>	20 °C	
					gr NaCl	gr KCl
					1000 ml agua	1000 ml agua
-98	1.99	3.0	-0.97	0.99927	1.30	1.70
-310	2.49	3.5	-3.02	0.99774	3.80	5.30
-980	2.99	4.0	-9.68	0.99278	13.10	17.00
-3099	3.49	4.5	-30.19	0.97764	39.00	52.70
-9800	3.99	5.0	-96.77	0.93008	122.50	165.00



**Figura 101.** Curva de calibración de papel filtro Whatman No. 42 Lot No. 17398518.

## C.2 Preparación de muestras para medición de succión por el método de papel filtro

**Tabla 55.** Preparación de muestras para medición de la succión en el suelo por método del papel filtro.

Muestras para trayectoria de humedecimiento						
No. De Muestra	W <sub>m</sub> gr	W <sub>s</sub> gr	V <sub>s</sub> cm <sup>3</sup>	V <sub>w</sub> cm <sup>3</sup>	V <sub>v</sub> cm <sup>3</sup>	Sw %
1	72.9800	72.9800	22.4600	0.0000	37.71	0.00
2	101.6300	96.6400	29.7400	4.9900	49.85	10.01
3	89.1500	80.8300	24.8700	8.3200	41.60	20.00
4	117.5000	101.7600	31.3100	15.7400	52.47	30.00
5	94.5800	78.3400	24.1000	16.2400	40.50	40.10
6	103.3600	82.1900	25.2900	21.1700	42.33	50.01
7	108.5000	82.9100	25.5100	25.5900	42.65	60.00
8	105.6000	77.6300	23.8900	27.9700	39.94	70.03
9	88.0800	62.3500	19.1800	25.7300	32.14	80.06
10	111.2900	76.0800	23.4100	35.2100	39.10	90.05
11	105.2300	69.5000	21.3800	35.7300	35.73	100.00
12	66.8000	65.3400	20.1000	1.4600	33.66	4.34
13	77.9400	74.5600	22.9400	3.3800	38.18	8.85
14	41.0100	37.9800	11.6900	3.0300	19.57	15.48
15	91.8900	81.5900	25.1000	10.3000	42.14	24.44
16	92.5600	76.6600	23.5900	15.9000	39.40	40.36
17	106.5400	87.3700	26.8800	19.1700	44.79	42.80
18	131.1000	104.2600	32.0800	26.8400	53.53	50.14
19	109.4600	84.1700	25.9000	25.2900	43.32	58.38
20	99.0400	73.5700	22.6400	25.4700	37.81	67.36
21	121.3000	83.6200	25.7300	37.6800	43.05	87.53
22	73.3900	48.4500	14.9100	24.9400	24.94	100.00

Muestras para trayectoria de secado						
No. De Muestra	W <sub>m</sub> gr	W <sub>s</sub> gr	V <sub>s</sub> cm <sup>3</sup>	V <sub>w</sub> cm <sup>3</sup>	V <sub>v</sub> cm <sup>3</sup>	Sw %
1	72.9800	72.9800	22.4600	0.0000	37.71	0.00
2	101.6300	96.6400	29.7400	4.9900	49.85	10.01
3	89.1500	80.8300	24.8700	8.3200	41.60	20.00
4	117.5000	101.7600	31.3100	15.7400	52.47	30.00
5	94.5800	78.3400	24.1000	16.2400	40.50	40.10
6	103.3600	82.1900	25.2900	21.1700	42.33	50.01
7	108.5000	82.9100	25.5100	25.5900	42.65	60.00
8	105.6000	77.6300	23.8900	27.9700	39.94	70.03
9	88.0800	62.3500	19.1800	25.7300	32.14	80.06
10	111.2900	76.0800	23.4100	35.2100	39.10	90.05
11	105.2300	69.5000	21.3800	35.7300	35.73	100.00
12	65.3400	65.3400	20.1000	0.0000	33.66	0.00
13	80.7500	74.5600	22.9400	6.1900	38.18	16.21
14	42.2300	37.9800	11.6900	4.2500	19.57	21.72
15	89.4400	81.5900	25.1000	7.8500	42.14	18.63
16	91.6500	76.6600	23.5900	14.9900	39.40	38.05
17	106.6500	87.3700	26.8800	19.2800	44.79	43.05
18	132.2700	104.2600	32.0800	28.0100	53.53	52.33
19	114.3100	84.1700	25.9000	30.1400	43.32	69.58
20	102.8900	73.5700	22.6400	29.3200	37.81	77.55
21	122.1400	83.6200	25.7300	38.5200	43.05	89.48
22	73.3900	48.4500	14.9100	24.9400	24.94	100.00

**Tabla 56.** Preparación de muestras para medición de la succión en el suelo mezclado con cloruro de sodio por método del papel filtro.

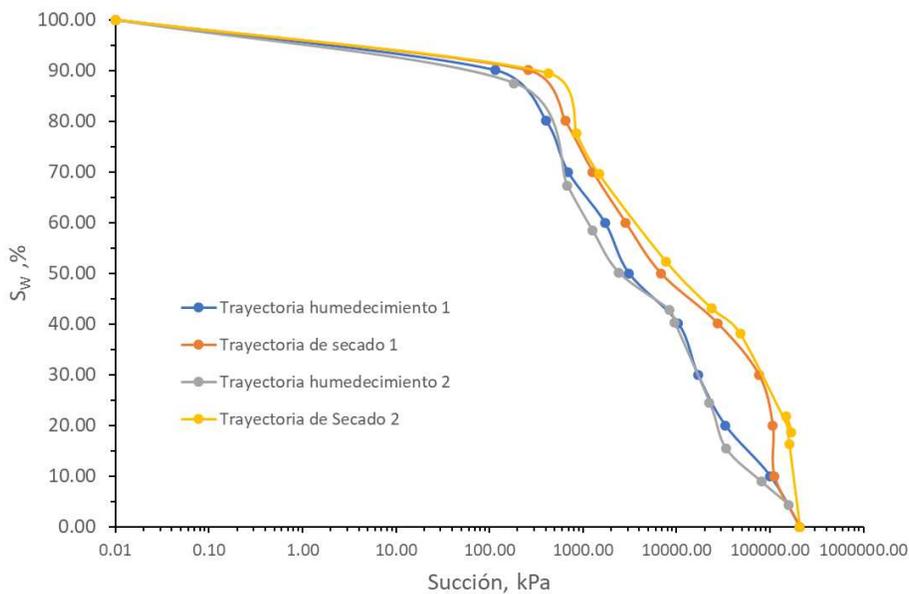
Muestras de suelo mezclado con NaCl para trayectoria de humedecimiento						
No. De Muestra	$W_m$ gr	$W_s$ gr	$V_s$ $cm^3$	$V_w$ $cm^3$	$V_v$ $cm^3$	Sw %
1	74.2042	72.0042	22.1600	2.2000	36.88	5.97
2	69.2790	66.5068	20.4600	2.7722	34.31	8.08
3	80.3905	72.8063	22.4000	7.5842	37.39	20.28
4	84.5007	73.1687	22.5100	11.3320	37.67	30.08
5	91.6375	75.7641	23.3100	15.8734	39.19	40.50
6	86.4649	68.8047	21.1700	17.6602	35.54	49.69
7	87.0220	66.4352	20.4400	20.5868	34.20	60.20
8	99.9074	73.4299	22.5900	26.4775	37.77	70.10
9	94.2381	67.3689	20.7300	26.8692	34.77	77.28
10	102.6430	72.9731	22.4500	29.6699	37.62	78.87
11	109.1045	76.2837	23.4700	32.8208	39.35	83.41

Muestras de suelo mezclado con NaCl para trayectoria de secado						
No. De Muestra	$W_m$ gr	$W_s$ gr	$V_s$ $cm^3$	$V_w$ $cm^3$	$V_v$ $cm^3$	Sw %
1	78.0034	72.0042	22.1600	5.9992	37.15	16.15
2	73.4053	66.5068	20.4600	6.8985	34.31	20.11
3	84.3080	72.8063	22.4000	11.5017	37.51	30.66
4	86.5378	73.1687	22.5100	13.3691	37.49	35.66
5	95.3620	75.7641	23.3100	19.5979	38.93	50.34
6	88.2906	68.8047	21.1700	19.4859	35.40	55.04
7	88.1727	66.4352	20.4400	21.7375	34.21	63.54
8	101.0826	73.4299	22.5900	27.6527	37.88	73.00
9	94.2018	67.3689	20.7300	26.8329	34.52	77.73
10	102.7924	72.9731	22.4500	29.8193	37.38	79.77
11	108.7662	76.2837	23.4700	32.4825	39.38	82.48

**C.1 Medición de succión por el método de papel filtro**

**Tabla 57.** Medición de la succión de suelo en condiciones naturales.

No. De Muestra	Sw %	Trayectoria de secado			Succión Matricial	
		Wpfs gr	Wpfl gr	$\omega$ pf %	Log kpa	Kpa
1	0.00	0.1289	0.1289	0.00	5.32	208833.42
2	10.01	0.1238	0.1275	2.99	5.05	111488.83
3	20.00	0.1225	0.1264	3.18	5.03	107016.07
4	30.00	0.1227	0.1286	4.81	4.88	76079.38
5	40.10	0.1206	0.1322	9.62	4.44	27706.78
6	50.01	0.1238	0.1440	16.32	3.83	6787.70
7	60.00	0.1229	0.1480	20.42	3.46	2865.58
8	70.03	0.1256	0.1561	24.28	3.11	1273.94
9	80.06	0.1231	0.1570	27.54	2.81	643.10
10	90.05	0.1201	0.1584	31.89	2.41	257.88
11	100.00	0.1236	0.2237	80.99	-2.07	0.01
12	0.00	0.1197	0.1197	0.00	5.32	208833.42
13	16.21	0.1220	0.1235	1.23	5.21	161312.81
14	21.72	0.1209	0.1228	1.57	5.18	150132.58
15	18.63	0.1219	0.1232	1.07	5.22	166932.14
16	38.05	0.1241	0.1328	7.01	4.68	47912.04
17	43.05	0.1207	0.1332	10.36	4.38	23730.64
18	52.33	0.1234	0.1428	15.72	3.89	7691.72
19	69.58	0.1192	0.1473	23.57	3.17	1478.66
20	77.55	0.1258	0.1588	26.23	2.93	846.12
21	89.48	0.1274	0.1650	29.51	2.63	424.80
22	100.00	0.1256	0.3035	141.64	-7.60	0.01

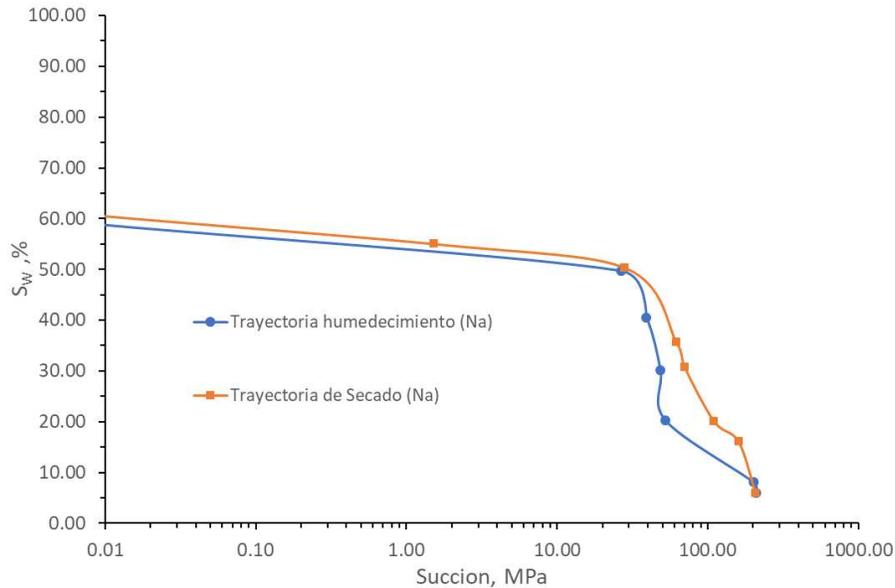


**Figura 102.** Curvas de retención agua-suelo, del suelo en condiciones naturales.

**Tabla 58.** Medición de la succión de suelo mezclado con cloruro de sodio.

Trayectoria de humedecimiento suelo mezclado con NaCl						
No. De Muestra	Sw %	Wpfs gr	Wpfh gr	$\omega$ pf %	Succión Matricial Log kpa	Kpa
1	5.97	0.1194	0.1194	0.00	5.32	208833.42
2	8.08	0.1184	0.1186	0.17	5.30	201555.47
3	20.28	0.1197	0.1276	6.60	4.72	52227.02
4	30.08	0.1220	0.1305	6.97	4.68	48349.30
5	40.50	0.1180	0.1274	7.97	4.59	39200.49
6	49.69	0.1160	0.1274	9.83	4.42	26516.98
7	60.20	0.1229	0.1882	53.13	0.47	2.98
8	70.10	0.1190	0.2897	143.45	-7.76	0.01
9	77.28	0.1221	0.3229	164.46	-9.68	0.01
10	78.87	0.1213	0.3572	194.48	-12.42	0.01
11	83.41	0.1226	0.3502	185.64	-11.61	0.01

Trayectoria de secado suelo mezclado con NaCl						
No. De Muestra	Sw %	Wpfs gr	Wpfh gr	$\omega$ pf %	Succión Matricial Log kpa	Kpa
1	16.15	0.1197	0.1212	1.25	5.21	160514.51
2	20.11	0.1190	0.1226	3.03	5.04	110637.11
3	30.66	0.1184	0.1245	5.15	4.85	70784.01
4	35.66	0.1232	0.1303	5.76	4.79	62260.93
5	50.34	0.1241	0.1359	9.51	4.45	28354.92
6	55.04	0.1149	0.1418	23.41	3.18	1529.88
7	63.54	0.1241	0.1970	58.74	-0.04	0.92
8	73.00	0.1238	0.2797	125.93	-6.16	0.01
9	77.73	0.1244	0.3008	141.80	-7.61	0.01
10	79.77	0.1223	0.3137	156.50	-8.95	0.01
11	82.48	0.1233	0.3448	179.64	-11.06	0.01



**Figura 103.** Curva de retención agua-suelo, del suelo mezclado con cloruro de sodio.

**ANEXO D. ENSAYES EDMÉTRICOS**

**D.1 Determinación de índice de compresión  $\lambda$  y el índice de carga-descarga  $\kappa$**

**Tabla 59.** Ensaye edométricos sujeto a una carga de 31.78 kPa (réplica 1).

Muestra 1							$\sigma_n$ (Kpa) =	31.78
<b>Datos</b>	$W_m$ (gr) =	131.70	$V_m$ (cm <sup>3</sup> ) =	84.38	$V_a$ (cm <sup>3</sup> ) =	23.95	$A_{sup}$ (cm <sup>2</sup> ) =	44.18
	$W_s$ (gr) =	102.95	$V_s$ (cm <sup>3</sup> ) =	31.68	$H_0$ (cm) =	1.91	$e_0$ =	1.66
	$W_w$ (gr) =	28.75	$V_w$ (cm <sup>3</sup> ) =	28.75	$H_s$ (cm) =	0.72	$SW_0$ (%) =	54.56

Etapa	Presion Aplicada Kpa	Sw %	Tiempo min	Lectura 0.001 in	$\Delta$ Lectura mm	$\Delta H$ mm	$e_f$	$\epsilon$ exp %
	Sw inicial	0.00	54.56	0.01	1000.000	0.000	19.1	1.664
Sw inicial	15.89	54.56	60.00	996.000	0.102	18.998	1.650	0.532
Sw inicial	31.78	54.56	1500.00	994.000	0.051	18.948	1.643	0.798
Sw inicial	31.78	54.56	1500.00	994.000	0.000	18.948	1.643	0.798
Incremento Sw 1	31.78	60.00	2940.00	981.000	0.330	18.617	1.597	2.527
Incremento Sw 2	31.78	80.00	4380.00	976.000	0.127	18.490	1.579	3.192
Incremento Sw 3	31.78	100.00	5820.00	975.000	0.025	18.465	1.575	3.325
Descarga	0.00	100.00	7260.00	981.000	-0.152	18.617	1.597	2.527

**Tabla 60.** Ensaye edométricos sujeto a una carga de 63.57 kPa (réplica 1).

Muestra 2							$\sigma_n$ (Kpa) =	63.57
<b>Datos</b>	$W_m$ (gr) =	133.80	$V_m$ (cm <sup>3</sup> ) =	86.15	$V_a$ (cm <sup>3</sup> ) =	25.11	$A_{sup}$ (cm <sup>2</sup> ) =	44.18
	$W_s$ (gr) =	105.10	$V_s$ (cm <sup>3</sup> ) =	32.34	$H_0$ (cm) =	1.95	$e_0$ =	1.66
	$W_w$ (gr) =	28.70	$V_w$ (cm <sup>3</sup> ) =	28.70	$H_s$ (cm) =	0.73	$SW_0$ (%) =	53.33

Etapa	Presion Aplicada Kpa	Sw %	Tiempo min	Lectura 0.01 mm	$\Delta$ Lectura mm	$\Delta H$ mm	$e_f$	$\epsilon$ %
	Sw inicial	0.00	53.33	0.01	1000.000	0.000	19.5	1.664
Sw inicial	15.89	53.33	60.00	995.000	0.050	19.450	1.657	0.26
Sw inicial	31.78	53.33	120.00	987.000	0.080	19.370	1.646	0.67
Sw inicial	63.57	53.33	1560.00	962.000	0.250	19.120	1.612	1.95
Sw inicial	63.57	53.33	1560.00	962.000	0.000	19.120	1.612	1.95
Incremento Sw 1	63.57	60.00	3000.00	930.000	0.320	18.800	1.568	3.59
Incremento Sw 2	63.57	80.00	4440.00	920.000	0.100	18.700	1.555	4.10
Incremento Sw 3	63.57	100.00	5880.00	915.000	0.050	18.650	1.548	4.36
Descarga	0.00	100.00	7320.00	971.000	-0.560	19.210	1.62	1.49

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**

**Tabla 61.** Ensaye edométricos sujeto a una carga de 95.35 kPa (réplica 1).

Muestra 3							$\sigma_n$ (Kpa) =	95.35
Datos	$W_m$ (gr) =	144.40	$V_m$ (cm <sup>3</sup> ) =	92.17	$V_a$ (cm <sup>3</sup> ) =	25.61	$A_{sup}$ (cm <sup>2</sup> ) =	46.08
	$W_s$ (gr) =	112.44	$V_s$ (cm <sup>3</sup> ) =	34.60	$H_0$ (cm) =	2.00	$e_0$ =	1.66
	$W_w$ (gr) =	31.96	$V_w$ (cm <sup>3</sup> ) =	31.96	$H_s$ (cm) =	0.75	$Sw_0$ (%) =	55.51

Etapa	Presion Aplicada Kpa	Sw %	Tiempo min	Lectura				$e_f$	$\epsilon$ %
				0.001 in	$\Delta$ Lectura mm	$\Delta H$ mm			
Sw inicial	0.00	55.51	0.01	1000.000	0.000	20	1.664	0.00	
Sw inicial	15.89	55.51	60.00	995.000	0.127	19.873	1.647	0.63	
Sw inicial	47.68	55.51	120.00	983.000	0.305	19.568	1.606	2.16	
Sw inicial	95.35	55.51	1560.00	965.000	0.457	19.111	1.546	4.45	
Incremento Sw 1	95.35	60.00	3000.00	955.000	0.254	18.857	1.512	5.72	
Incremento Sw 2	95.35	80.00	4440.00	948.000	0.178	18.679	1.488	6.60	
Incremento Sw 3	95.35	100.00	5880.00	944.000	0.102	18.578	1.474	7.11	
Descarga	0.00	100.00	7320.00	957.000	-0.330	18.908	1.518	5.46	

**Tabla 62.** Ensaye edométricos sujeto a una carga de 190.71 kPa (réplica 1).

Muestra 4							$\sigma_n$ (Kpa) =	190.71
Datos	$W_m$ (gr) =	134.00	$V_m$ (cm <sup>3</sup> ) =	86.15	$V_a$ (cm <sup>3</sup> ) =	24.91	$A_{sup}$ (cm <sup>2</sup> ) =	44.18
	$W_s$ (gr) =	105.10	$V_s$ (cm <sup>3</sup> ) =	32.34	$H_0$ (cm) =	1.95	$e_0$ =	1.66
	$W_w$ (gr) =	28.90	$V_w$ (cm <sup>3</sup> ) =	28.90	$H_s$ (cm) =	0.73	$Sw_0$ (%) =	53.71

Etapa	Presion Aplicada Kpa	Sw %	Tiempo min	Lectura				$e_f$	$\epsilon$ %
				0.001 in	$\Delta$ Lectura mm	$\Delta H$ mm			
Sw inicial	0.00	53.71	0.01	1000.000	0.000	19.5	1.664	0.00	
Sw inicial	15.89	53.71	60.00	996.000	0.102	19.398	1.650	0.52	
Sw inicial	47.68	53.71	120.00	985.000	0.279	19.119	1.612	1.95	
Sw inicial	95.35	53.71	180.00	972.000	0.330	18.789	1.567	3.65	
Sw inicial	190.71	53.71	1620.00	944.000	0.711	18.078	1.470	7.29	
Incremento Sw 1	190.71	60.00	3060.00	914.000	0.762	17.316	1.366	11.20	
Incremento Sw 2	190.71	80.00	4500.00	904.000	0.254	17.062	1.331	12.50	
Incremento Sw 3	190.71	100.00	5940.00	899.000	0.127	16.935	1.313	13.16	
Descarga	0.00	100.00	7380.00	952.000	-1.346	18.281	1.497	6.25	

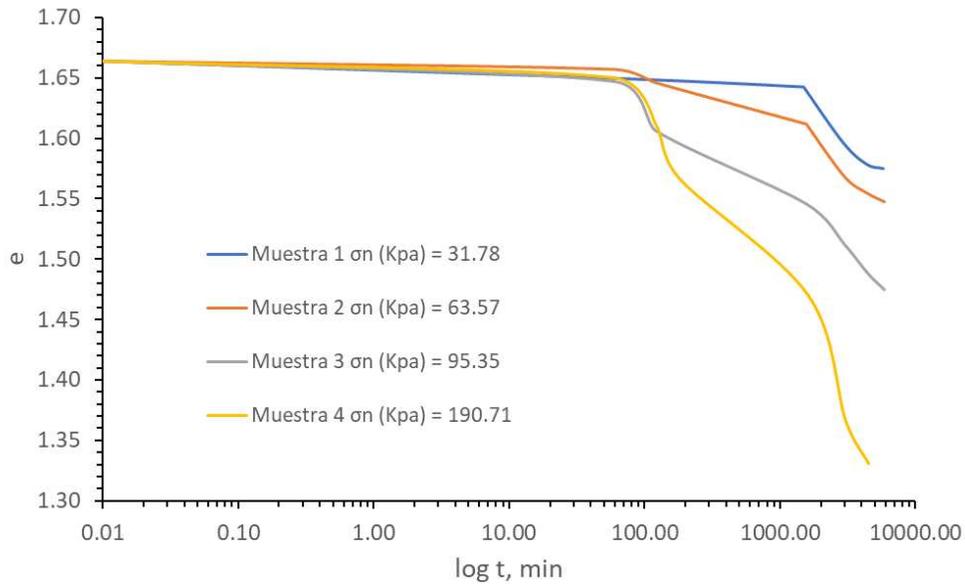
**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**

**Tabla 63.** Ensaye edométricos sujeto a una carga de 381.41 kPa (réplica 1).

Muestra 5								$\sigma_n$ (Kpa) =	381.41
Datos	Wm (gr) =	132.40	Vm (cm3) =	84.38	Va (cm3) =	23.25	Asup (cm2) =	44.18	
	Ws (gr) =	102.95	Vs (cm3) =	31.68	H0 (cm) =	1.91	e0 =	1.66	
	Ww (gr) =	29.45	Vw (cm3) =	29.45	Hs (cm) =	0.72	Swo (%) =	55.89	

Etapa	Presion Aplicada Kpa	Sw %	Tiempo min	Lectura				
				0.001 in	$\Delta$ Lectura mm	H mm	ef	$\epsilon$ %
Sw inicial	0.00	55.89	0.01	1030.000	0.000	19.1	1.664	0.00
Sw inicial	48.85	55.89	60.00	995.000	0.889	18.211	1.540	4.65
Sw inicial	97.70	55.89	120.00	963.000	0.813	17.398	1.427	9.34
Sw inicial	198.74	55.89	180.00	955.000	0.203	17.195	1.398	10.95
Sw inicial	381.49	55.89	1620.00	941.000	0.356	16.839	1.349	13.15
Incremento Sw 1	381.49	60.00	3060.00	921.000	0.508	16.331	1.278	16.44
Incremento Sw 2	381.49	80.00	4500.00	902.000	0.483	15.849	1.210	19.91
Incremento Sw 3	381.49	100.00	5940.00	900.000	0.051	15.798	1.203	20.83
Descarga	0.00	100.00	7380.00	989.000	-2.261	18.059	1.519	6.59



**Figura 104.** Curvas de consolidación de muestras sujetas a distintas cargas (réplica 1).

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**

**Tabla 64.** Ensaye edométricos sujeto a una carga de 31.78 kPa (réplica 2).

Muestra 1b							$\sigma_n$ (Kpa) =	31.78
Datos	$W_m$ (gr) =	129.80	$V_m$ (cm <sup>3</sup> ) =	84.38	$V_a$ (cm <sup>3</sup> ) =	25.85	$A_{sup}$ (cm <sup>2</sup> ) =	44.18
	$W_s$ (gr) =	102.95	$V_s$ (cm <sup>3</sup> ) =	31.68	$H_0$ (cm) =	1.91	$e_0$ =	1.66
	$W_w$ (gr) =	26.85	$V_w$ (cm <sup>3</sup> ) =	26.85	$H_s$ (cm) =	0.72	$Sw_0$ (%) =	50.95

Etapa	Presion Aplicada Kpa	Sw %	Tiempo min	Lectura		$\Delta H$ mm	$e_f$	$\epsilon$ exp %
				0.001 in	$\Delta$ Lectura mm			
Sw inicial	0.00	50.95	0.01	1000.000	0.000	19.1	1.664	0.000
Sw inicial	15.89	50.95	60.00	997.000	0.076	19.024	1.653	0.399
Sw inicial	31.78	50.95	1500.00	994.000	0.076	18.948	1.643	0.798
Incremento Sw 1	31.78	60.00	2940.00	981.000	0.330	18.617	1.597	2.527
Incremento Sw 2	31.78	80.00	4380.00	974.000	0.178	18.440	1.572	3.458
Incremento Sw 3	31.78	100.00	5820.00	970.000	0.102	18.338	1.558	3.990
Descarga	0.00	100.00	7260.00	981.000	-0.279	18.617	1.597	2.527

**Tabla 65.** Ensaye edométricos sujeto a una carga de 63.57 kPa (réplica 2).

Muestra 2b							$\sigma_n$ (Kpa) =	63.57
Datos	$W_m$ (gr) =	135.90	$V_m$ (cm <sup>3</sup> ) =	86.15	$V_a$ (cm <sup>3</sup> ) =	23.01	$A_{sup}$ (cm <sup>2</sup> ) =	44.18
	$W_s$ (gr) =	105.10	$V_s$ (cm <sup>3</sup> ) =	32.34	$H_0$ (cm) =	1.95	$e_0$ =	1.66
	$W_w$ (gr) =	30.80	$V_w$ (cm <sup>3</sup> ) =	30.80	$H_s$ (cm) =	0.73	$Sw_0$ (%) =	57.24

Etapa	Presion Aplicada Kpa	Sw %	Tiempo min	Lectura		$\Delta H$ mm	$e_f$	$\epsilon$ %
				0.01 mm	$\Delta$ Lectura mm			
Sw inicial	0.00	57.24	0.01	1900.000	0.000	19.5	1.664	0.00
Sw inicial	15.99	57.24	60.00	1881.000	0.190	19.310	1.638	0.97
Sw inicial	31.98	57.24	120.00	1862.000	0.190	19.120	1.612	1.95
Sw inicial	63.57	57.24	1560.00	1820.000	0.420	18.700	1.555	4.10
Incremento Sw 1	63.57	60.00	3000.00	1803.000	0.170	18.530	1.531	4.97
Incremento Sw 2	63.57	80.00	4440.00	1800.000	0.030	18.500	1.527	5.13
Incremento Sw 3	63.57	100.00	5880.00	1799.000	0.010	18.490	1.526	5.18
Descarga	0.00	100.00	7320.00	1835.000	-0.360	18.850	1.575	3.33

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**

**Tabla 66.** Ensaye edométricos sujeto a una carga de 95.35 kPa (réplica 2).

Muestra 3b								$\sigma_n$ (Kpa) =	95.35
Datos	$W_m$ (gr) =	146.10	$V_m$ (cm <sup>3</sup> ) =	92.17	$V_a$ (cm <sup>3</sup> ) =	23.91	$A_{sup}$ (cm <sup>2</sup> ) =	46.08	
	$W_s$ (gr) =	112.44	$V_s$ (cm <sup>3</sup> ) =	34.60	$H_0$ (cm) =	2.00	$e_0$ =	1.66	
	$W_w$ (gr) =	33.66	$V_w$ (cm <sup>3</sup> ) =	33.66	$H_s$ (cm) =	0.75	$Sw_0$ (%) =	58.46	

Etapa	Presion Aplicada Kpa	Sw %	Tiempo min	Lectura				
				0.001 in	$\Delta$ Lectura mm	$\Delta H$ mm	$e_f$	$\epsilon$ %
Sw inicial	0.00	58.46	0.01	1000.000	0.000	20	1.664	0.00
Sw inicial	15.33	58.46	60.00	994.000	0.152	19.848	1.644	0.76
Sw inicial	45.77	58.46	120.00	984.000	0.254	19.594	1.610	2.03
Sw inicial	95.35	58.46	1560.00	966.000	0.457	19.136	1.549	4.32
Incremento Sw 1	95.35	60.00	3000.00	962.000	0.102	19.035	1.535	4.83
Incremento Sw 2	95.35	80.00	4440.00	950.000	0.305	18.730	1.495	6.35
Incremento Sw 3	95.35	100.00	5880.00	947.000	0.076	18.654	1.485	6.73
Descarga	0.00	100.00	7320.00	960.000	-0.330	18.984	1.529	5.08

**Tabla 67.** Ensaye edométricos sujeto a una carga de 190.71 kPa (réplica 2).

Muestra 4b								$\sigma_n$ (Kpa) =	190.71
Datos	$W_m$ (gr) =	134.50	$V_m$ (cm <sup>3</sup> ) =	86.15	$V_a$ (cm <sup>3</sup> ) =	24.41	$A_{sup}$ (cm <sup>2</sup> ) =	44.18	
	$W_s$ (gr) =	105.10	$V_s$ (cm <sup>3</sup> ) =	32.34	$H_0$ (cm) =	1.95	$e_0$ =	1.66	
	$W_w$ (gr) =	29.40	$V_w$ (cm <sup>3</sup> ) =	29.40	$H_s$ (cm) =	0.73	$Sw_0$ (%) =	54.64	

Etapa	Presion Aplicada Kpa	Sw %	Tiempo min	Lectura				
				0.001 in	$\Delta$ Lectura mm	$\Delta H$ mm	$e_f$	$\epsilon$ %
Sw inicial	0.00	54.64	0.01	1000.000	0.000	19.5	1.664	0.00
Sw inicial	15.89	54.64	60.00	995.000	0.127	19.373	1.647	0.65
Sw inicial	47.68	54.64	120.00	983.000	0.305	19.068	1.605	2.21
Sw inicial	95.35	54.64	180.00	968.000	0.381	18.687	1.553	4.17
Sw inicial	190.71	54.64	1620.00	928.000	1.016	17.671	1.414	9.38
Incremento Sw 1	190.71	60.00	3060.00	919.000	0.229	17.443	1.383	10.55
Incremento Sw 2	190.71	80.00	4500.00	913.000	0.152	17.290	1.362	11.33
Incremento Sw 3	190.71	100.00	5940.00	911.000	0.051	17.239	1.355	11.59
Descarga	0.00	100.00	7380.00	964.000	-1.346	18.586	1.539	4.69

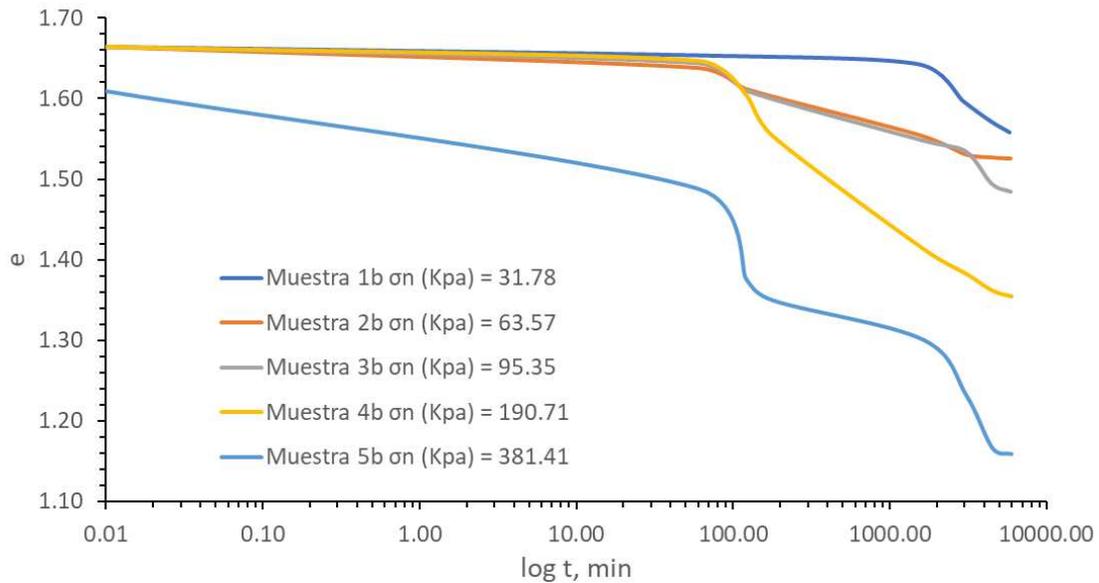
**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**

**Tabla 68.** Ensaye edométricos sujeto a una carga de 381.41 kPa (réplica 2).

Muestra 5b						$\sigma_n$ (Kpa) =	381.41	
Datos	Wm (gr) =	135.90	Vm (cm3) =	86.15	Va (cm3) =	23.01	Asup (cm2) =	44.18
	Ws (gr) =	105.10	Vs (cm3) =	32.34	H0 (cm) =	1.95	e0 =	1.66
	Ww (gr) =	30.80	Vw (cm3) =	30.80	Hs (cm) =	0.73	Sw0 (%) =	57.24

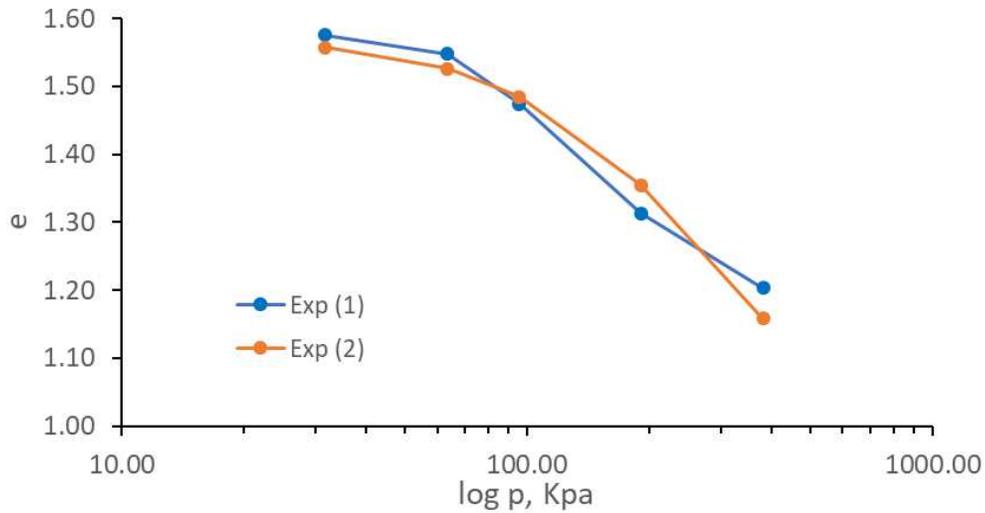
  

Etapa	Presion Aplicada Kpa	Sw %	Tiempo min	Lectura				
				0.001 in	$\Delta$ Lectura mm	H mm	ef	$\epsilon$ %
Sw inicial	0.00	57.24	0.01	1000.000	0.000	19.1	1.609	0.00
Sw inicial	48.85	57.24	60.00	967.000	0.889	18.211	1.488	4.65
Sw inicial	97.70	57.24	120.00	959.000	0.813	17.398	1.377	9.34
Sw inicial	198.74	57.24	180.00	948.000	0.203	17.195	1.349	10.95
Sw inicial	381.49	57.24	1620.00	915.000	0.356	16.839	1.300	13.15
Incremento Sw 1	381.49	60.00	3060.00	899.000	0.508	16.331	1.231	16.44
Incremento Sw 2	381.49	80.00	4500.00	879.000	0.483	15.849	1.165	19.91
Incremento Sw 3	381.49	100.00	5940.00	876.000	0.051	15.798	1.158	20.83
Descarga	0.00	100.00	7380.00	988.000	-2.261	18.059	1.467	6.59



**Figura 105.** Curvas de consolidación de muestras sujetas a distintas cargas (réplica 2).

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**



**Figura 106.** Curvas de compresibilidad del suelo, a grado de saturación del 100%.

**Tabla 69.** Pendientes  $\kappa$  y  $\lambda$  de ensayos edométricos.

	$\kappa$	$\lambda$
Réplica 1	0.092	0.450
Réplica 2	0.105	0.392
Promedio	0.098	0.421

**Tabla 70.** Ensaye edométricos sujeto a una carga de 31.78 kPa (suelo mezclado con sodio).

Muestra 1 Na						$\sigma_n$ (Kpa) =	<b>31.78</b>	
<b>Datos</b>	$W_m$ (gr) =	126.90	$V_m$ (cm <sup>3</sup> ) =	86.15	$V_a$ (cm <sup>3</sup> ) =	32.01	$A_{sup}$ (cm <sup>2</sup> ) =	44.18
	$W_s$ (gr) =	105.10	$V_s$ (cm <sup>3</sup> ) =	32.34	$H_0$ (cm) =	1.95	$e_0$ =	1.66
	$W_w$ (gr) =	21.80	$V_w$ (cm <sup>3</sup> ) =	21.80	$H_s$ (cm) =	0.73	$Sw_0$ (%) =	40.51

Etapa	Presion Aplicada	Sw %	Tiempo min	Lectura		$\Delta H$ mm	$e_f$	$\epsilon$ exp %
	Kpa			0.001 in	$\Delta$ Lectura mm			
Sw inicial	0.00	56.48	0.01	1000.000	0.000	19.5	1.664	0.000
Sw inicial	31.78	56.48	1440.00	990.000	0.254	19.246	1.629	1.303
Incremento Sw 1	31.78	60.00	2880.00	958.000	0.813	18.433	1.518	5.471
Incremento Sw 2	31.78	80.00	4320.00	953.000	0.127	18.306	1.501	6.122
Incremento Sw 3	31.78	100.00	5760.00	952.000	0.025	18.281	1.497	6.252
Descarga	31.78	100.00	7200.00	965.000	-0.330	18.611	1.542	4.559

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**

**Tabla 71.** Ensaye edométricos sujeto a una carga de 63.57 kPa (suelo mezclado con sodio).

Muestra 2 Na				$\sigma_n$ (Kpa) =		63.57		
Datos	$W_m$ (gr) =	126.90	$V_m$ (cm <sup>3</sup> ) =	86.15	$V_a$ (cm <sup>3</sup> ) =	32.01	$A_{sup}$ (cm <sup>2</sup> ) =	44.18
	$W_s$ (gr) =	105.10	$V_s$ (cm <sup>3</sup> ) =	32.34	$H_0$ (cm) =	1.95	$e_0$ =	1.66
	$W_w$ (gr) =	21.80	$V_w$ (cm <sup>3</sup> ) =	21.80	$H_s$ (cm) =	0.73	$Sw_0$ (%) =	40.51

Etapa	Presion Aplicada	Sw	Tiempo	Lectura				
	Kpa	%	min	0.01 mm	$\Delta$ Lectura mm	$\Delta H$ mm	$e_f$	$\epsilon$ %
Sw inicial	0.00	58.01	0.01	2000.000	0.000	19.5	1.664	0.00
Sw inicial	63.57	58.01	1440.00	1941.000	0.590	18.910	1.583	3.03
Incremento Sw 1	63.57	60.00	2880.00	1888.000	0.530	18.380	1.511	5.74
Incremento Sw 2	63.57	80.00	4320.00	1861.000	0.270	18.110	1.474	7.13
Incremento Sw 3	63.57	100.00	5760.00	1853.000	0.080	18.030	1.463	7.54
Descarga	63.57	100.00	7200.00	1855.000	-0.020	18.050	1.466	7.44

**Tabla 72.** Ensaye edométricos sujeto a una carga de 95.35 kPa (suelo mezclado con sodio).

Muestra 3 Na				$\sigma_n$ (Kpa) =		95.35		
Datos	$W_m$ (gr) =	123.90	$V_m$ (cm <sup>3</sup> ) =	84.93	$V_a$ (cm <sup>3</sup> ) =	32.77	$A_{sup}$ (cm <sup>2</sup> ) =	44.12
	$W_s$ (gr) =	103.62	$V_s$ (cm <sup>3</sup> ) =	31.88	$H_0$ (cm) =	1.93	$e_0$ =	1.66
	$W_w$ (gr) =	20.28	$V_w$ (cm <sup>3</sup> ) =	20.28	$H_s$ (cm) =	0.72	$Sw_0$ (%) =	38.23

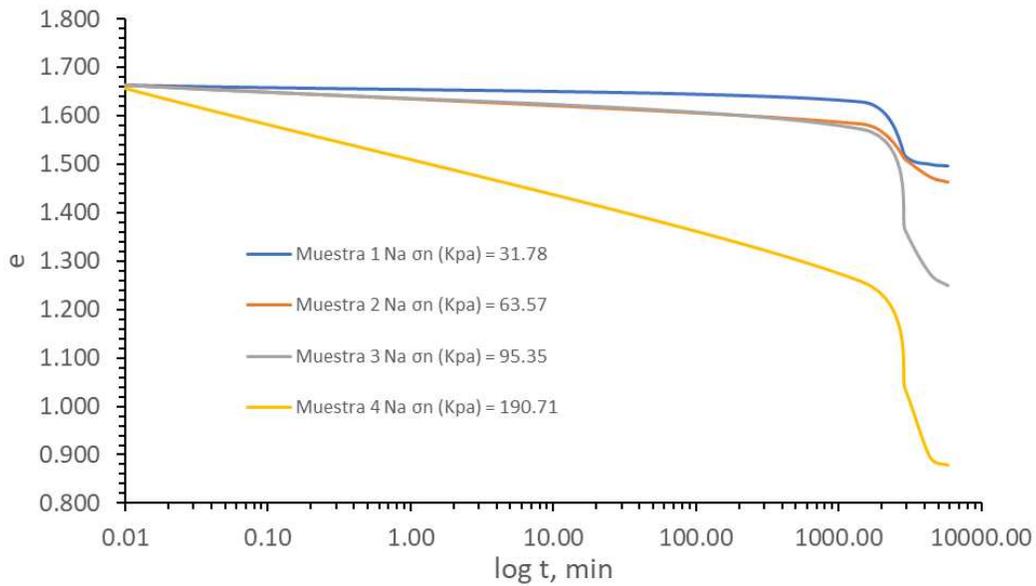
Etapa	Presion Aplicada	Sw	Tiempo	Lectura				
	Kpa	%	min	0.001 in	$\Delta$ Lectura mm	$\Delta H$ mm	$e_f$	$\epsilon$ %
Sw inicial	0.00	52.87	0.01	1000.000	0.000	19.25	1.664	0.00
Sw inicial	95.35	52.87	1440.00	974.000	0.660	18.590	1.572	3.43
Incremento Sw 1	95.35	60.00	2880.00	915.000	1.499	17.091	1.365	11.22
Incremento Sw 2	95.35	80.00	4320.00	889.000	0.660	16.431	1.274	14.65
Incremento Sw 3	95.35	100.00	5760.00	882.000	0.178	16.253	1.249	15.57
Descarga	95.35	100.00	7200.00	905.000	-0.584	16.837	1.330	12.54

**Tabla 73.** Ensaye edométricos sujeto a una carga de 190.71 kPa (suelo mezclado con sodio).

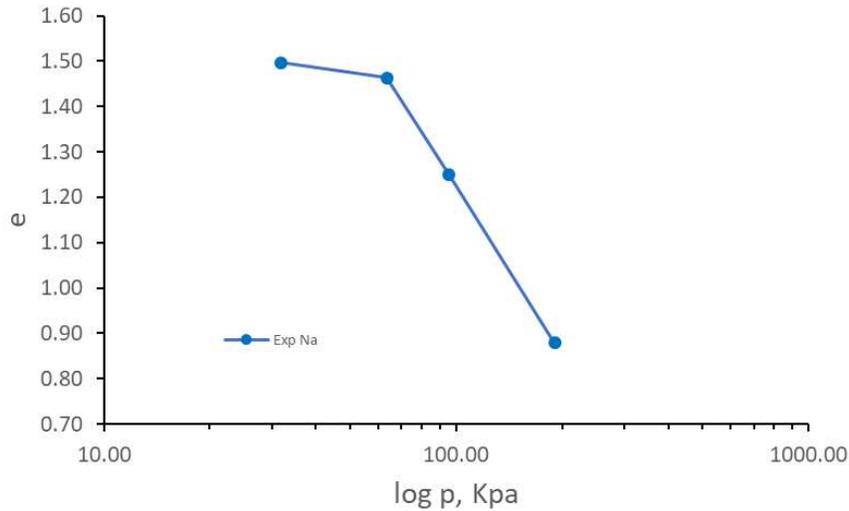
Muestra 4 Na				$\sigma_n$ (Kpa) = 190.71				
Datos	$W_m$ (gr) =	138.80	$V_m$ (cm <sup>3</sup> ) =	92.18	$V_a$ (cm <sup>3</sup> ) =	31.45	$A_{sup}$ (cm <sup>2</sup> ) =	46.20
	$W_s$ (gr) =	112.77	$V_s$ (cm <sup>3</sup> ) =	34.70	$H_0$ (cm) =	2.00	$e_0$ =	1.66
	$W_w$ (gr) =	26.03	$V_w$ (cm <sup>3</sup> ) =	26.03	$H_s$ (cm) =	0.75	$Sw_o$ (%) =	45.28

Etapa	Presion Aplicada	Sw %	Tiempo min	Lectura				
	Kpa			0.001 in	$\Delta$ Lectura mm	$\Delta H$ mm	$e_f$	$\epsilon$ %
Sw inicial	0.00	58.01	0.01	900.000	0.000	19.95	1.656	0.00
Sw inicial	190.71	58.01	1440.00	782.000	2.997	16.953	1.257	15.02
Incremento Sw 1	190.71	60.00	2880.00	717.000	1.651	15.302	1.038	23.30
Incremento Sw 2	190.71	80.00	4320.00	675.000	1.067	14.235	0.895	28.65
Incremento Sw 3	190.71	100.00	5760.00	670.000	0.127	14.108	0.879	29.28
Descarga	190.71	100.00	7200.00	688.000	-0.457	14.565	0.939	26.99



**Figura 107.** Curvas de consolidación del suelo mezclado con cloruro de sodio,



**Figura 108.** Curvas de compresibilidad del suelo mezclado con cloruro de sodio a grado de saturación del 100%

**Tabla 74.** Pendientes  $\kappa$  y  $\lambda$  de ensayos edométricos de suelo mezclado con cloruro de sodio.

	$\kappa$	$\lambda$
Réplica con Na	0.114	1.224

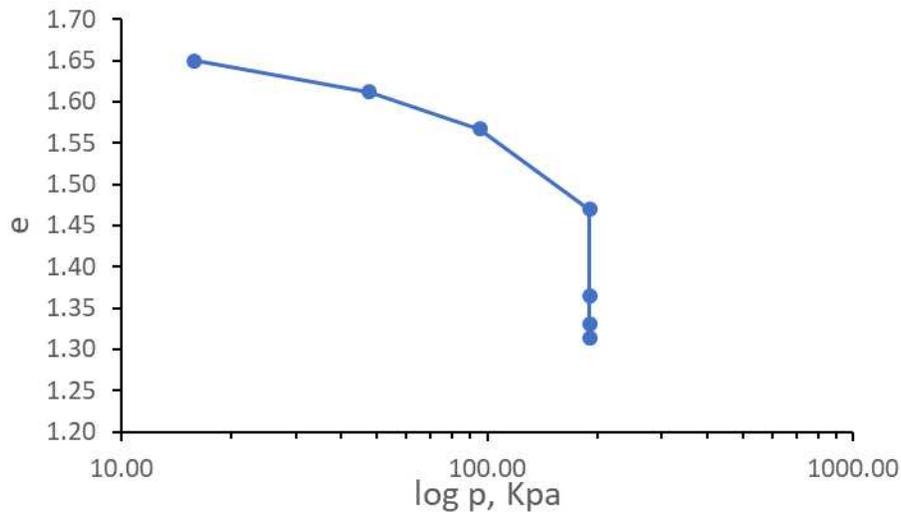
### D.1 Evaluación de potencial de colapso CP

**Tabla 75.** Potencial de colapso.

Muestra 1							$\sigma_n$ (Kpa) =	190.71
Datos	$W_m$ (gr) =	134.00	$V_m$ (cm <sup>3</sup> ) =	86.15	$V_a$ (cm <sup>3</sup> ) =	24.91	$A_{sup}$ (cm <sup>2</sup> ) =	44.18
	$W_s$ (gr) =	105.10	$V_s$ (cm <sup>3</sup> ) =	32.34	$H_0$ (cm) =	1.95	$e_0$ =	1.66
	$W_w$ (gr) =	28.90	$V_w$ (cm <sup>3</sup> ) =	28.90	$H_s$ (cm) =	0.73	$Sw_0$ (%) =	53.71

Etapa	Presion Aplicada	Sw %	Tiempo min	Lectura		$\Delta H$ mm	$e_f$	$\epsilon$ %
	Kpa			0.001 in	$\Delta$ Lectura mm			
Sw inicial	0.00	53.71	0.01	1000.000	0.000	19.5	1.664	0.00
Sw inicial	15.89	53.71	60.00	996.000	0.102	19.398	1.650	0.52
Sw inicial	47.68	53.71	120.00	985.000	0.279	19.119	1.612	1.95
Sw inicial	95.35	53.71	180.00	972.000	0.330	18.789	1.567	3.65
Sw inicial	190.71	53.71	1620.00	944.000	0.711	18.078	1.470	7.29
Incremento Sw 1	190.71	60.00	3060.00	914.000	0.762	17.316	1.366	11.20
Incremento Sw 2	190.71	80.00	4500.00	904.000	0.254	17.062	1.331	12.50
Incremento Sw 3	190.71	100.00	5940.00	899.000	0.127	16.935	1.313	13.16
Descarga	0.00	100.00	7380.00	952.000	-1.346	18.281	1.497	6.25



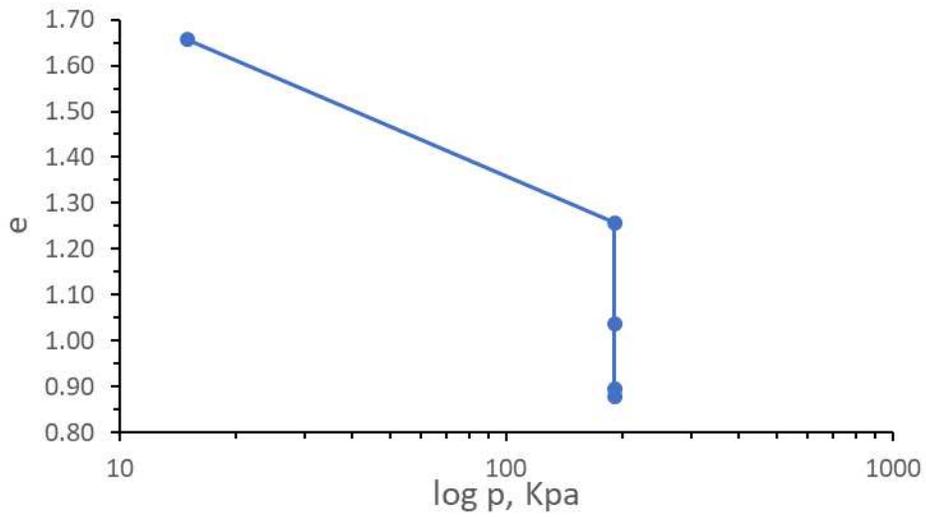
**Figura 109.** Curva de consolidación para evaluar el potencial de colapso del suelo en condiciones naturales.

**Tabla 76.** Potencial de colapso en suelo mezclado con sodio.

Muestra 1 Na						$\sigma_n$ (Kpa) =	190.71	
Datos	$W_m$ (gr) =	138.80	$V_m$ (cm <sup>3</sup> ) =	92.18	$V_a$ (cm <sup>3</sup> ) =	31.45	$A_{sup}$ (cm <sup>2</sup> ) =	46.20
	$W_s$ (gr) =	112.77	$V_s$ (cm <sup>3</sup> ) =	34.70	$H_0$ (cm) =	2.00	$e_0$ =	1.66
	$W_w$ (gr) =	26.03	$V_w$ (cm <sup>3</sup> ) =	26.03	$H_s$ (cm) =	0.75	$Sw_0$ (%) =	45.28

Etapa	Presion Aplicada	Sw	Tiempo	Lectura	$\Delta$ Lectura	$\Delta H$	$e_f$	$\epsilon$
	Kpa	%	min	0.001 in	mm	mm		%
Sw inicial	0.00	58.01	0.01	900.000	0.000	19.95	1.656	0.00
Sw inicial	190.71	58.01	1440.00	782.000	2.997	16.953	1.257	15.02
Incremento Sw 1	190.71	60.00	2880.00	717.000	1.651	15.302	1.038	23.30
Incremento Sw 2	190.71	80.00	4320.00	675.000	1.067	14.235	0.895	28.65
Incremento Sw 3	190.71	100.00	5760.00	670.000	0.127	14.108	0.879	29.28
Descarga	190.71	100.00	7200.00	688.000	-0.457	14.565	0.939	26.99



**Figura 110.** Curva de consolidación para evaluar el potencial de colapso del suelo mezclado con cloruro de sodio.

**Tabla 77.** Resumen de potencial de colapso.

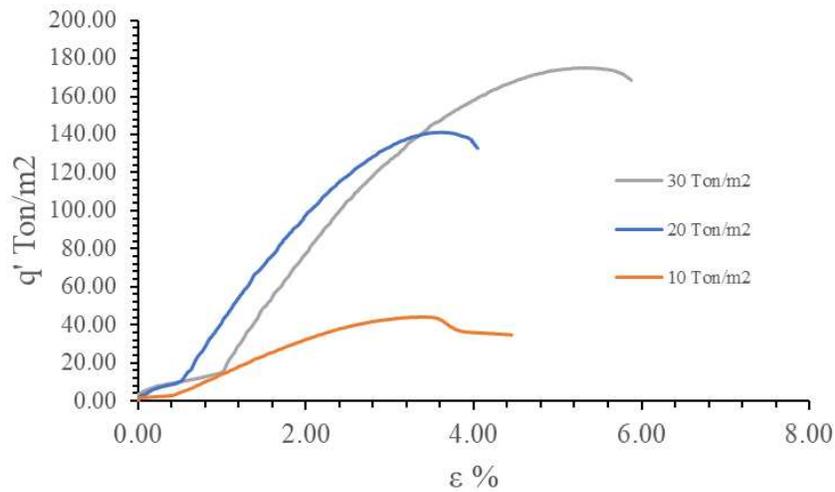
Parámetro	Valor	
	Rep. 1	Rep. Na
$e_0$	1.664	1.656
$e_1$	1.470	1.257
$e_2$	1.313	0.879
CP%	5.89	14.23

**ANEXO E. PRUEBAS TRIAXIALES CD**

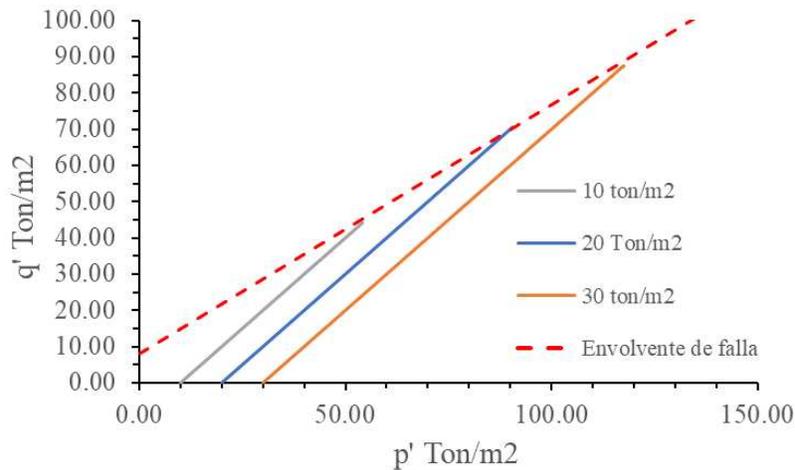
**E.1 Sw = 0%**

**Tabla 78.** Prueba triaxial CD de muestra con Sw = 0% (réplica 1).

Parámetro	Unidad	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
$\sigma_1$	Ton/m <sup>2</sup>	98.24	161.13	205.02
$\sigma_3$	Ton/m <sup>2</sup>	10.00	20.00	30.00
$q'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	44.12	70.57	87.51
$p'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	54.12	90.57	117.51



**Figura 111.** Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 0% (réplica 1).

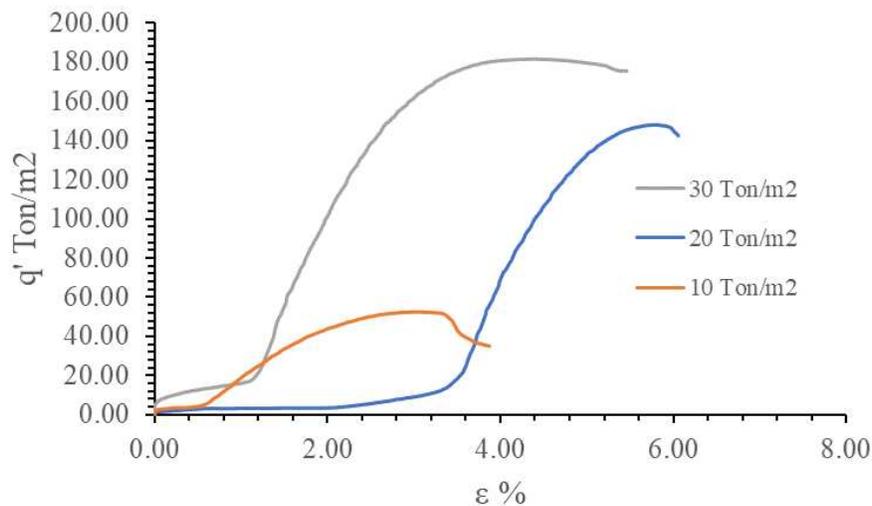


**Figura 112.** Diagrama p'-q' de la muestra a un grado de saturación de 0% (réplica 1).

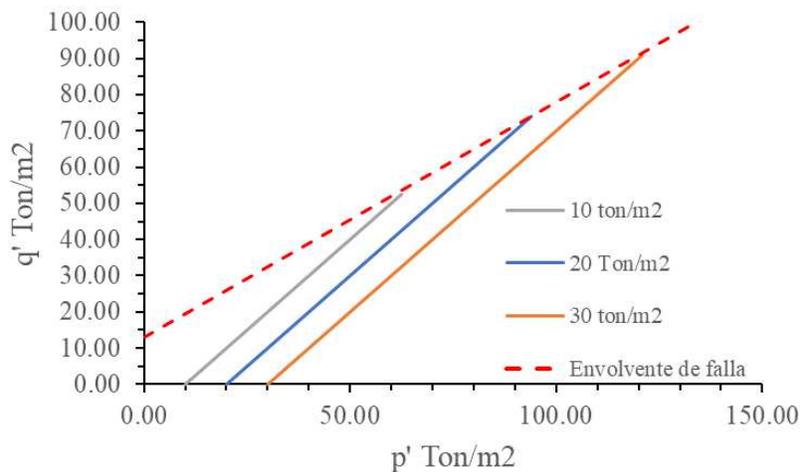
**E.2 Sw = 30%**

**Tabla 79.** Prueba triaxial CD de muestra con Sw = 30% (réplica 1).

Parámetro	Unidad	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
$\sigma_1$	Ton/m <sup>2</sup>	114.88	167.96	211.62
$\sigma_3$	Ton/m <sup>2</sup>	10.00	20.00	30.00
$q'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	52.44	73.98	90.81
$p'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	62.44	93.98	120.81



**Figura 113.** Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 30% (réplica 1).

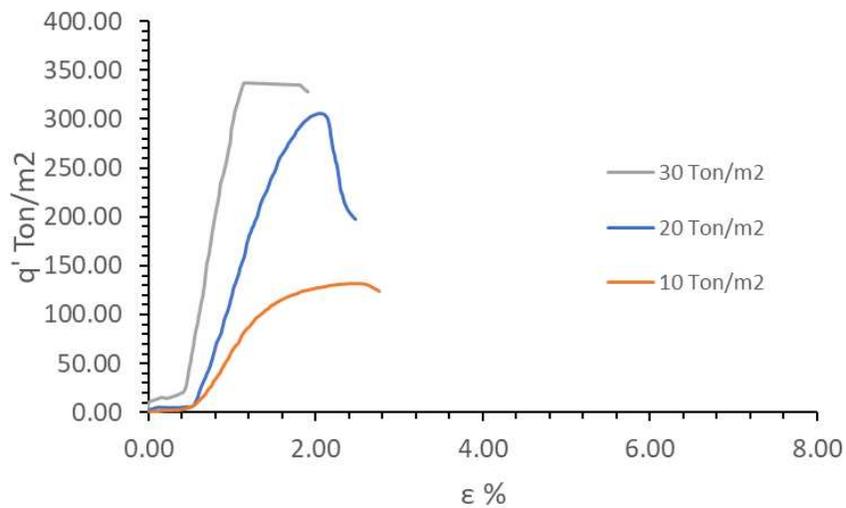


**Figura 114.** Diagrama p'-q' de la muestra a un grado de saturación de 30% (réplica 1).

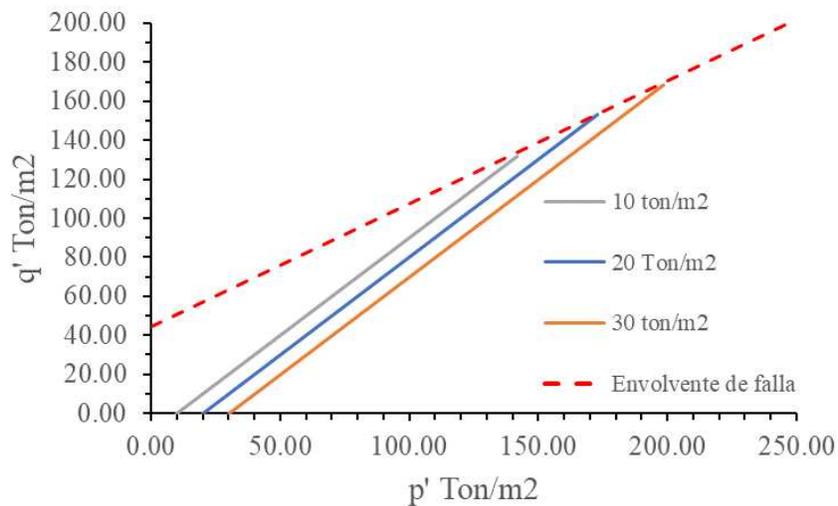
**E.3 Sw = 50%**

**Tabla 80.** Prueba triaxial CD de muestra con Sw = 50% (réplica 1).

Parámetro	Unidad	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
$\sigma_1$	Ton/m <sup>2</sup>	273.69	326.04	366.67
$\sigma_3$	Ton/m <sup>2</sup>	10.00	20.00	30.00
$q'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	131.85	153.02	168.34
$p'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	141.85	173.02	198.34



**Figura 115.** Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 50% (réplica 1).

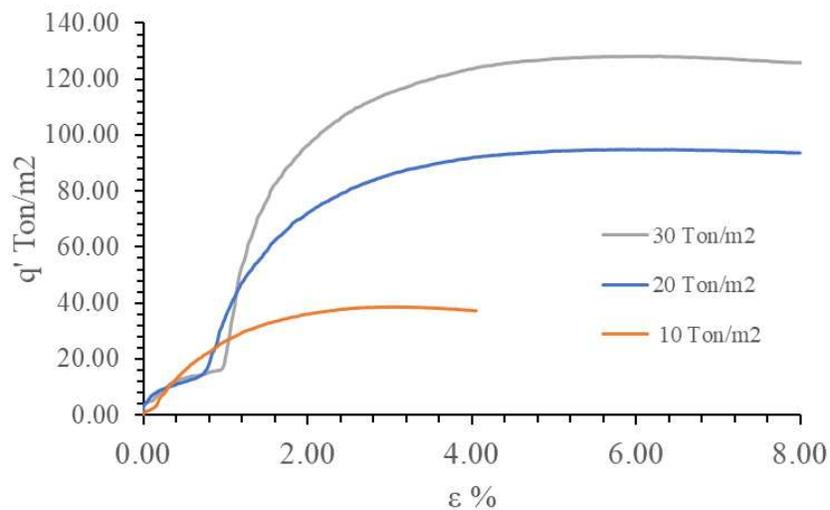


**Figura 116.** Diagrama  $p'$ - $q'$  de la muestra a un grado de saturación de 50% (réplica 1).

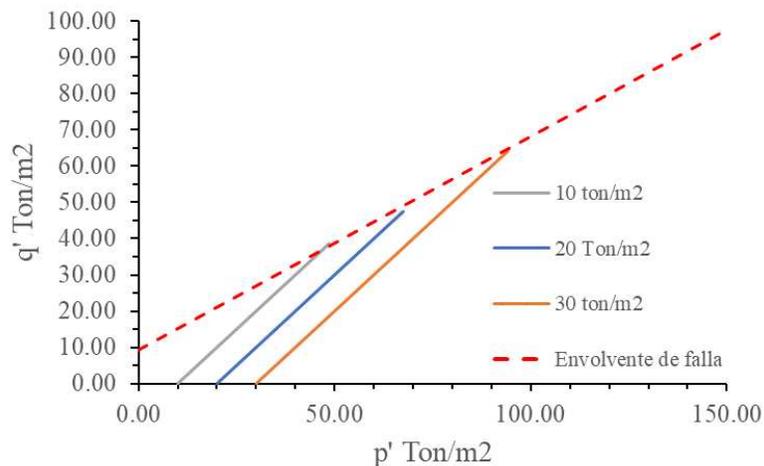
**E.4 Sw = 65%**

**Tabla 81.** Prueba triaxial CD de muestra con Sw = 65% (réplica 1).

Parámetro	Unidad	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
$\sigma_1$	Ton/m <sup>2</sup>	87.26	114.90	158.24
$\sigma_3$	Ton/m <sup>2</sup>	10.00	20.00	30.00
$q'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	38.63	47.45	64.06
$p'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	48.63	67.45	94.06



**Figura 117.** Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 65% (réplica 1).

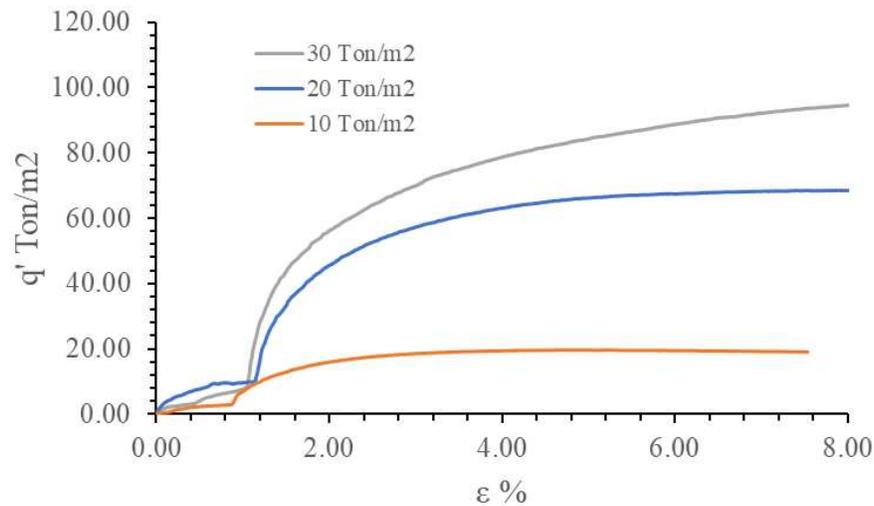


**Figura 118.** Diagrama  $p'$ - $q'$  de la muestra a un grado de saturación de 65% (réplica 1).

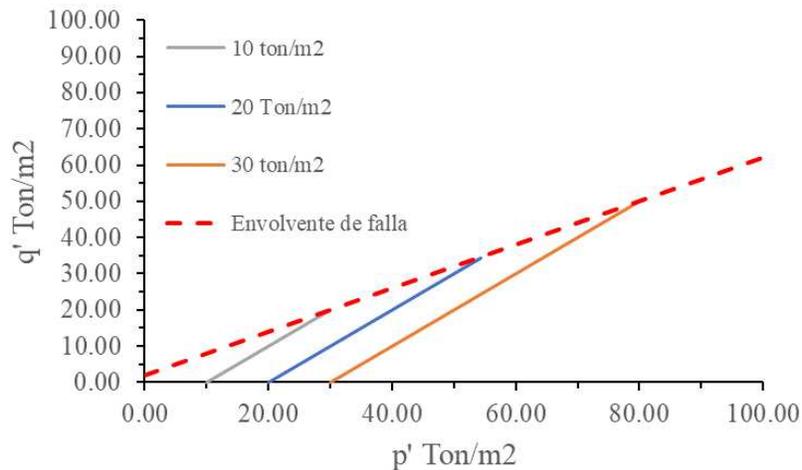
**E.5 Sw = 80%**

**Tabla 82.** Prueba triaxial CD de muestra con Sw = 80% (réplica 1).

Parámetro	Unidad	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
$\sigma_1$	Ton/m <sup>2</sup>	49.25	88.63	129.51
$\sigma_3$	Ton/m <sup>2</sup>	10.00	20.00	30.00
$q'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	19.62	33.82	44.37
$p'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	29.62	53.82	74.37



**Figura 119.** Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 80% (réplica 1).

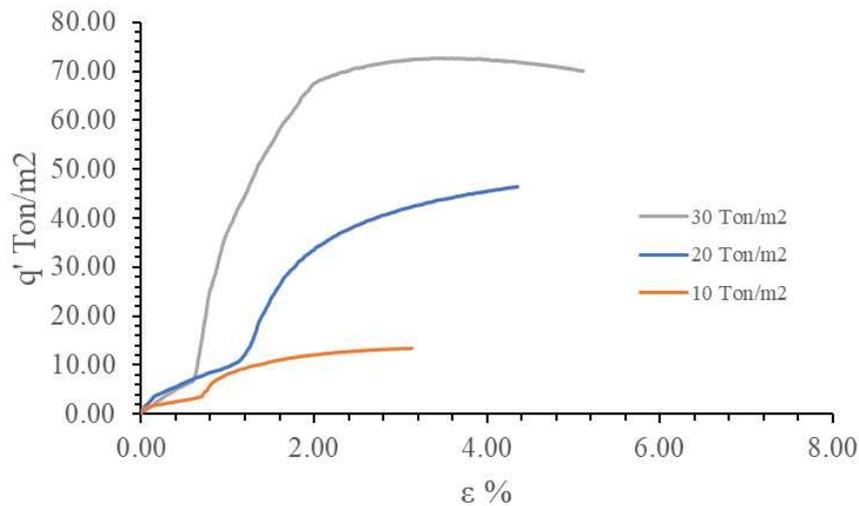


**Figura 120.** Diagrama  $p'$ - $q'$  de la muestra a un grado de saturación de 80% (réplica 1).

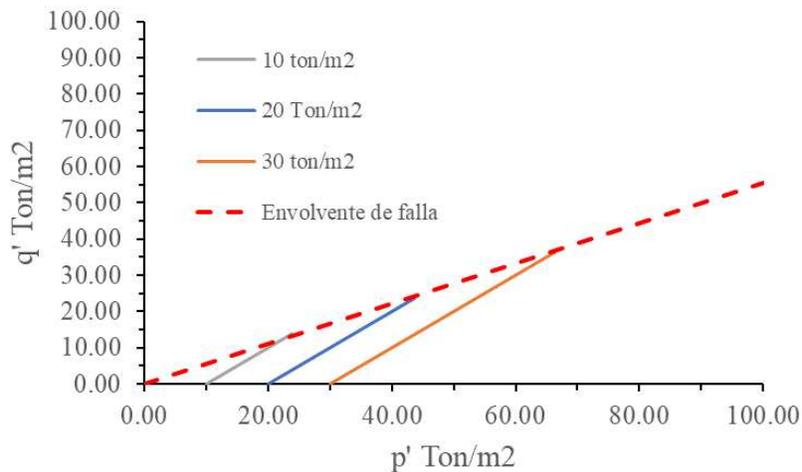
**E.6 Sw = 100%**

**Tabla 83.** Prueba triaxial CD de muestra con Sw = 100% (réplica 1).

Parámetro	Unidad	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
$\sigma_1$	Ton/m <sup>2</sup>	37.64	67.21	102.70
$\sigma_3$	Ton/m <sup>2</sup>	10.00	20.00	30.00
$q'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	13.82	23.61	36.35
$p'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	23.82	43.61	66.35



**Figura 121.** Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 100% (réplica 1).

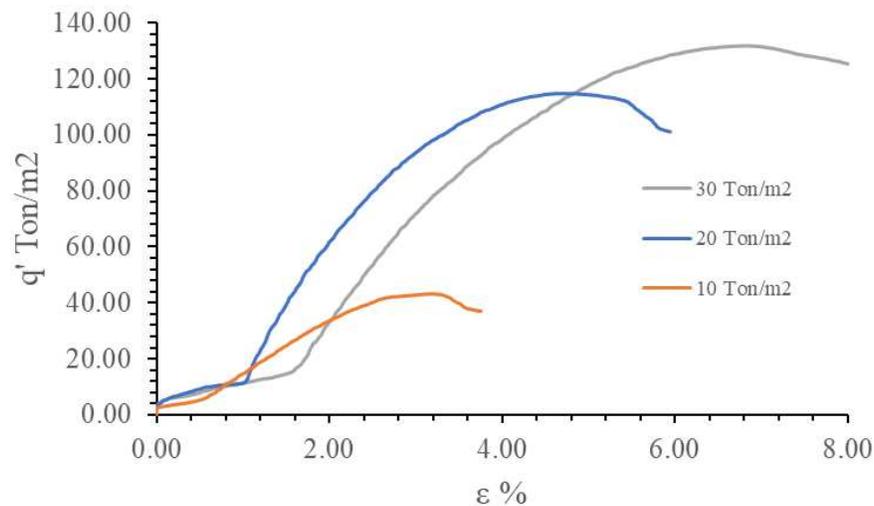


**Figura 122.** Diagrama p'-q' de la muestra a un grado de saturación de 100% (réplica 1).

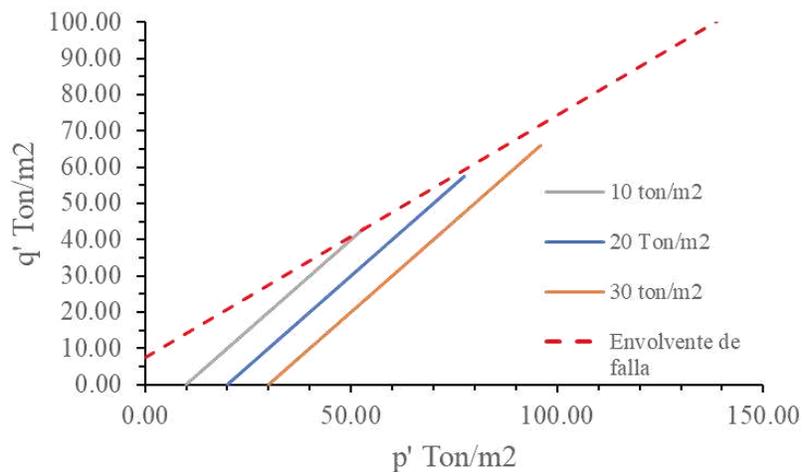
**E.7Sw = 0%**

**Tabla 84.** Prueba triaxial CD de muestra con Sw = 0% (réplica 2).

Parámetro	Unidad	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
$\sigma_1$	Ton/m <sup>2</sup>	96.37	134.82	161.88
$\sigma_3$	Ton/m <sup>2</sup>	10.00	20.00	30.00
$q'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	43.19	57.41	64.91
$p'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	53.19	77.41	94.91



**Figura 123.** Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 0% (réplica 2).

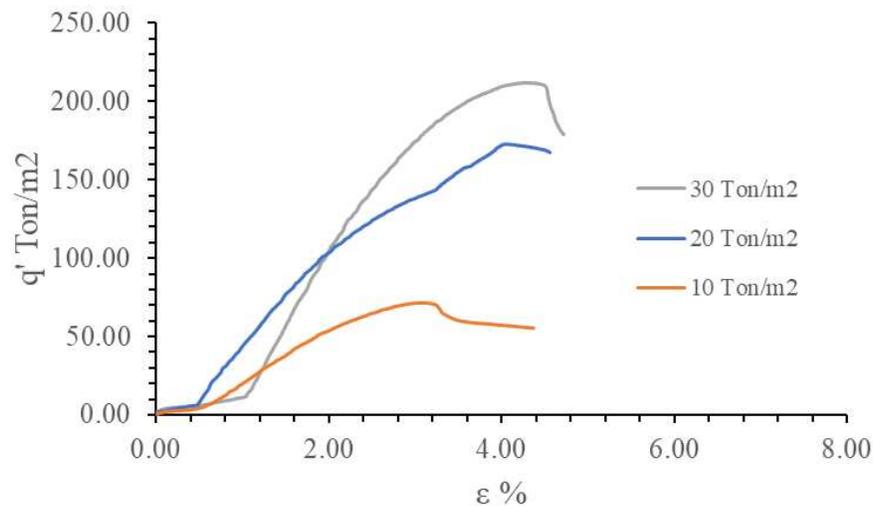


**Figura 124.** Diagrama  $p'$ - $q'$  de la muestra a un grado de saturación de 0% (réplica 2).

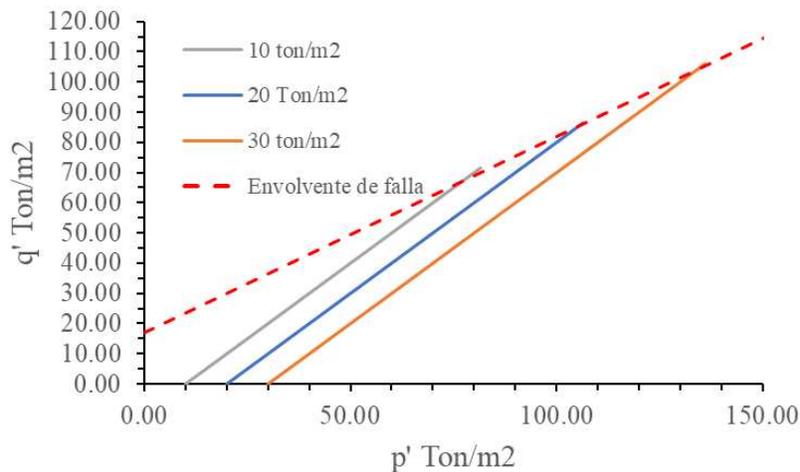
**E.8 Sw = 30%**

**Tabla 85.** Prueba triaxial CD de muestra con Sw = 30% (réplica 2).

Parámetro	Unidad	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
$\sigma_1$	Ton/m <sup>2</sup>	153.06	192.79	241.94
$\sigma_3$	Ton/m <sup>2</sup>	10.00	20.00	30.00
$q'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	71.53	86.39	105.97
$p'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	81.53	106.39	135.97



**Figura 125.** Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 30% (réplica 2).

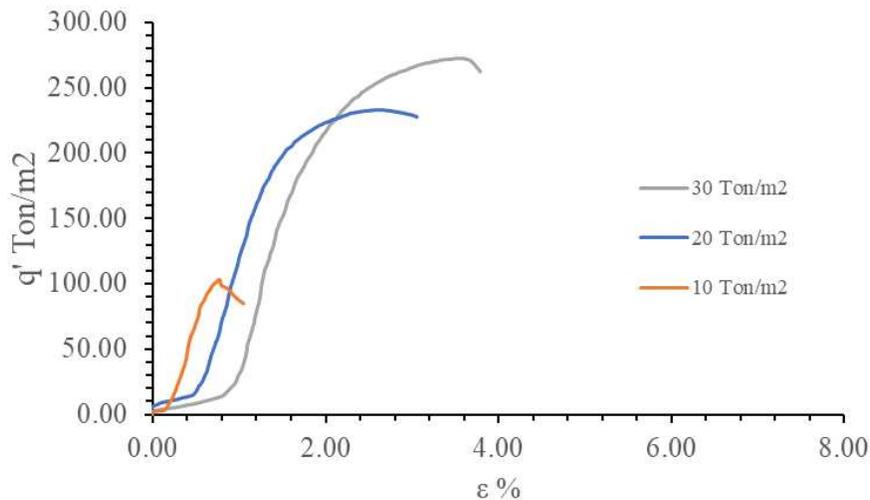


**Figura 126.** Diagrama p'-q' de la muestra a un grado de saturación de 30% (réplica 2).

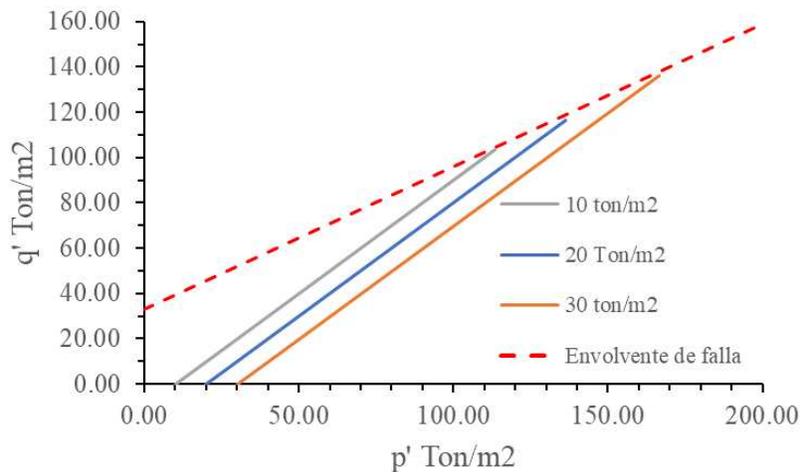
**E.9 Sw = 55%**

**Tabla 86.** Prueba triaxial CD de muestra con Sw = 55% (réplica 2).

Parámetro	Unidad	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
$\sigma_1$	Ton/m <sup>2</sup>	217.04	252.76	302.73
$\sigma_3$	Ton/m <sup>2</sup>	10.00	20.00	30.00
$q'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	103.52	116.38	136.36
$p'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	113.52	136.38	166.36



**Figura 127.** Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 55% (réplica 2).

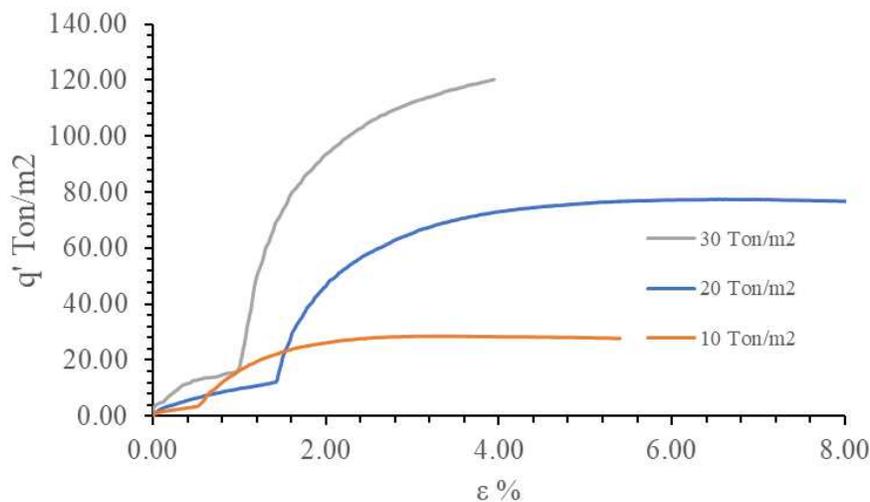


**Figura 128.** Diagrama p'-q' de la muestra a un grado de saturación de 55% (réplica 2).

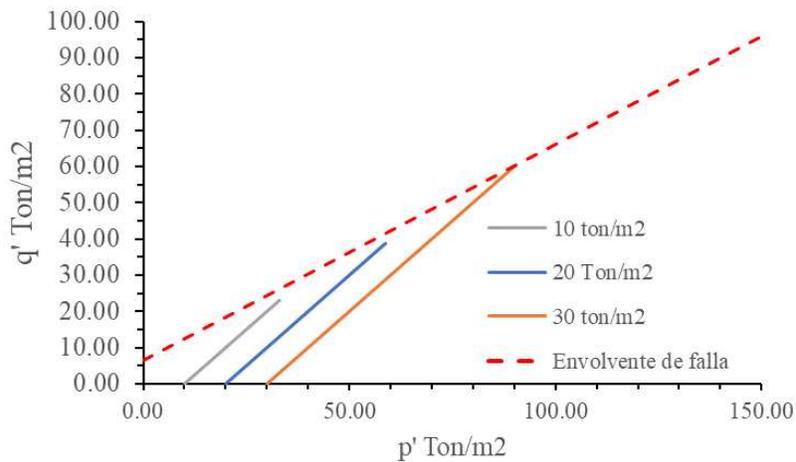
**E.10 Sw = 68%**

**Tabla 87.** Prueba triaxial CD de muestra con Sw = 68% (réplica 2).

Parámetro	Unidad	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
$\sigma_1$	Ton/m <sup>2</sup>	67.15	97.49	155.38
$\sigma_3$	Ton/m <sup>2</sup>	10.00	20.00	30.00
$q'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	28.57	38.67	62.64
$p'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	38.57	58.67	92.64



**Figura 129.** Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 68% (réplica 2).

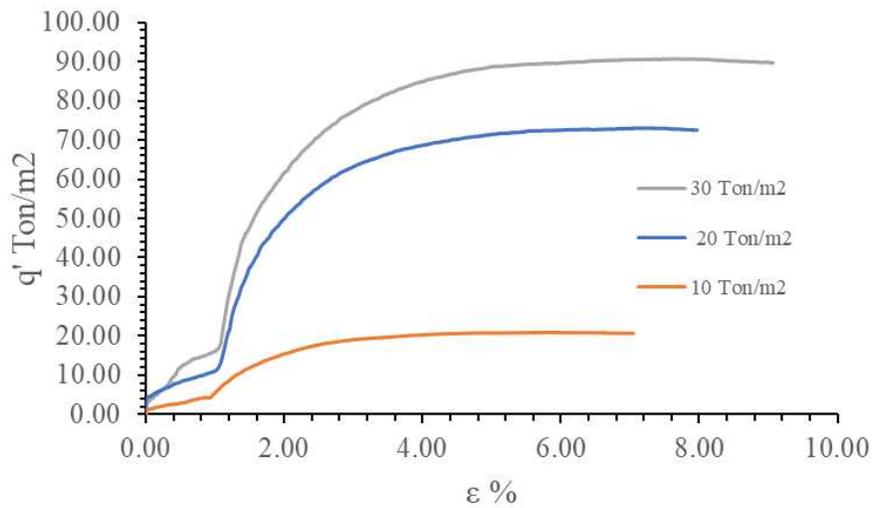


**Figura 130.** Diagrama p'-q' de la muestra a un grado de saturación de 68% (réplica 2).

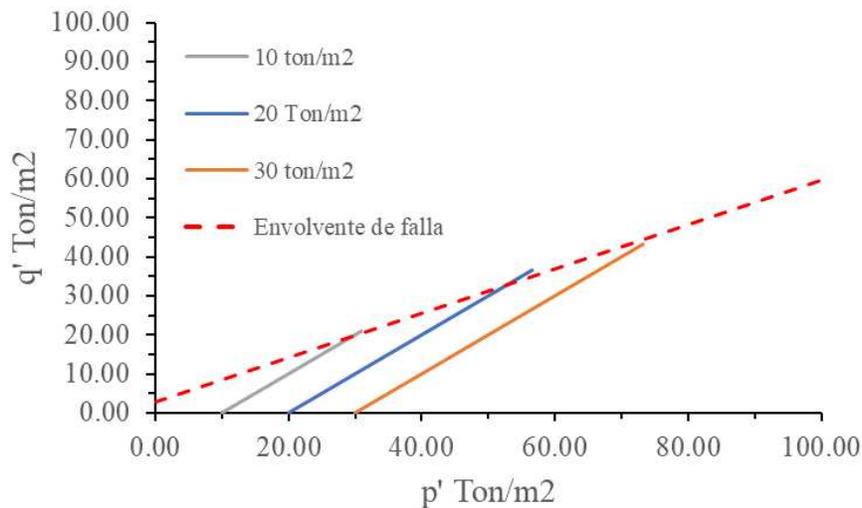
**E.11 Sw = 84%**

**Tabla 88.** Prueba triaxial CD de muestra con Sw = 84% (réplica 2).

Parámetro	Unidad	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
$\sigma_1$	Ton/m <sup>2</sup>	51.86	93.11	120.76
$\sigma_3$	Ton/m <sup>2</sup>	10.00	20.00	30.00
$q'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	20.93	36.26	45.12
$p'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	30.93	56.26	75.12



**Figura 131.** Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 84% (réplica 2).

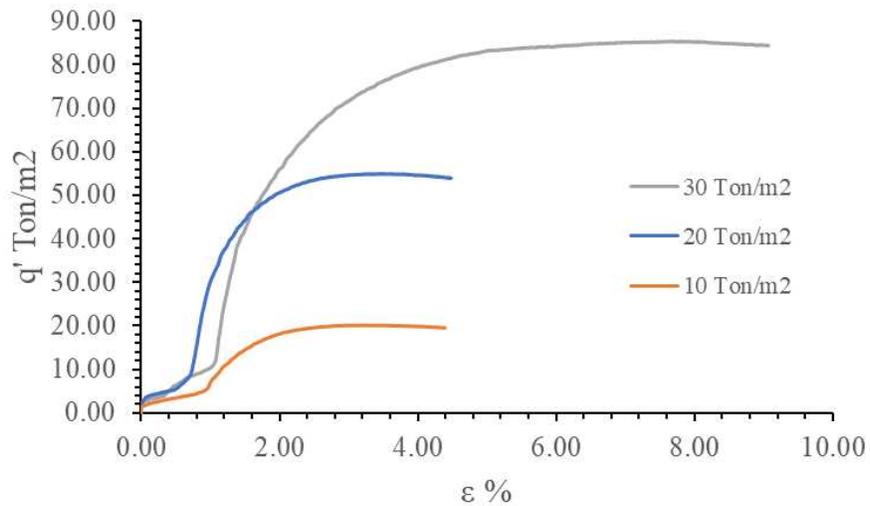


**Figura 132.** Diagrama  $p'$ - $q'$  de la muestra a un grado de saturación de 84% (réplica 2).

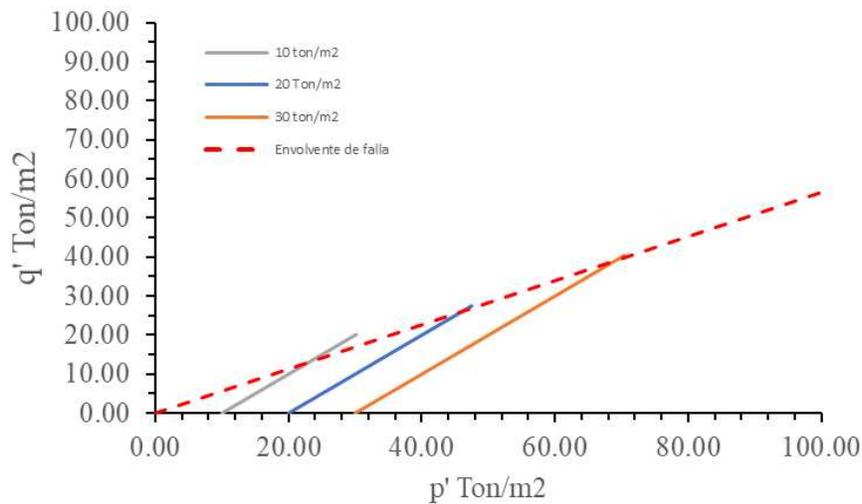
**E.12 Sw = 100%**

**Tabla 89.** Prueba triaxial CD de muestra con Sw = 100% (réplica 2).

Parámetro	Unidad	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
$\sigma_1$	Ton/m <sup>2</sup>	50.32	74.95	115.38
$\sigma_3$	Ton/m <sup>2</sup>	10.00	20.00	30.00
$q'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	20.16	27.48	42.39
$p'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	30.16	47.48	72.39



**Figura 133.** Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 100% (réplica 2).

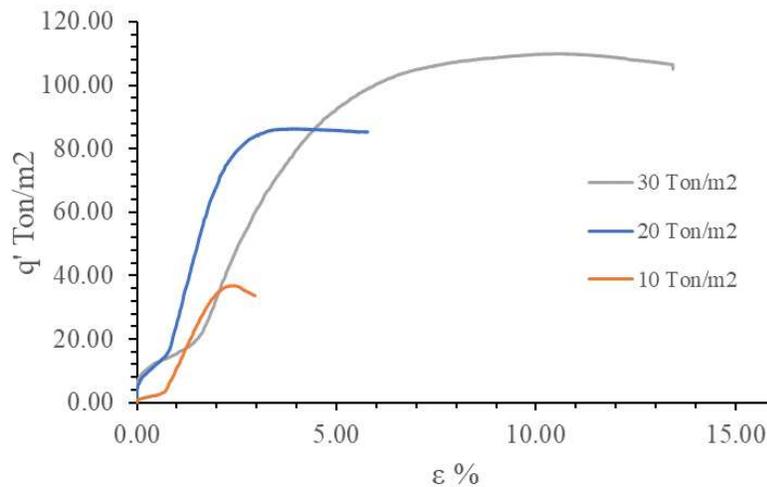


**Figura 134.** Diagrama p'-q' de la muestra a un grado de saturación de 100% (réplica 2).

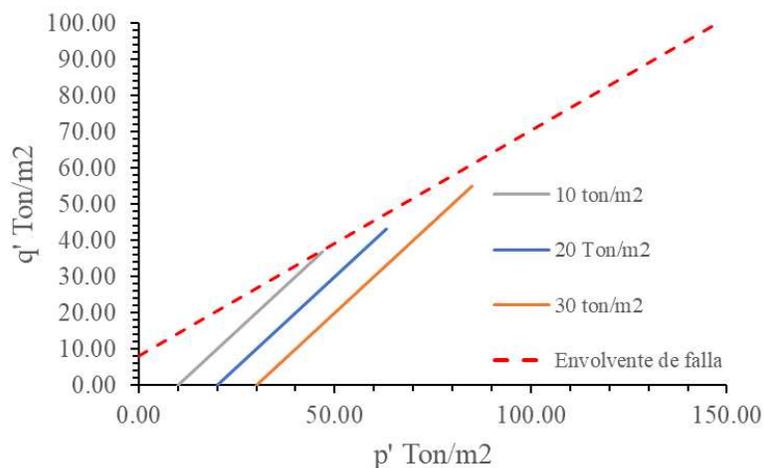
**E.13  $S_w = 0\%$  (Suelo mezclado con sodio)**

**Tabla 90.** Prueba triaxial CD de muestra con  $S_w = 0\%$  (suelo mezclado con sodio).

Parámetro	Unidad	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
$\sigma_1$	Ton/m <sup>2</sup>	83.62	106.28	139.98
$\sigma_3$	Ton/m <sup>2</sup>	10.00	20.00	30.00
$q'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	36.81	43.14	50.46
$p'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	46.81	63.14	80.46



**Figura 135.** Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 0% (suelo mezclado con cloruro de sodio).

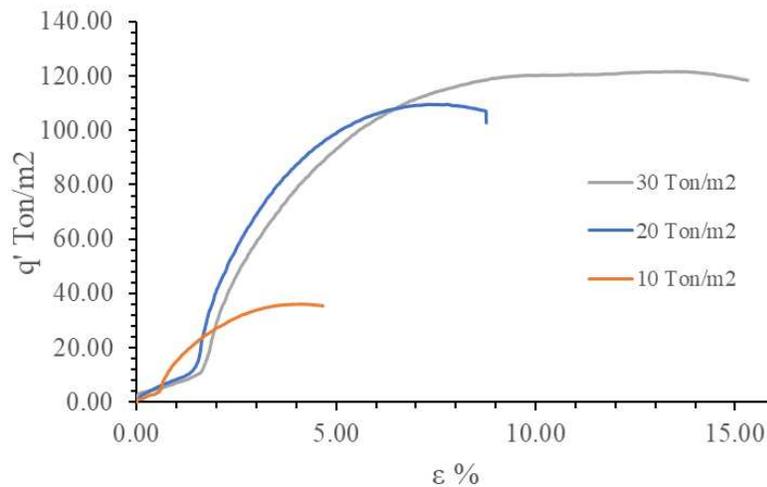


**Figura 136.** Diagrama  $p'$ - $q'$  de la muestra a un grado de saturación de 100% (suelo mezclado con cloruro de sodio).

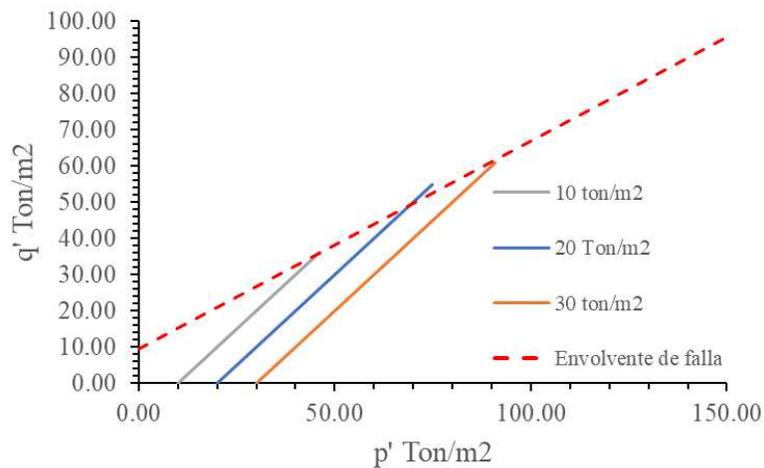
**E.14 Sw = 30% (Suelo mezclado con sodio)**

**Tabla 91.** Prueba triaxial CD de muestra con Sw = 30% (suelo mezclado con sodio).

Parámetro	Unidad	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
$\sigma_1$	Ton/m <sup>2</sup>	82.31	129.66	151.70
$\sigma_3$	Ton/m <sup>2</sup>	10.00	20.00	30.00
$q'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	36.15	54.18	54.65
$p'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	46.15	74.18	84.65



**Figura 137.** Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 30% (suelo mezclado con cloruro de sodio).

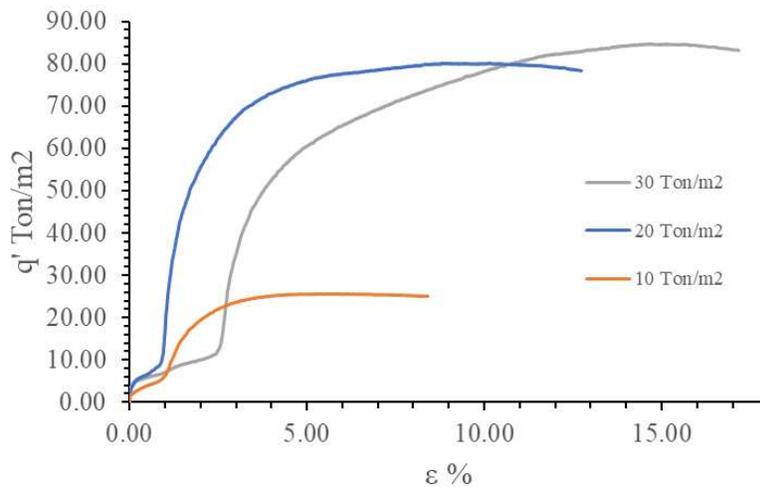


**Figura 138.** Diagrama p'-q' de la muestra a un grado de saturación de 30% (suelo mezclado con cloruro de sodio).

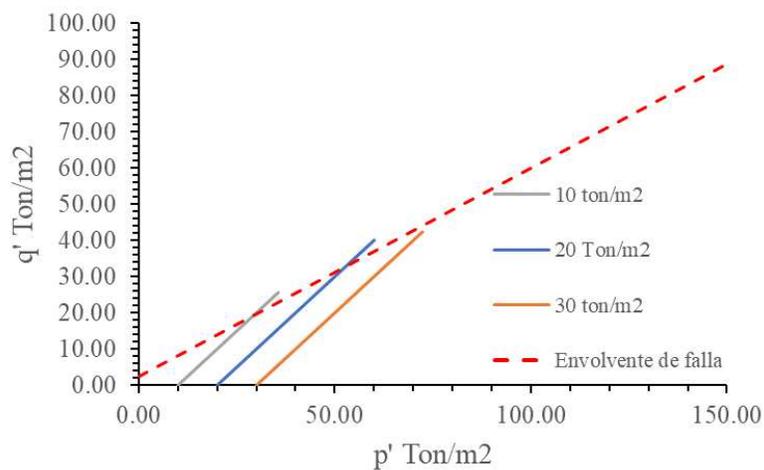
**E.15 Sw = 50% (Suelo mezclado con sodio)**

**Tabla 92.** Prueba triaxial CD de muestra con Sw = 50% (suelo mezclado con sodio).

Parámetro	Unidad	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
$\sigma_1$	Ton/m <sup>2</sup>	61.24	100.15	114.69
$\sigma_3$	Ton/m <sup>2</sup>	10.00	20.00	30.00
$q'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	25.62	38.75	33.92
$p'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	35.62	58.75	63.92



**Figura 139.** Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 50% (suelo mezclado con cloruro de sodio).

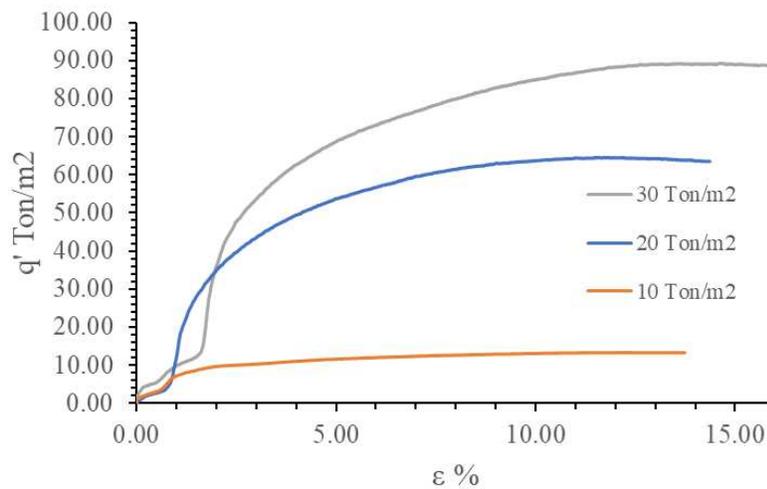


**Figura 140.** Diagrama p'-q' de la muestra a un grado de saturación de 50% (suelo mezclado con cloruro de sodio).

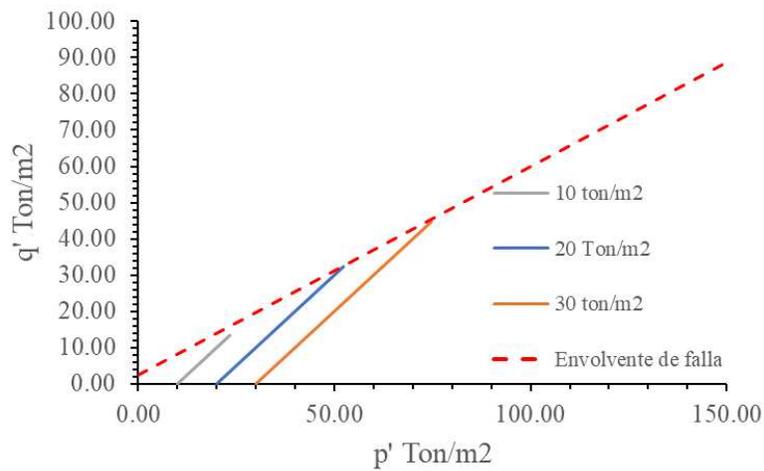
**E.16  $S_w = 67\%$  (Suelo mezclado con sodio)**

**Tabla 93.** Prueba triaxial CD de muestra con  $S_w = 67\%$  (suelo mezclado con sodio).

Parámetro	Unidad	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
$\sigma_1$	Ton/m <sup>2</sup>	36.65	84.59	119.31
$\sigma_3$	Ton/m <sup>2</sup>	10.00	20.00	30.00
$q'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	12.66	28.84	37.61
$p'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	22.66	48.84	67.61



**Figura 141.** Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 67% (suelo mezclado con cloruro de sodio).

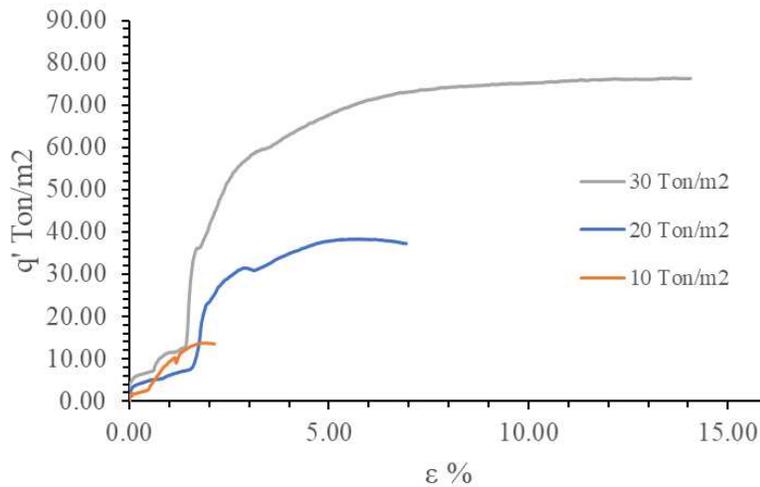


**Figura 142.** Diagrama  $p'$ - $q'$  de la muestra a un grado de saturación de 67% (suelo mezclado con cloruro de sodio).

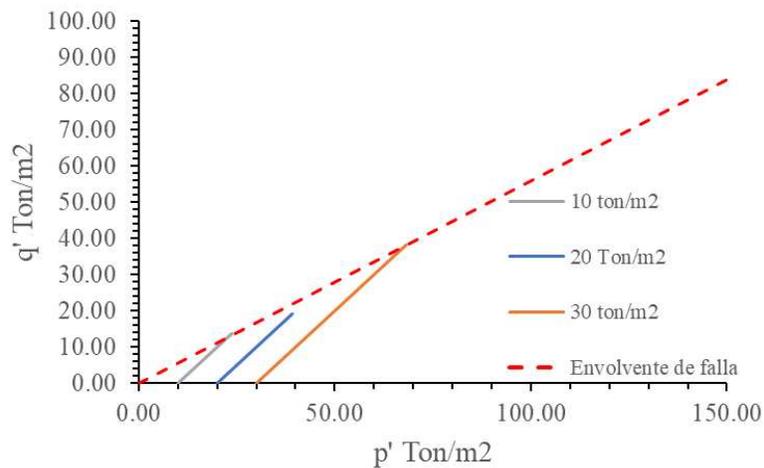
**E.18 Sw = 100% (Suelo mezclado con sodio)**

**Tabla 94.** Prueba triaxial CD de muestra con Sw = 100% (suelo mezclado con sodio).

Parámetro	Unidad	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
$\sigma_1$	Ton/m <sup>2</sup>	37.49	58.34	106.41
$\sigma_3$	Ton/m <sup>2</sup>	10.00	20.00	30.00
$q'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	13.75	19.17	36.02
$p'_{max}$	Ton/m <sup>2</sup>	23.75	39.17	66.02



**Figura 143.** Diagrama esfuerzo – deformación de la muestra a un grado de saturación de 100% (suelo mezclado con cloruro de sodio).



**Figura 144.** Diagrama p'-q' de la muestra a un grado de saturación de 100% (suelo mezclado con cloruro de sodio).

**E.18 Resumen de resultados de pruebas triaxiales CD**

$$c = \frac{d}{\cos\varphi}$$

$$\varphi = \text{Tan}^{-1}\beta$$

Donde:

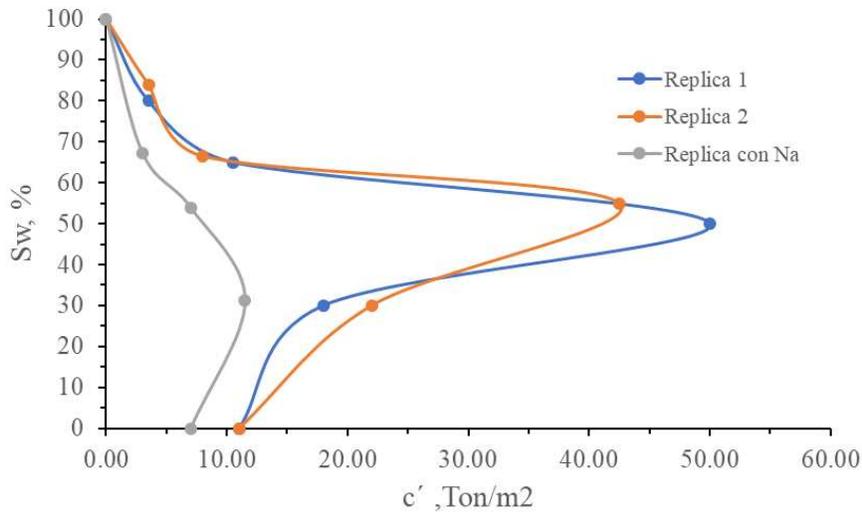
d = valor de la intersección de la envolvente de falla con el eje q'.

β = ángulo de la envolvente de falla en el diagrama p' – q'.

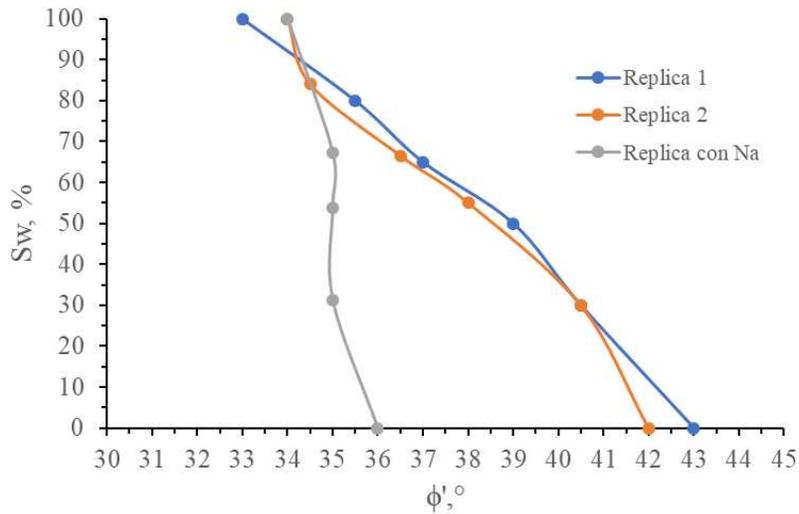
φ = ángulo de fricción.

**Tabla 95.** Cohesión y ángulo de fricción.

<b>Réplica 1</b>			
<b>Sw</b>	<b>Succión</b>	<b>c</b>	<b>φ</b>
<b>%</b>	<b>kpa</b>	<b>Ton/m2</b>	<b>°</b>
100	0.01	0.00	33.00
80	403	3.50	35.50
65	890	10.50	37.00
50	2749	50.00	39.00
30	16971	18.00	40.50
0	208000	11.00	43.00
<b>Réplica 2</b>			
<b>Sw</b>	<b>Succión</b>	<b>c</b>	<b>φ</b>
<b>%</b>	<b>kpa</b>	<b>Ton/m2</b>	<b>°</b>
100	0.01	0.00	34.00
84	290	3.50	34.50
66.5	700	8.00	36.50
55	1850	42.50	38.00
30	16971	22.00	40.50
0	208000	11.00	42.00
<b>Suelo mezclado con sodio</b>			
<b>Sw</b>	<b>Succión</b>	<b>c</b>	<b>φ</b>
<b>%</b>	<b>kpa</b>	<b>Ton/m2</b>	<b>°</b>
100	0.01	0.00	34.00
67	0.04	3.00	35.00
54	1100	7.00	35.00
31	48349	11.50	35.00
0	208000	7.00	36.00



**Figura 145.** Diagrama de cohesión contra grado de saturación.



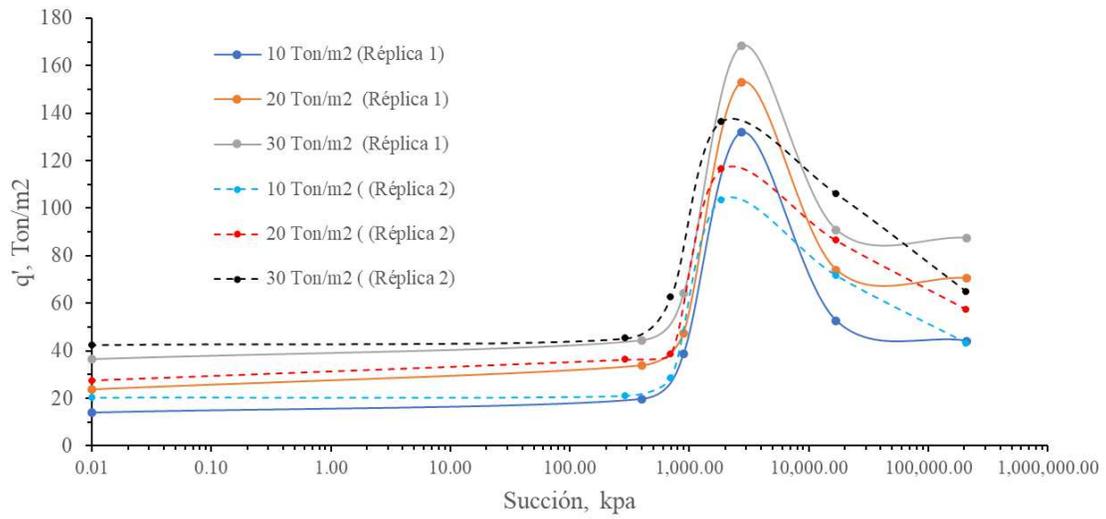
**Figura 146.** Diagrama de ángulo de fricción contra grado de saturación.

Ángulo de fricción de suelo en estado natural en función del grado de saturación:

$$\varphi' = \frac{431.22 - Sw}{9.9225}$$

Ángulo de fricción de suelo mezclado con Cloruro de Sodio en función del grado de saturación:

$$\varphi'_{NaCl} = \frac{1800.50 - S_w}{50}$$



**Figura 147.** Diagrama de esfuerzo desviador contra succión.

ANEXO F. MODELO SÓLIDO POROSO

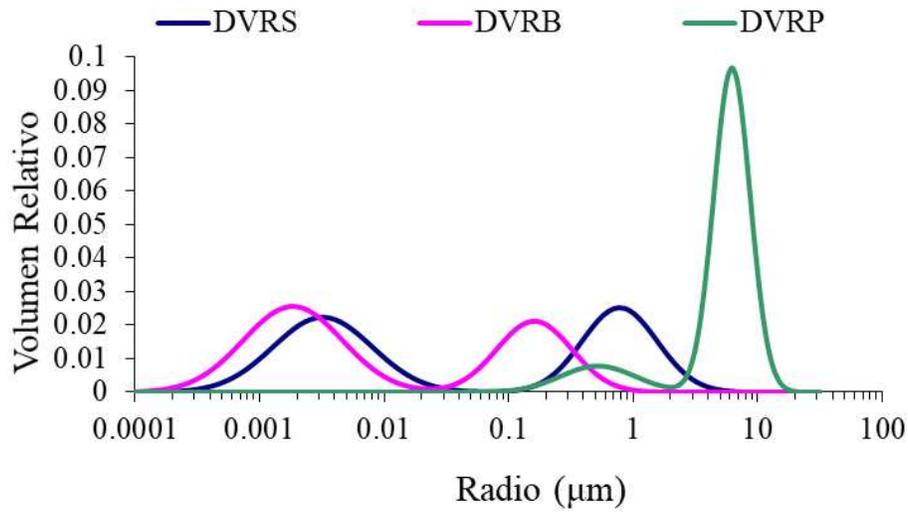


Figura 148. Distribución de tamaño de poro teórica.

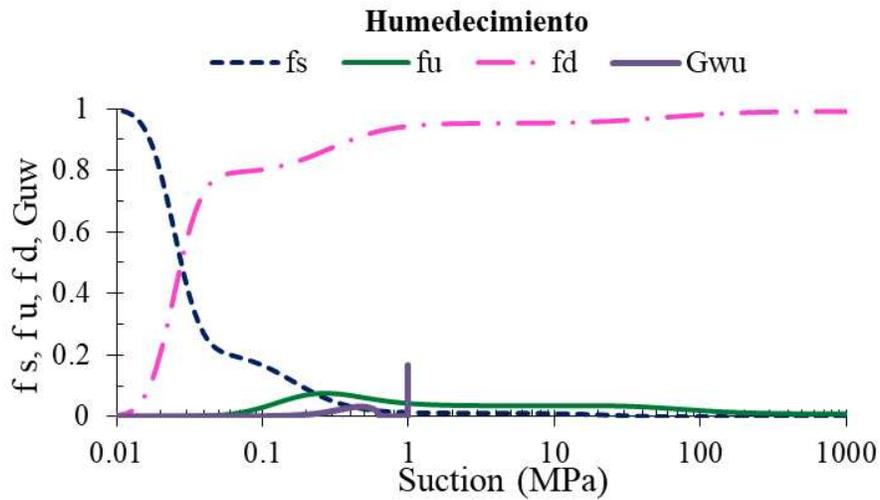
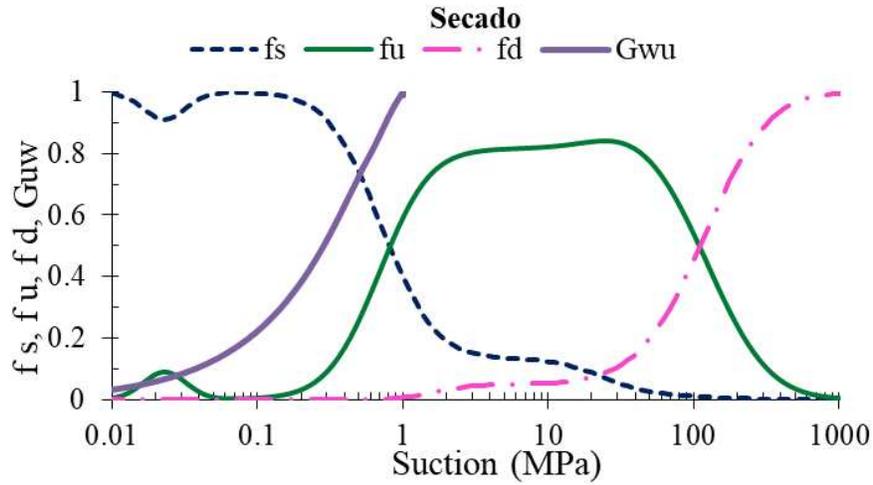
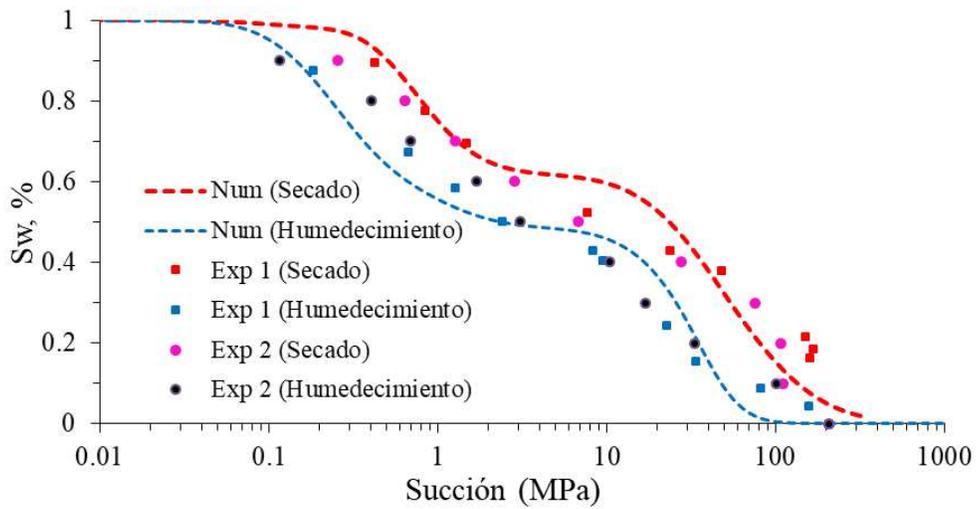


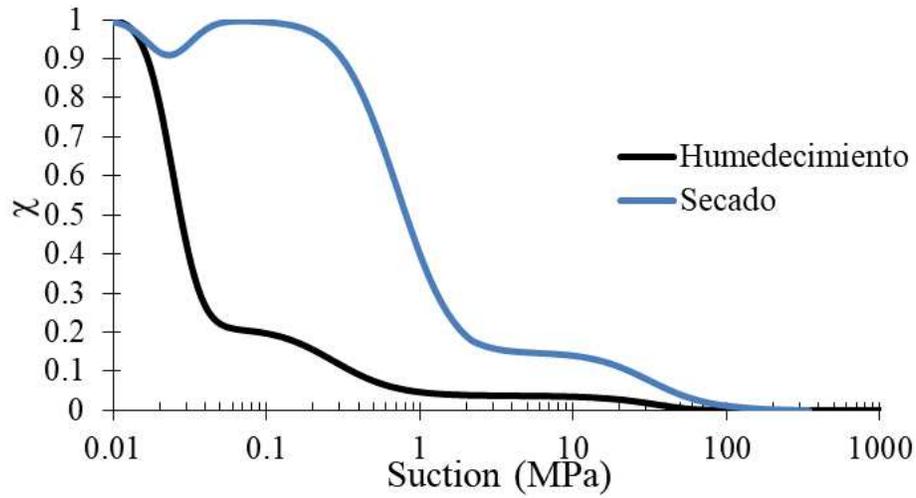
Figura 149. Parámetros  $f_s$ ,  $f_u$ ,  $f_d$  y  $S_{uw}$  durante trayectoria de humedecimiento.



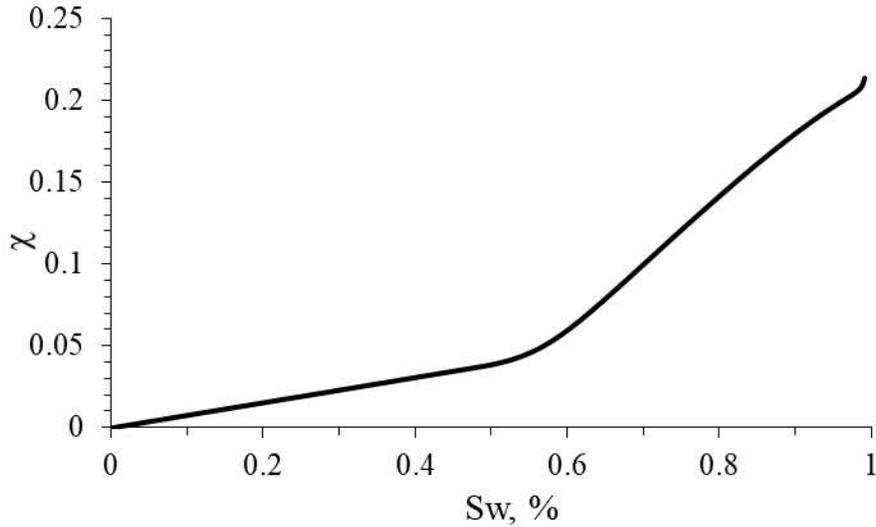
**Figura 150.** Parámetros  $f_s$ ,  $f_u$ ,  $f_d$  y  $S_{uw}$  durante trayectoria de secado.



**Figura 151.** Simulación numérica de la curva de retención agua – suelo obtenida con el modelo sólido poroso.



**Figura 152.** Valores del parámetro  $\chi$  en trayectoria de secado y humedecimiento.



**Figura 153.** Valores del parámetro  $\chi$  contra grado de saturación en trayectoria de humedecimiento.

**ANEXO G. RESULTADO TEÓRICO DE RESISTENCIA AL CORTE**

**Tabla 96.** Resultado teórico de la resistencia al corte.

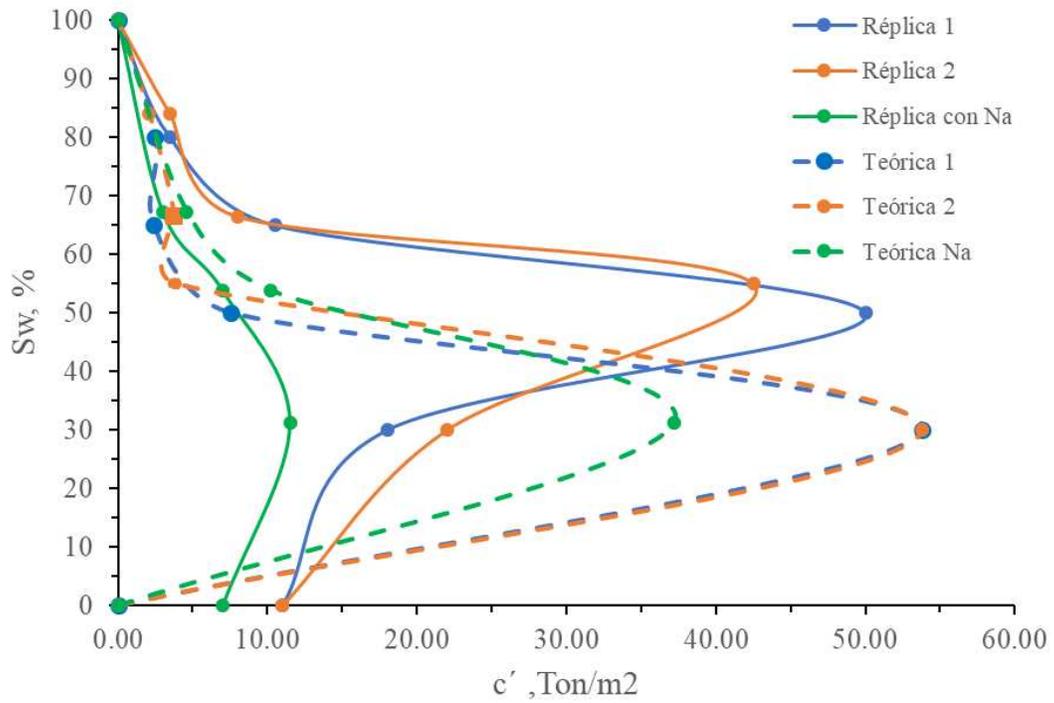
<b>Réplica 1</b>						
<b>Sw</b>	$\chi$	$\phi$	$\phi$	<b>Succión</b>		<b>C teórica</b>
		°	rad	<b>Kpa</b>	<b>Ton/m<sup>2</sup></b>	<b>Ton/m<sup>2</sup></b>
0	0.000	43.0	0.75	208000.00	21202.85	0.00
30	0.025	40.5	0.71	24700.00	2517.84	53.76
50	0.040	39.0	0.68	2277.00	232.11	7.52
65	0.065	37.0	0.65	478.90	48.82	2.39
80	0.145	35.5	0.62	235.91	24.05	2.49
100	0.210	33.0	0.58	0.01	0.00	0.00

<b>Réplica 2</b>						
<b>Sw</b>	$\chi$	$\phi$	$\phi$	<b>Succión</b>		<b>C teórica</b>
		°	rad	<b>Kpa</b>	<b>Ton/m<sup>2</sup></b>	<b>Ton/m<sup>2</sup></b>
0	0.000	42.0	0.73	208000.00	21202.85	0.00
30	0.025	40.5	0.71	24700.00	2517.84	53.76
55	0.045	38.0	0.66	1062.00	108.26	3.81
66.5	0.110	36.5	0.64	451.10	45.98	3.74
84	0.150	34.5	0.60	197.73	20.16	2.08
100	0.210	34.0	0.59	0.01	0.00	0.00

<b>Réplica con Sodio</b>						
<b>Sw</b>	$\chi$	$\phi$	$\phi$	<b>Succión</b>		<b>C teórica</b>
		°	rad	<b>Kpa</b>	<b>Ton/m<sup>2</sup></b>	<b>Ton/m<sup>2</sup></b>
0	0.000	36.0	0.63	208000.00	21202.85	0.00
31.31	0.0119	35.0	0.61	43710.00	4455.66	37.19
53.81	0.0347	35.0	0.61	4132.00	421.20	10.24
67.32	0.0648	35.0	0.61	993.48	101.27	4.60
100	0.539	34.0	0.59	0.01	0.00	0.00



**Figura 154.** Comparación teórico experimental de la cohesión a distintos grados de saturación.

**ANEXO H. RESULTADO TEÓRICO DE COMPORTAMIENTO VOLUMÉTRICO**

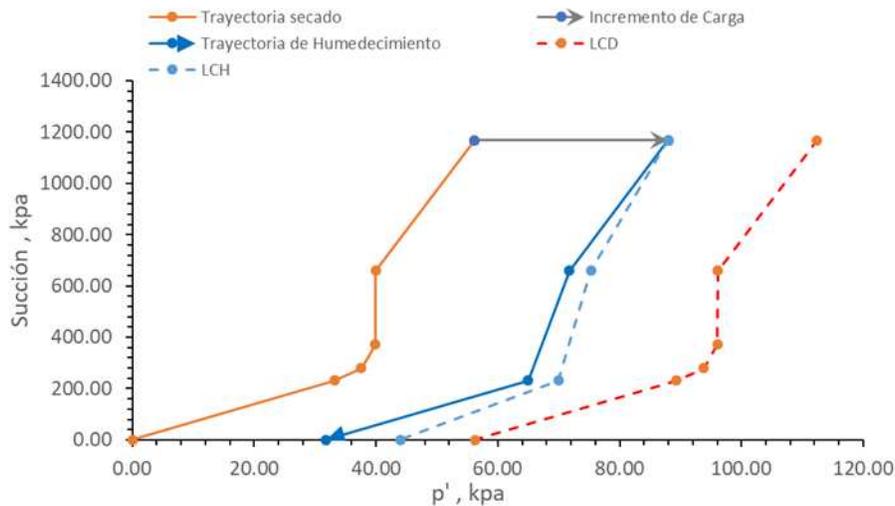
**H.1 Muestra cargada a 31.78 kPa**

**Tabla 97.** Parámetros utilizados para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestras cargadas a 31.78 kPa.

	Réplica 1	Réplica 2	Réplica Na
$\lambda$	-0.450	-0.392	-1.224
$\kappa$	-0.092	-0.105	-0.114
Sw	54.56	50.95	56.48
$\chi_0 S_0$	56.18	88.05	92.63
$\Delta P$	31.78	31.78	31.78
$e_H$	1.643	1.643	1.629

**Tabla 98.** Datos para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestra cargada a 31.78 kPa (réplica 1).

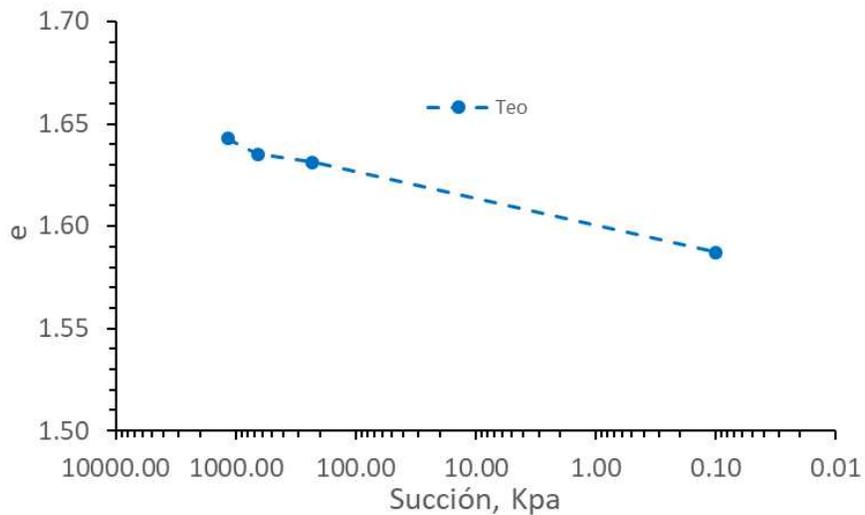
Réplica 1						$\Delta P$ (Kpa) =	31.78
Sw %	S kpa	$\chi_{corr}$	$S^*\chi_{corr}$ kpa	Wetting path kpa	$\Delta P_s$ kpa	$LC_H$ kpa	$\Delta P'$ kpa
54.56	1168.00	0.0481	56.18	56.18			
54.56	1168.00	0.0481	56.18	87.96	-24.40	87.96	0.00
60.00	659.50	0.0606	39.94	71.72	-20.87	75.25	3.53
80.00	231.10	0.1435	33.16	64.94	-19.40	69.94	5.00
100.00	0.10	0.4018	0.04	31.82	-12.21	44.01	12.19



**Figura 155.** Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 31.78 kPa (réplica 1).

**Tabla 99.** Simulación del comportamiento volumétrico de muestra cargada a 31.78 kPa (réplica 1).

Etapa	Presión Aplicada Kpa	Sw %	e <sub>f</sub>	S kpa	χ <sub>corr</sub>	S*χ <sub>corr</sub>	p' kpa	ΔP' Kpa	Iteración 1		Iteración 2	
									de	e <sub>teórica</sub>	de	e <sub>teórica</sub>
Sw inicial	0.00	54.56	1.664	1168.00	0.0481	56.18	56.18					
Sw inicial	15.89	54.56	1.650	1168.00	0.0481	56.18	72.07					
Sw inicial	31.78	54.56	1.643	1168.00	0.0481	56.18	87.97					
Sw inicial	31.78	54.56	1.643	1168.00	0.0481	56.18	87.97			1.643		1.643
Incremento Sw 1	31.78	60.00	1.597	659.50	0.0606	39.94	71.72	3.527	-0.007	1.635	-0.007	1.635
Incremento Sw 2	31.78	80.00	1.579	231.00	0.1440	33.26	65.05	4.999	-0.012	1.631	-0.011	1.631
Incremento Sw 3	31.78	100.00	1.575	0.10	0.9230	0.09	31.88	12.192	-0.058	1.585	-0.056	1.587
Descarga	0.00	100.00	1.597	0.10	0.9230	0.09	0.09					

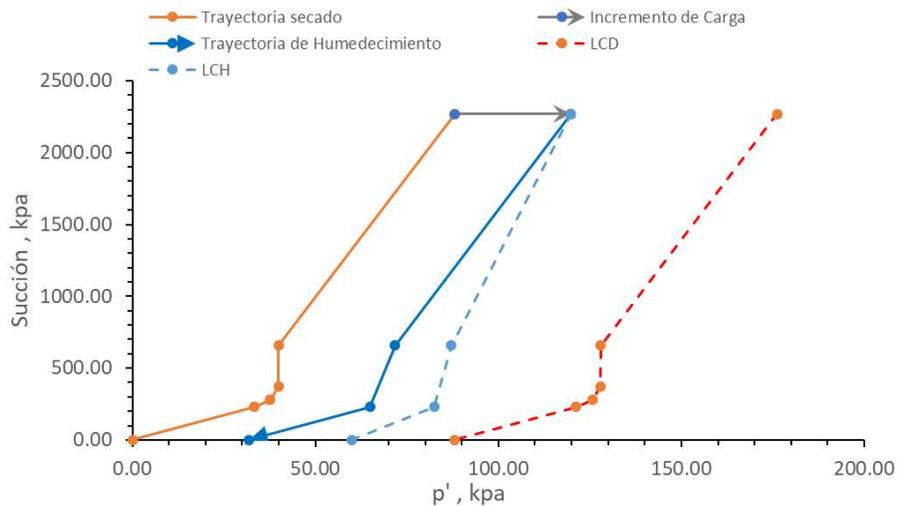


**Figura 156.** Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestra cargada a 31.78 kPa (réplica 1).

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**

**Tabla 100.** Datos para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestra cargada a 31.78 kPa (réplica 2).

Réplica 2					$\Delta P$ (Kpa) =	31.78	
Sw %	S kpa	$\chi_{corr}$	S* $\chi_{corr}$ kpa	Wetting path kpa	$\Delta P_s$ kpa	LC <sub>H</sub> kpa	$\Delta P'$ kpa
50.95	2270.00	0.0388	88.05	88.05			
50.95	2270.00	0.0388	88.05	119.83	-56.27	119.83	0.00
60.00	659.50	0.0606	39.94	71.72	-40.90	87.09	15.37
80.00	231.10	0.1435	33.16	64.94	-38.73	82.48	17.54
100.00	0.10	0.4018	0.04	31.82	-28.15	59.94	28.12



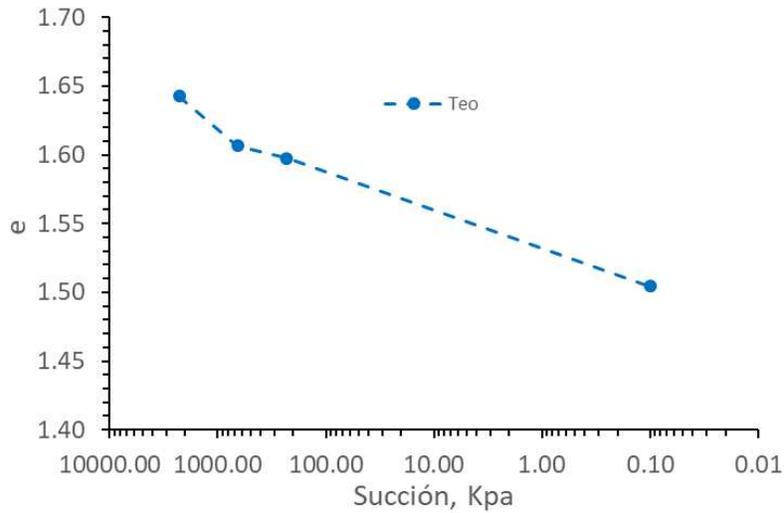
**Figura 157.** Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 31.78 kPa (réplica 2).

**Tabla 101.** Simulación del comportamiento volumétrico de muestra cargada a 31.78 kPa (réplica 2).

Etapa	Presión Aplicada Kpa	Sw %	e <sub>f</sub>	S kpa	$\chi_{corr}$	S* $\chi_{corr}$	p' kpa	$\Delta P'$ Kpa	Iteración 1		Iteración 2	
									de	e teórica	de	e teórica
Sw inicial	0.00	50.95	1.664	2270.00	0.03879	88.05	88.05					
Sw inicial	15.89	50.95	1.653	2270.00	0.03879	88.05	103.95					
Sw inicial	31.78	50.95	1.643	2270.00	0.03879	88.05	119.84			1.643	1.643	
Incremento Sw 1	31.78	60.00	1.597	659.50	0.0606	39.97	71.75	15.374	-0.037	1.606	-0.036	1.607
Incremento Sw 2	31.78	80.00	1.572	231.10	0.1440	33.28	65.06	17.540	-0.047	1.596	-0.045	1.597
Incremento Sw 3	31.78	100.00	1.558	0.10	0.9230	0.09	31.88	28.124	-0.152	1.490	-0.138	1.505
Descarga	0.00	100.00	1.597	0.10	0.9230	0.09	0.09					

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**

---

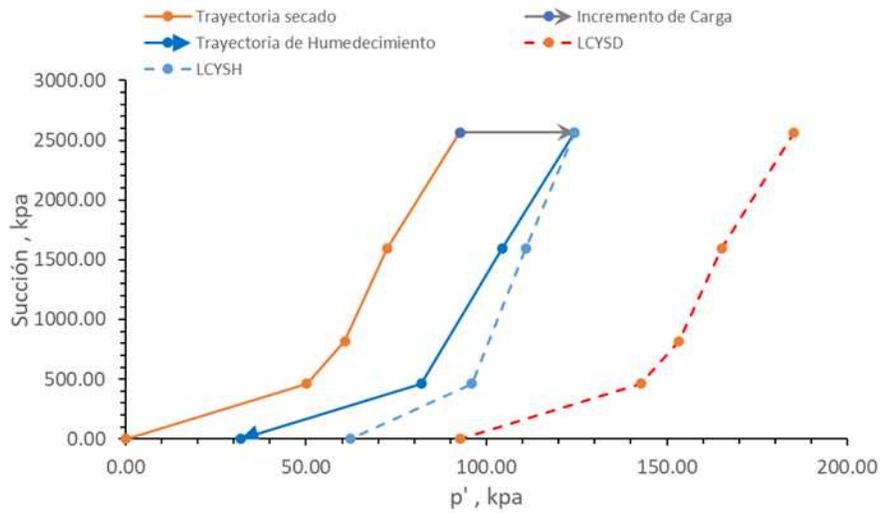


**Figura 158.** Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestra cargada a 31.78 kPa (réplica 2).

**Tabla 102.** Datos para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestra cargada a 31.78 kPa (suelo mezclado con sodio).

Réplica con Sodio							$\Delta P$ (Kpa) =	31.78
Sw %	S kpa	$\chi_{corr}$	$S^*\chi_{corr}$ kpa	Wetting path kpa	$\Delta P_s$ kpa	$LC_H$ kpa	$\Delta P'$ kpa	
56.48	2566.00	0.03610	92.63	92.63				
56.48	2566.00	0.03610	92.63	124.41	-60.85	124.41	0.00	
60.00	1593.00	0.04550	72.48	104.26	-54.23	110.88	6.62	
80.00	461.50	0.10870	50.17	81.95	-46.90	95.89	13.95	
100.00	0.10	0.52810	0.05	31.83	-30.44	62.24	30.41	

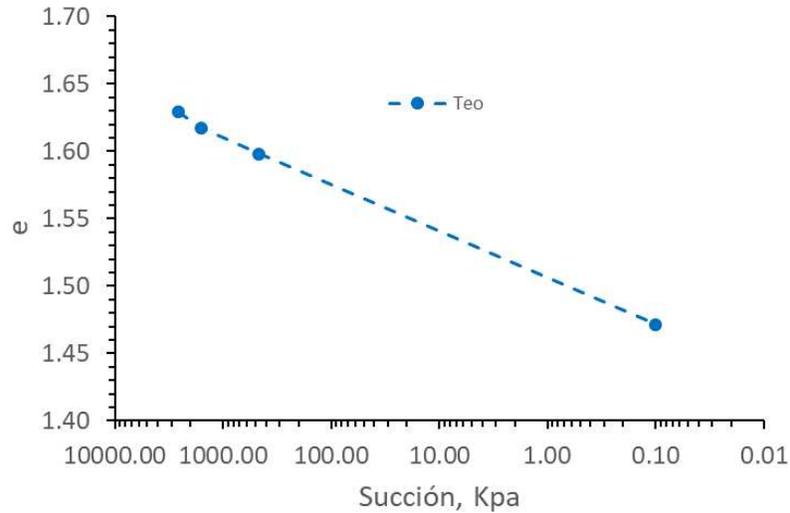
**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**



**Figura 159.** Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 31.78 kPa (suelo mezclado con sodio).

**Tabla 103.** Simulación del comportamiento volumétrico de muestra cargada a 31.78 kPa (suelo mezclado con sodio).

Réplica con Sodio													
Etapa	Presión		$e_f$	S	$\chi_{corr}$	$S^*\chi_{corr}$	$p'$	$\Delta P'$	Iteración 1		Iteración 2		
	Aplicada	Sw							de	e teórica	de	e teórica	
	Kpa	%		kpa			kpa	Kpa					
Sw inicial	0.00	56.48	1.664	2566.00	0.0361	92.63	92.63						
Sw inicial	31.78	56.48	1.629	2566.00	0.0361	92.63	124.42			1.629		1.629	
Incremento Sw 1	31.78	60.00	1.518	1593.00	0.0455	72.48	104.27	6.619	-0.012	1.617	-0.012	1.618	
Incremento Sw 2	31.78	80.00	1.501	461.50	0.1087	50.17	81.95	13.949	-0.032	1.598	-0.031	1.598	
Incremento Sw 3	31.78	100.00	1.497	0.10	0.5281	0.05	31.84	30.409	-0.177	1.452	-0.158	1.471	
Descarga	31.78	100.00	1.542	0.10	0.5281	0.05	31.84						



**Figura 160.** Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestra cargada a 31.78 kPa (suelo mezclado con sodio).

## H.2 Muestra cargada a 63.57 kPa

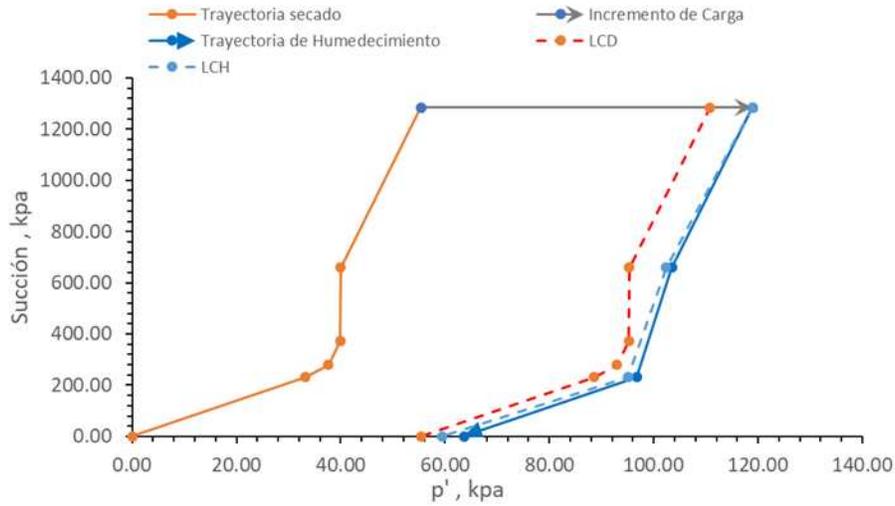
**Tabla 104.** Parámetros utilizados para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestras cargadas a 63.57 kPa.

	Réplica 1	Réplica 2	Réplica Na
$\lambda$	-0.450	-0.392	-1.224
$\kappa$	-0.092	-0.105	-0.114
Sw	53.33	57.24	58.01
$\chi_0 S_0$	55.38	44.24	78.65
$\Delta P$	63.57	63.57	63.57
$e_H$	1.612	1.555	1.583

**Tabla 105.** Datos para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestra cargada a 63.57 kPa (réplica 1).

Réplica 1						$\Delta P$ (Kpa) =	63.56
Sw	S	$\chi_{corr}$	$S^* \chi_{corr}$	Wetting path	$\Delta P_s$	$LC_H$	$\Delta P'$
%	kpa		kpa	kpa	kpa	kpa	kpa
53.33	1285.00	0.0431	55.38	55.38			
53.33	1285.00	0.0431	55.38	118.94	8.18	118.94	0.00
60.00	659.50	0.0606	39.94	103.50	7.04	102.36	-1.14
80.00	231.10	0.1435	33.16	96.72	6.54	95.08	-1.64
100.00	0.10	0.4018	0.04	63.60	4.09	59.51	-4.09

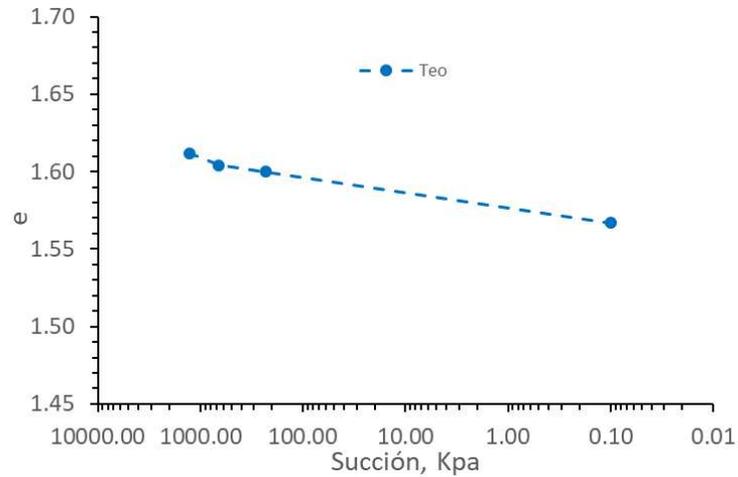
**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**



**Figura 161.** Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 63.57 kPa (réplica 1).

**Tabla 106.** Simulación del comportamiento volumétrico de muestra cargada a 63.57 kPa (réplica 1).

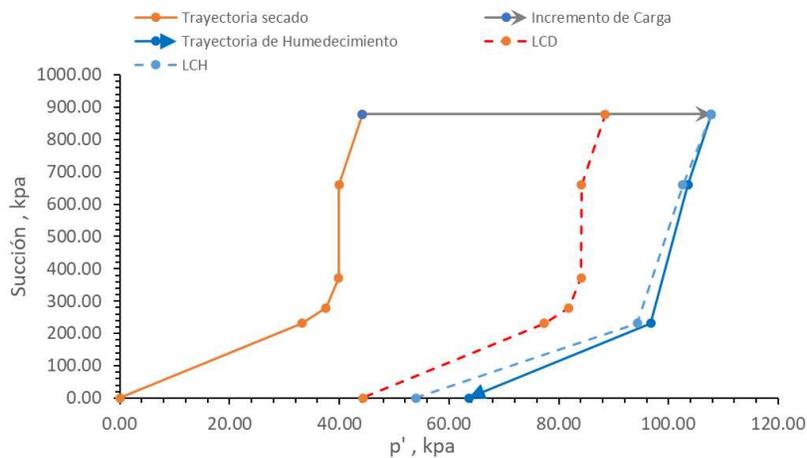
Réplica 1												
Etapa	Presión Aplicada Kpa	Sw %	e <sub>f</sub>	S kpa	χ <sub>corr</sub>	S*χ <sub>corr</sub>	p' kpa	ΔP' Kpa	Iteración 1		Iteración 2	
									de	e <sub>teórica</sub>	de	e <sub>teórica</sub>
Sw inicial	0.00	53.33	1.664	1285.00	0.0431	55.38	55.38					
Sw inicial	15.89	53.33	1.657	1285.00	0.0431	55.38	71.27					
Sw inicial	31.78	53.33	1.646	1285.00	0.0431	55.38	87.16					
Sw inicial	63.57	53.33	1.612	1285.00	0.0431	55.38	118.95					
Sw inicial	63.57	53.33	1.612	1285.00	0.0431	55.38	118.95			1.612		1.612
Incremento Sw 1	63.57	60.00	1.568	659.50	0.0606	39.97	103.53	1.140	-0.008	1.604	-0.008	1.604
Incremento Sw 2	63.57	80.00	1.555	231.10	0.1440	33.28	96.85	1.640	-0.012	1.600	-0.012	1.600
Incremento Sw 3	63.57	100.00	1.548	0.10	0.9230	0.09	63.66	4.085	-0.047	1.565	-0.045	1.567
Descarga	0.00	100.00	1.62	0.10	0.9230	0.09	0.09					



**Figura 162.** Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestra cargada a 63.57 kPa (réplica 1).

**Tabla 107.** Datos para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestra cargada a 63.57 kPa (réplica 2).

Réplica 2						$\Delta P$ (Kpa) =	63.56
Sw %	S kpa	$\chi_{corr}$	S* $\chi_{corr}$ kpa	Wetting path kpa	$\Delta P_s$ kpa	LC <sub>H</sub> kpa	$\Delta P'$ kpa
57.24	877.70	0.0504	44.24	44.24			
57.24	877.70	0.0504	44.24	107.80	19.32	107.80	0.00
60.00	659.50	0.0606	39.94	103.50	18.39	102.56	-0.94
80.00	231.10	0.1435	33.16	96.72	16.91	94.30	-2.42
100.00	0.10	0.4018	0.04	63.60	9.67	53.95	-9.65

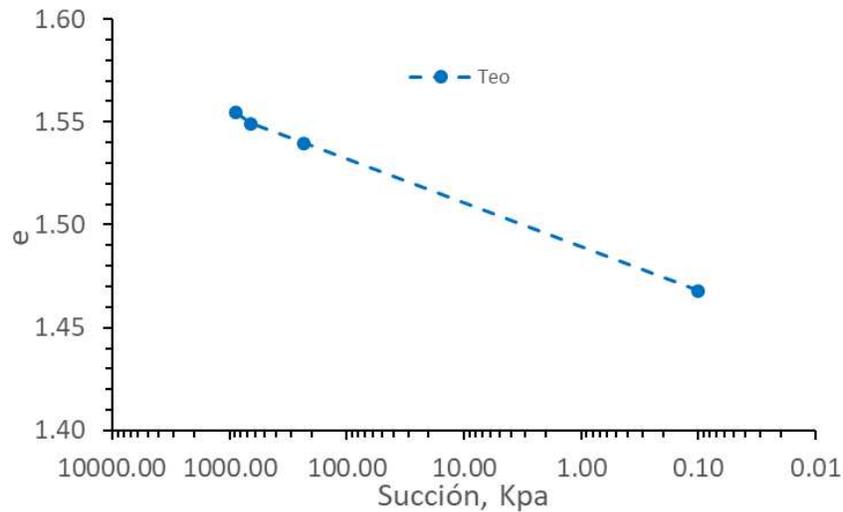


**Figura 163.** Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 63.57 kPa (réplica 2).

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**

**Tabla 108.** Simulación del comportamiento volumétrico de muestra cargada a 63.57 kPa (réplica 2).

Réplica 2												
Etapa	Presión	Sw	e <sub>f</sub>	S	χ <sub>corr</sub>	S*χ <sub>corr</sub>	p'	ΔP'	Iteración 1		Iteración 2	
	Aplicada								de	e teórica	de	e teórica
	Kpa	%		kpa			kpa	Kpa				
Sw inicial	0.00	57.24	1.664	877.70	0.0504	44.24	44.24					
Sw inicial	15.99	57.24	1.638	877.70	0.0504	44.24	60.22					
Sw inicial	31.98	57.24	1.612	877.70	0.0504	44.24	76.21					
Sw inicial	63.57	57.24	1.555	877.70	0.0504	44.24	107.81			1.555		1.555
Incremento Sw 1	63.57	60.00	1.531	659.50	0.0606	39.97	103.54	0.938	-0.006	1.549	-0.005	1.549
Incremento Sw 2	63.57	80.00	1.527	231.10	0.144	33.28	96.85	2.419	-0.015	1.539	-0.015	1.540
Incremento Sw 3	63.57	100.00	1.526	0.10	0.9230	0.09	63.67	9.653	-0.092	1.462	-0.087	1.468
Descarga	0.00	100.00	1.575	0.10	0.9230	0.09	0.09					

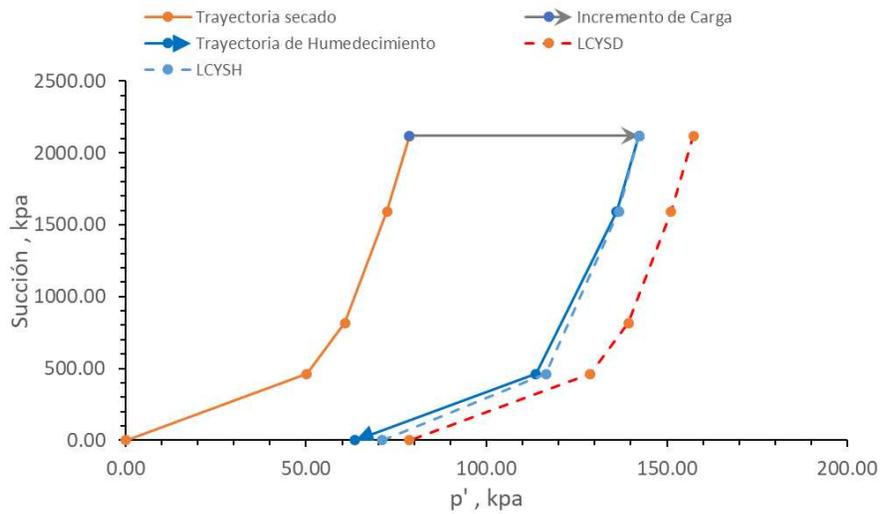


**Figura 164.** Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestra cargada a 63.57 kPa (réplica 2).

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**

**Tabla 109.** Datos para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestra cargada a 63.57 kPa (suelo mezclado con sodio).

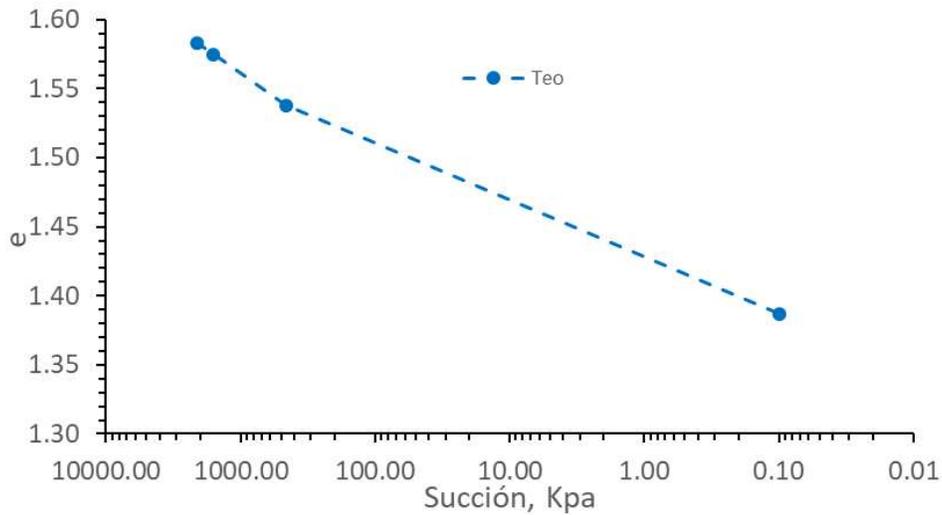
Réplica con Sodio						$\Delta P$ (Kpa) = 63.56	
Sw %	S kpa	$\chi_{corr}$	$S^*\chi_{corr}$ kpa	Wetting path kpa	$\Delta P_s$ kpa	$LC_H$ kpa	$\Delta P'$ kpa
58.01	2120.00	0.03710	78.65	78.65			
58.01	2120.00	0.03710	78.65	142.21	-15.09	142.21	0.00
60.00	1593.00	0.04550	72.48	136.04	-14.50	136.63	0.59
80.00	461.50	0.10870	50.17	113.73	-12.36	116.46	2.73
100.00	0.10	0.52810	0.05	63.61	-7.55	71.15	7.54



**Figura 165.** Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 63.57 kPa (suelo mezclado con sodio).

**Tabla 110.** Simulación del comportamiento volumétrico de muestra cargada a 63.57 kPa (suelo mezclado con sodio).

Etapa	Réplica con Sodio							Iteración 1		Iteración 2		
	Presión Aplicada Kpa	Sw %	$e_f$	S kpa	$\chi_{corr}$	$S^*\chi_{corr}$	$p'$ kpa	$\Delta P'$ Kpa	de	$e$ teórica	de	$e$ teórica
Sw inicial	0.00	58.01	1.664	2120.00	0.0371	78.65	78.65					
Sw inicial	63.57	58.01	1.583	2120.00	0.0371	78.65	142.22			1.583		1.583
Incremento Sw 1	63.57	60.00	1.511	1593.00	0.0455	72.48	136.05	0.592	-0.008	1.575	-0.008	1.575
Incremento Sw 2	63.57	80.00	1.474	461.50	0.1087	50.17	113.73	2.733	-0.047	1.537	-0.045	1.538
Incremento Sw 3	63.57	100.00	1.463	0.10	0.5281	0.05	63.62	7.541	-0.230	1.354	-0.196	1.387
Descarga	63.57	100.00	1.466	0.10	0.5281	0.05	63.62					



**Figura 166.** Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestra cargada a 63.57 kPa (suelo mezclado con sodio).

### H.3 Muestra cargada a 95.35 kPa

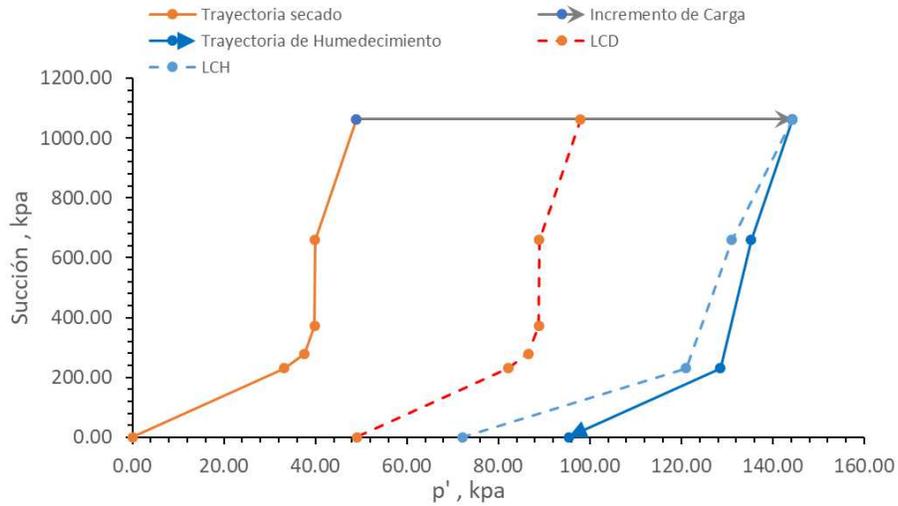
**Tabla 111.** Parámetros utilizados para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestras cargadas a 95.35 kPa.

	Réplica 1	Réplica 2	Réplica Na
$\lambda$	-0.450	-0.392	-1.224
$\kappa$	-0.092	-0.105	-0.114
$S_w$	55.51	58.46	52.87
$\chi_0 S_0$	48.96	42.53	188.10
$\Delta P$	95.35	95.35	95.35
$e_H$	1.546	1.549	1.572

**Tabla 112.** Datos para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestra cargada a 95.35 kPa (réplica 1).

		Réplica 1				$\Delta P$ (Kpa) =	95.34
$S_w$	S	$\chi_{corr}$	$S^* \chi_{corr}$	Wetting path	$\Delta P_s$	$LC_H$	$\Delta P'$
%	kpa		kpa	kpa	kpa	kpa	kpa
55.51	1062.00	0.0461	48.96	48.96			
55.51	1062.00	0.0461	48.96	144.30	46.38	144.30	0.00
60.00	659.50	0.0606	39.94	135.28	42.11	131.01	-4.27
80.00	231.10	0.1435	33.16	128.50	38.90	121.02	-7.48
100.00	0.10	0.4018	0.04	95.38	23.21	72.21	-23.17

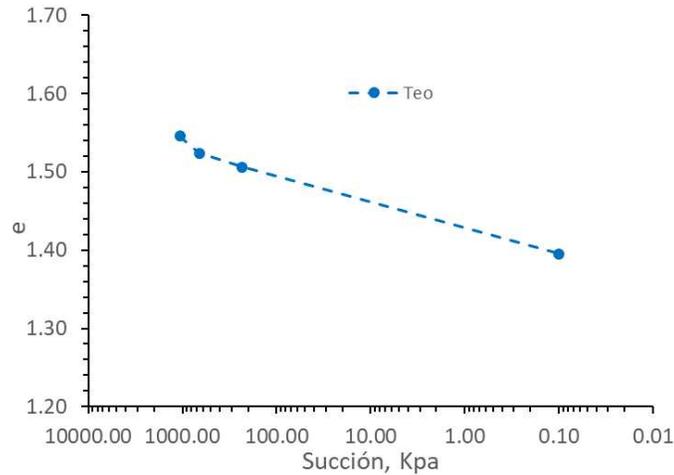
**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**



**Figura 167.** Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 95.35 kPa (réplica 1).

**Tabla 113.** Simulación del comportamiento volumétrico de muestra cargada a 95.35 kPa (réplica 1).

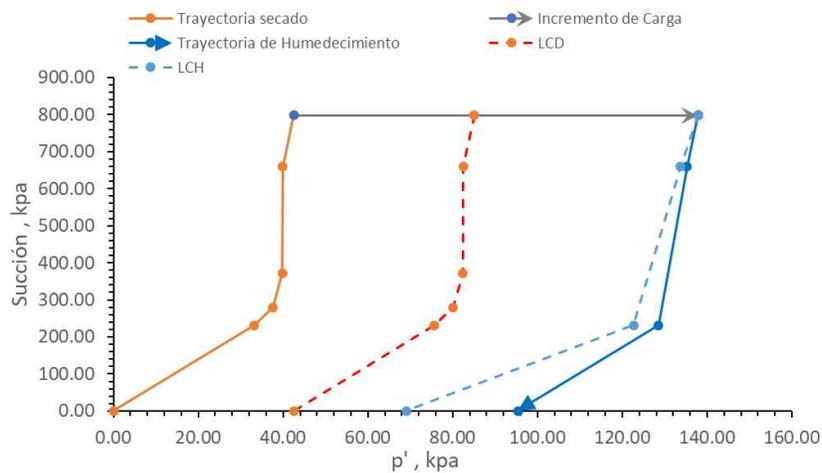
Réplica 1												
Etapa	Presión Aplicada Kpa	Sw %	e <sub>f</sub>	S kpa	χ <sub>corr</sub>	S*χ <sub>corr</sub>	p' kpa	ΔP' Kpa	Iteración 1		Iteración 2	
									de	e teórica	de	e teórica
Sw inicial	0.00	55.51	1.664	1062.00	0.0461	48.96	48.96					
Sw inicial	15.89	55.51	1.647	1062.00	0.0461	48.96	64.85					
Sw inicial	47.68	55.51	1.606	1062.00	0.0461	48.96	96.64					
Sw inicial	95.35	55.51	1.546	1062.00	0.0461	48.96	144.31			1.546		1.546
Incremento Sw 1	95.35	60.00	1.512	659.50	0.0606	39.97	135.32	4.272	-0.022	1.524	-0.022	1.524
Incremento Sw 2	95.35	80.00	1.488	231.10	0.1440	33.28	128.63	7.482	-0.040	1.505	-0.039	1.506
Incremento Sw 3	95.35	100.00	1.474	0.10	0.9230	0.09	95.45	23.172	-0.169	1.376	-0.151	1.395
Descarga	0.00	100.00	1.518	0.10	0.9230	0.09	0.09					



**Figura 168.** Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestra cargada a 95.35 kPa (réplica 1).

**Tabla 114.** Datos para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestra cargada a 95.35 kPa (réplica 2).

Réplica 2					$\Delta P$ (Kpa) =	95.34	
Sw %	S kpa	$\chi_{corr}$	$S^*\chi_{corr}$ kpa	Wetting path kpa	$\Delta P_s$ kpa	$LC_H$ kpa	$\Delta P'$ kpa
58.46	797.90	0.0533	42.53	42.53			
58.46	797.90	0.0533	42.53	137.87	52.81	137.87	0.00
60.00	659.50	0.0606	39.94	135.28	51.20	133.67	-1.61
80.00	231.10	0.1435	33.16	128.50	47.00	122.69	-5.81
100.00	0.10	0.4018	0.04	95.38	26.43	69.00	-26.38

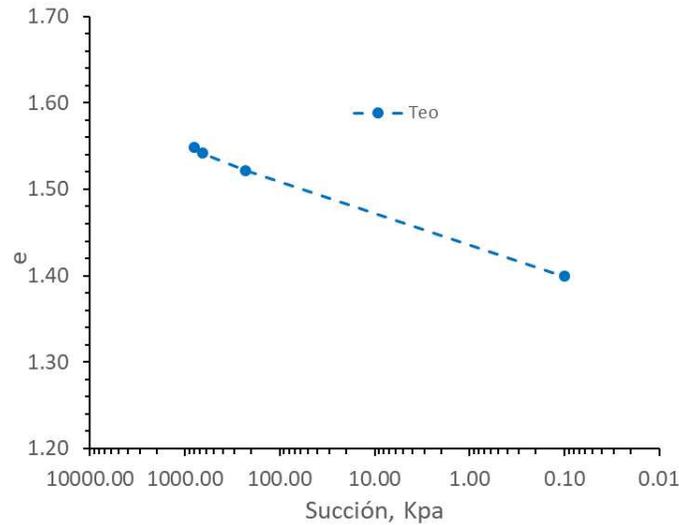


**Figura 169.** Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 95.35 kPa (réplica 2).

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**

**Tabla 115.** Simulación del comportamiento volumétrico de muestra cargada a 95.35 kPa (réplica 2).

Etapa	Réplica 2								Iteración 1		Iteración 2	
	Presión Aplicada Kpa	Sw %	$e_f$	S kpa	$\chi_{corr}$	$S*\chi_{corr}$	$p'$ kpa	$\Delta P'$ Kpa	de	$e_{teórica}$	de	$e_{teórica}$
Sw inicial	0.00	58.46	1.664	797.90	0.0533	42.53	42.53					
Sw inicial	15.33	58.46	1.644	797.90	0.0533	42.53	57.85					
Sw inicial	45.77	58.46	1.610	797.90	0.0533	42.53	88.30					
Sw inicial	95.35	58.46	1.549	797.90	0.0533	42.53	137.87			1.549		1.549
Incremento Sw 1	95.35	60.00	1.535	659.50	0.0606	39.97	135.31	1.607	-0.007	1.542	-0.007	1.542
Incremento Sw 2	95.35	80.00	1.495	231.10	0.1440	33.28	128.62	5.815	-0.027	1.521	-0.027	1.522
Incremento Sw 3	95.35	100.00	1.485	0.10	0.9230	0.09	95.44	26.381	-0.168	1.381	-0.150	1.399
Descarga	0.00	100.00	1.529	0.10	0.9230	0.09	0.09					

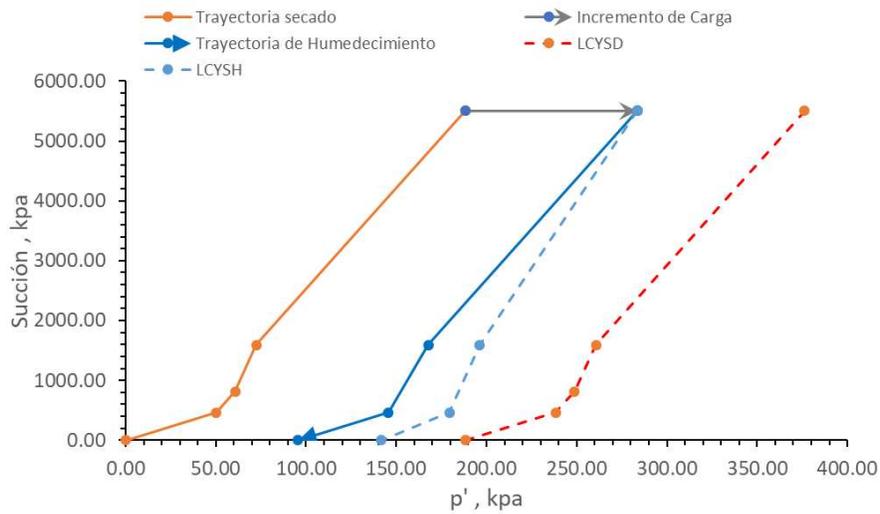


**Figura 170.** Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestra cargada a 95.35 kPa (réplica 2).

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**

**Tabla 116.** Datos para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestra cargada a 95.35 kPa (suelo mezclado con sodio).

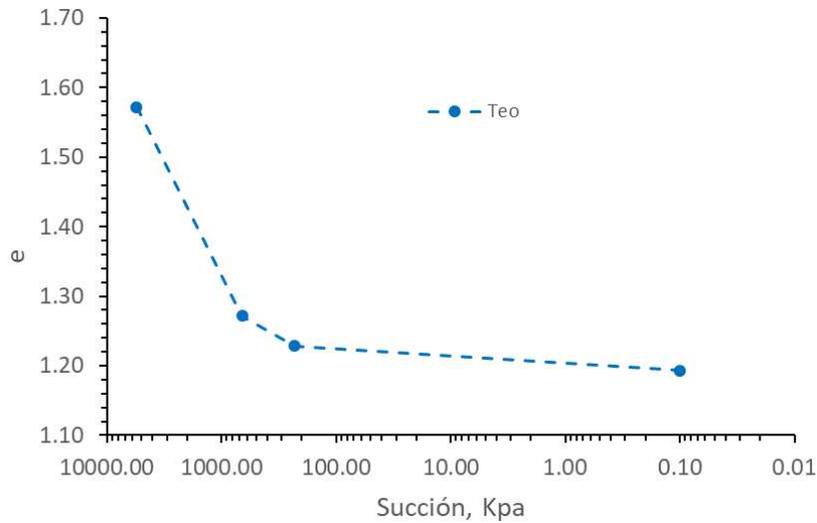
Réplica con Sodio						$\Delta P$ (Kpa) =	95.34
Sw %	S kpa	$\chi_{corr}$	S* $\chi_{corr}$ kpa	Wetting path kpa	$\Delta P_s$ kpa	LC <sub>H</sub> kpa	$\Delta P'$ kpa
52.87	5500.00	0.03420	188.10	188.10			
52.87	5500.00	0.03420	188.10	283.44	-92.76	283.44	0.00
60.00	1593.00	0.04550	72.48	167.82	-64.25	196.33	28.51
80.00	461.50	0.10870	50.17	145.51	-58.75	179.52	34.01
100.00	0.10	0.52810	0.05	95.39	-46.39	141.76	46.37



**Figura 171.** Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 95.35 kPa (suelo mezclado con sodio).

**Tabla 117.** Simulación del comportamiento volumétrico de muestra cargada a 95.35 kPa (suelo mezclado con sodio).

Etapa	Réplica con Sodio							Iteración 1		Iteración 2		
	Presión Aplicada Kpa	Sw %	$e_f$	S kpa	$\chi_{corr}$	S* $\chi_{corr}$	$p'$ kpa	$\Delta P'$ Kpa	de	$e$ teórica	de	$e$ teórica
Sw inicial	0.00	52.87	1.664	5500.00	0.0342	188.10	188.10					
Sw inicial	95.35	52.87	1.572	5500.00	0.0342	188.10	283.45			1.572		1.572
Incremento Sw 1	95.35	60.00	1.365	659.50	0.0606	39.97	135.32	28.508	-0.405	1.167	-0.301	1.272
Incremento Sw 2	95.35	80.00	1.274	231.10	0.144	33.28	128.63	34.011	-0.509	1.064	-0.344	1.228
Incremento Sw 3	95.35	100.00	1.249	0.10	0.9230	0.09	95.45	46.367	-0.935	0.638	-0.379	1.193
Descarga	95.35	100.00	1.330	0.10	0.5281	0.05	95.41					



**Figura 172.** Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestra cargada a 95.35 kPa (suelo mezclado con sodio).

#### H.4 Muestra cargada a 190.71 kPa

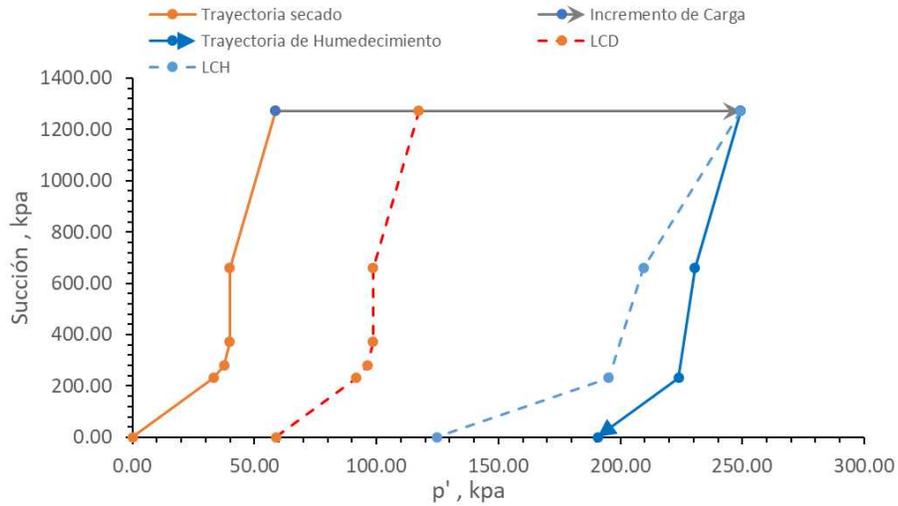
**Tabla 118.** Parámetros utilizados para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestras cargadas a 190.71 kPa.

	Réplica 1	Réplica 2	Réplica Na
$\lambda$	-0.450	-0.392	-1.224
$\kappa$	-0.092	-0.105	-0.114
$S_w$	53.71	54.64	58.01
$\chi_0 S_0$	58.69	56.18	78.65
$\Delta P$	190.71	190.71	190.71
$e_H$	1.470	1.414	1.257

**Tabla 119.** Datos para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestra cargada a 190.71 kPa (réplica 1).

Réplica 1						$\Delta P$ (Kpa) =	190.68
$S_w$ %	S kpa	$\chi_{corr}$	$S^* \chi_{corr}$ kpa	Wetting path kpa	$\Delta P_s$ kpa	$LC_H$ kpa	$\Delta P'$ kpa
53.71	1273.00	0.0461	58.69	58.69			
53.71	1273.00	0.0461	58.69	249.37	131.99	249.37	0.00
60.00	659.50	0.0606	39.94	230.62	110.91	209.54	-21.08
80.00	231.10	0.1435	33.16	223.84	103.29	195.14	-28.70
100.00	0.10	0.4018	0.04	190.72	66.04	124.77	-65.95

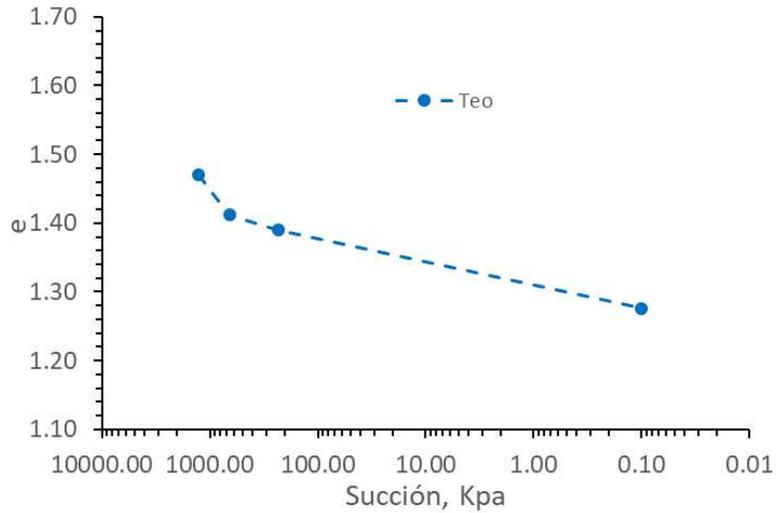
**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**



**Figura 173.** Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 190.71 kPa (réplica 1).

**Tabla 120.** Simulación del comportamiento volumétrico de muestra cargada a 190.71 kPa (réplica 1).

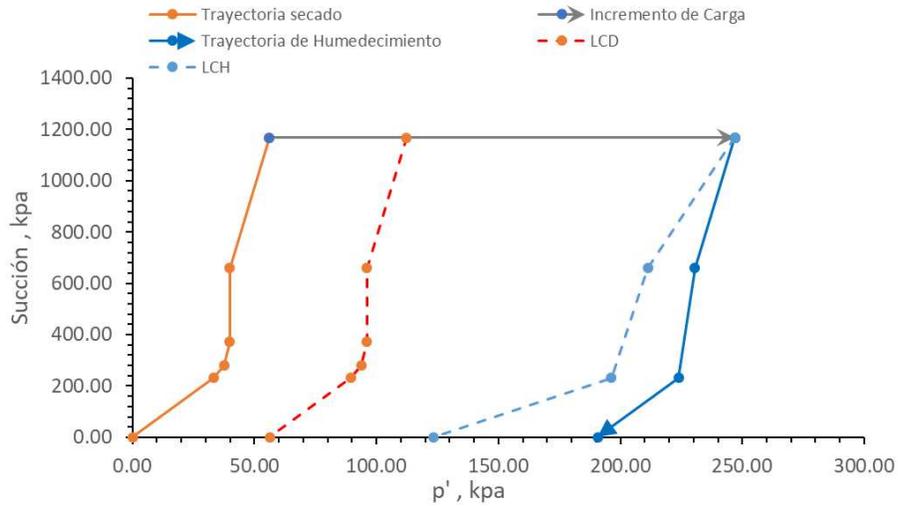
Réplica 1												
Etapa	Presión Aplicada Kpa	Sw %	e <sub>f</sub>	S kpa	χ <sub>corr</sub>	S*χ <sub>corr</sub>	p' kpa	ΔP' Kpa	Iteración 1		Iteración 2	
									de	e teórica	de	e teórica
Sw inicial	0.00	53.71	1.664	1273.00	0.0461	58.69	58.69					
Sw inicial	15.89	53.71	1.650	1273.00	0.0461	58.69	74.58					
Sw inicial	47.68	53.71	1.612	1273.00	0.0461	58.69	106.37					
Sw inicial	95.35	53.71	1.567	1273.00	0.0461	58.69	154.04					
Sw inicial	190.71	53.71	1.470	1273.00	0.0461	58.69	249.39			1.470		1.470
Incremento Sw 1	190.71	60.00	1.366	659.50	0.0606	39.97	230.67	21.082	-0.061	1.409	-0.058	1.412
Incremento Sw 2	190.71	80.00	1.331	231.10	0.1440	33.28	223.98	28.702	-0.085	1.385	-0.080	1.390
Incremento Sw 3	190.71	100.00	1.313	0.10	0.9230	0.09	190.80	65.952	-0.229	1.241	-0.193	1.276
Descarga	0.00	100.00	1.497	0.10	0.9230	0.09	0.09					



**Figura 174.** Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestra cargada a 190.71 kPa (réplica 1).

**Tabla 121.** Datos para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestra cargada a 190.71 kPa (réplica 2).

Réplica 2							$\Delta P$ (Kpa) =	190.68
Sw	S	$\chi_{corr}$	$S^*\chi_{corr}$	Wetting path	$\Delta P_s$	$LC_H$	$\Delta P'$	
%	kpa		kpa	kpa	kpa	kpa	kpa	
54.64	1168.00	0.0481	56.18	56.18				
54.64	1168.00	0.0481	56.18	246.86	134.50	246.86	0.00	
60.00	659.50	0.0606	39.94	230.62	115.06	211.18	-19.44	
80.00	231.10	0.1435	33.16	223.84	106.95	196.29	-27.55	
100.00	0.10	0.4018	0.04	190.72	67.30	123.52	-67.20	



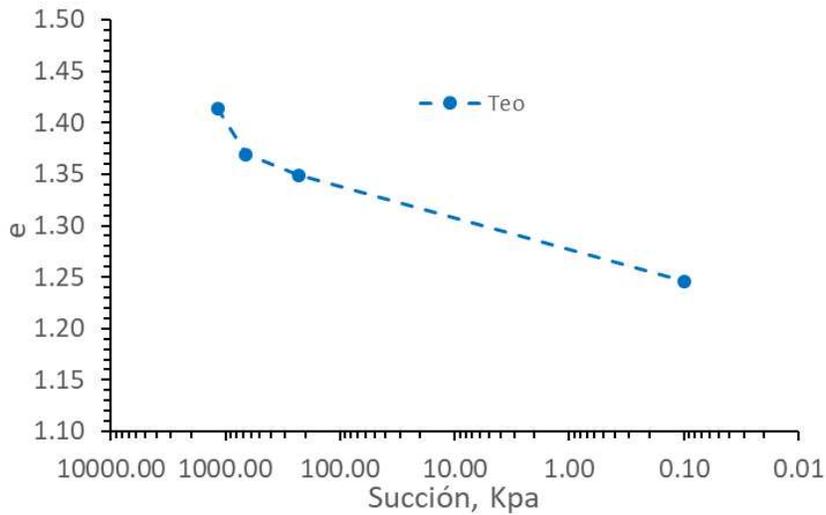
**Figura 175.** Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 190.71 kPa (réplica 2).

**Tabla 122.** Simulación del comportamiento volumétrico de muestra cargada a 190.71 kPa (réplica 2).

Réplica 2												
Etapa	Presión Aplicada Kpa	Sw %	e <sub>f</sub>	S kpa	χ <sub>corr</sub>	S*χ <sub>corr</sub>	p' kpa	ΔP' Kpa	Iteración 1		Iteración 2	
									de	e teórica	de	e teórica
Sw inicial	0.00	54.64	1.664	1168.00	0.0481	56.18	56.18					
Sw inicial	15.89	54.64	1.647	1168.00	0.0481	56.18	72.07					
Sw inicial	47.68	54.64	1.605	1168.00	0.0481	56.18	103.86					
Sw inicial	95.35	54.64	1.553	1168.00	0.0481	56.18	151.53					
Sw inicial	190.71	54.64	1.414	1168.00	0.0481	56.18	246.89		1.414		1.414	
Incremento Sw 1	190.71	60.00	1.383	659.50	0.0606	39.97	230.67	19.441	-0.047	1.367	-0.045	1.369
Incremento Sw 2	190.71	80.00	1.362	231.10	0.1440	33.28	223.98	27.553	-0.068	1.346	-0.065	1.349
Incremento Sw 3	190.71	100.00	1.355	0.10	0.9230	0.09	190.80	67.202	-0.195	1.219	-0.168	1.246
Descarga	0.00	100.00	1.539	0.10	0.9230	0.09	0.09					

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**

---

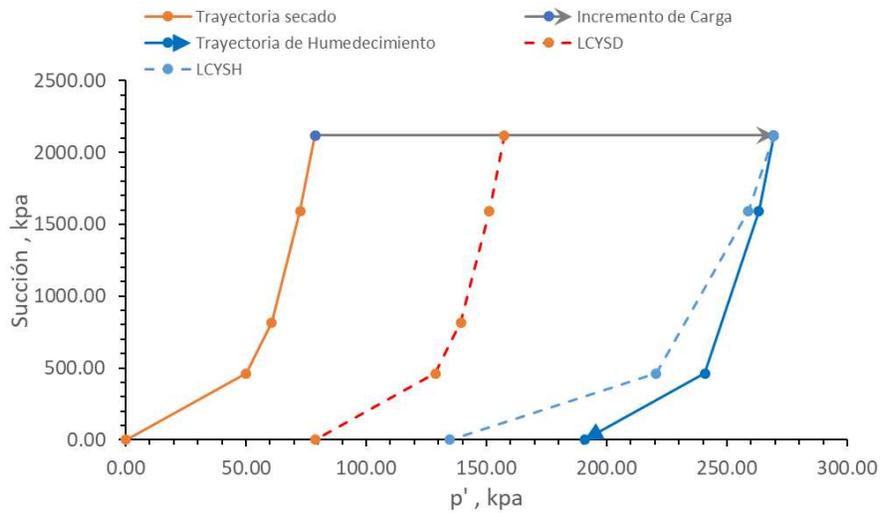


**Figura 176.** Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestra cargada a 190.71 kPa (réplica 2).

**Tabla 123.** Datos para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestra cargada a 190.71 kPa (suelo mezclado con sodio).

Sw %	S kpa	Réplica con Sodio			$\Delta P_s$ kpa	$\Delta P$ (Kpa) = 190.68	
		$\chi_{corr}$	$S^*\chi_{corr}$ kpa	Wetting path kpa		$LC_H$ kpa	$\Delta P'$ kpa
58.01	2120.00	0.03710	78.65	78.65			
58.01	2120.00	0.03710	78.65	269.33	112.03	269.33	0.00
60.00	1593.00	0.04550	72.48	263.16	107.63	258.77	-4.39
80.00	461.50	0.10870	50.17	240.85	91.74	220.56	-20.29
100.00	0.10	0.52810	0.05	190.73	56.05	134.76	-55.98

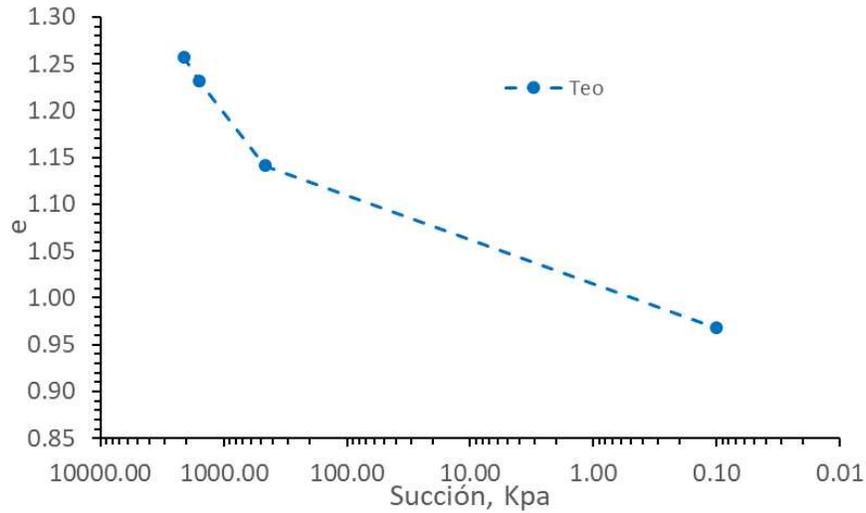
**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**



**Figura 177.** Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 190.71 kPa (suelo mezclado con sodio).

**Tabla 124.** Simulación del comportamiento volumétrico de muestra cargada a 190.71 kPa (suelo mezclado con sodio).

Réplica con Sodio												
Etapa	Presión		$e_f$	S	$\chi_{corr}$	$S*\chi_{corr}$	$p'$	$\Delta P'$	Iteración 1		Iteración 2	
	Aplicada	Sw							de	$e_{teórica}$	de	$e_{teórica}$
	Kpa	%		kpa			kpa	Kpa				
Sw inicial	0.00	58.01	1.656	2120.00	0.0371	78.65	78.65					
Sw inicial	190.71	58.01	1.257	2120.00	0.0371	78.65	269.36		1.257		1.257	
Incremento Sw 1	190.71	60.00	1.038	1593.00	0.0455	72.48	263.19	4.394	-0.026	1.232	-0.025	1.232
Incremento Sw 2	190.71	80.00	0.895	461.50	0.1087	50.17	240.87	20.288	-0.130	1.128	-0.116	1.141
Incremento Sw 3	190.71	100.00	0.879	0.10	0.5281	0.05	190.76	55.976	-0.452	0.806	-0.289	0.968
Descarga	190.71	100.00	0.939	0.10	0.5281	0.05	190.76					



**Figura 178.** Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestra cargada a 190.71 kPa (suelo mezclado con sodio).

### H.5 Muestra cargada a 381.49 kPa

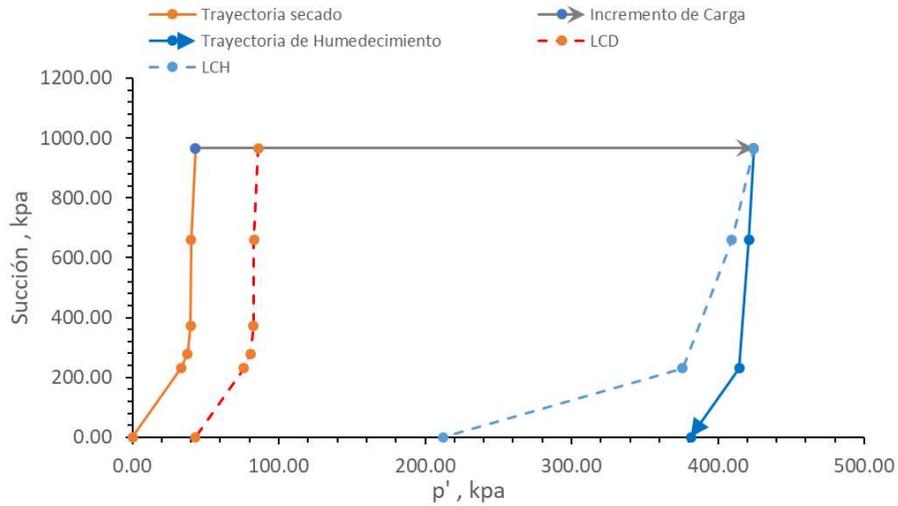
**Tabla 125.** Parámetros utilizados para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestras cargadas a 381.41 kPa.

	Réplica 1	Réplica 2
$\lambda$	-0.450	-0.392
$\kappa$	-0.092	-0.105
$S_w$	55.89	57.24
$\chi_0 S_0$	42.96	41.74
$\Delta P$	381.41	381.41
$e_H$	1.349	1.300

**Tabla 126.** Datos para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestra cargada a 381.41 kPa (réplica 1).

		Réplica 1				$\Delta P$ (Kpa) =	381.36
$S_w$	S	$\chi_{corr}$	$S^* \chi_{corr}$	Wetting path	$\Delta P_s$	$LC_H$	$\Delta P'$
%	kpa		kpa	kpa	kpa	kpa	kpa
55.89	965.50	0.0445	42.96	42.96			
55.89	965.50	0.0445	42.96	424.32	338.40	424.32	0.00
60.00	659.50	0.0606	39.94	421.30	326.48	409.39	-11.91
80.00	231.10	0.1435	33.16	414.52	299.79	375.92	-38.60
100.00	0.10	0.4018	0.04	381.40	169.36	212.36	-169.04

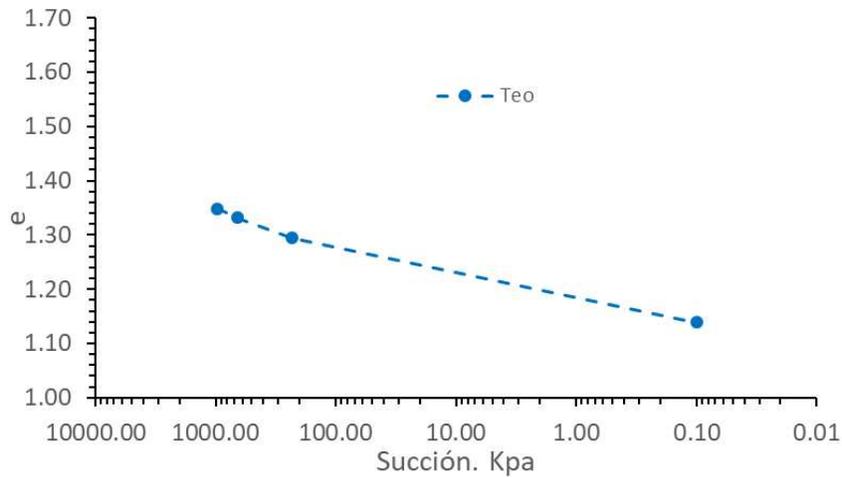
**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**



**Figura 179.** Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 381.41 kPa (réplica 1).

**Tabla 127.** Simulación del comportamiento volumétrico de muestra cargada a 381.41 kPa (réplica 1).

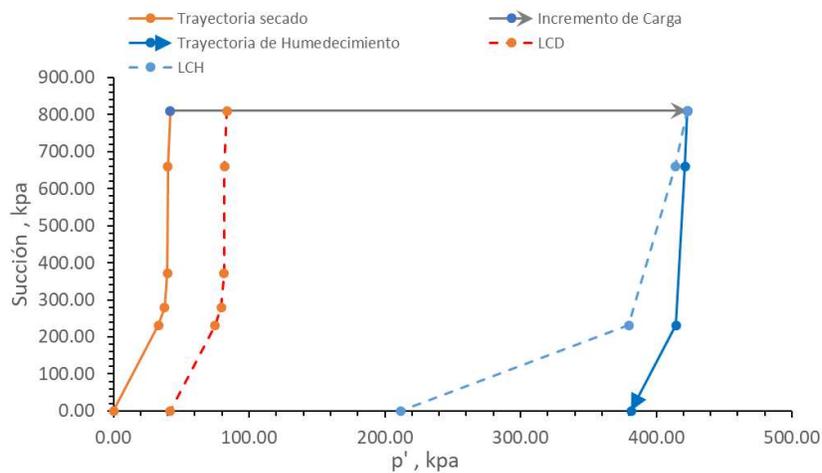
Réplica 1												
Etapa	Presión		$e_f$	S	$\chi_{corr}$	$S*\chi_{corr}$	$p'$	$\Delta P'$	Iteración 1		Iteración 2	
	Aplicada	Sw							de	$e_{teórica}$	de	$e_{teórica}$
	Kpa	%		kpa			kpa	Kpa				
Sw inicial	0.00	55.89	1.664	965.50	0.0445	42.96	41.74					
Sw inicial	48.85	55.89	1.540	965.50	0.0445	42.96	90.59					
Sw inicial	97.70	55.89	1.427	965.50	0.0445	42.96	139.44					
Sw inicial	198.74	55.89	1.398	965.50	0.0445	42.96	240.48					
Sw inicial	381.49	55.89	1.349	965.50	0.0445	42.96	415.45			1.349		1.349
Incremento Sw 1	381.49	60.00	1.278	659.50	0.0606	39.97	421.45	11.914	-0.017	1.331	-0.017	1.332
Incremento Sw 2	381.49	80.00	1.210	231.10	0.1440	33.28	414.77	38.600	-0.057	1.292	-0.054	1.294
Incremento Sw 3	381.49	100.00	1.203	0.10	0.9230	0.09	396.28	169.039	-0.259	1.089	-0.209	1.139
Descarga	0.00	100.00	1.519	0.10	0.9230	0.09	14.80					



**Figura 180.** Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestra cargada a 381.41 kPa (réplica 1).

**Tabla 128.** Datos para la construcción de modelo para simulación de comportamiento volumétrico de muestra cargada a 381.41 kPa (réplica 2).

Réplica 2							$\Delta P$ (Kpa) =	381.36
Sw %	S kpa	$\chi_{corr}$	S* $\chi_{corr}$ kpa	Wetting path kpa	$\Delta P_s$ kpa	LC <sub>H</sub> kpa	$\Delta P'$ kpa	
57.24	810.50	0.0515	41.74	41.74				
57.24	810.50	0.0515	41.74	423.10	339.62	423.10	0.00	
60.00	659.50	0.0606	39.94	421.30	332.29	413.97	-7.33	
80.00	231.10	0.1435	33.16	414.52	304.72	379.63	-34.90	
100.00	0.10	0.4018	0.04	381.40	169.97	211.75	-169.65	

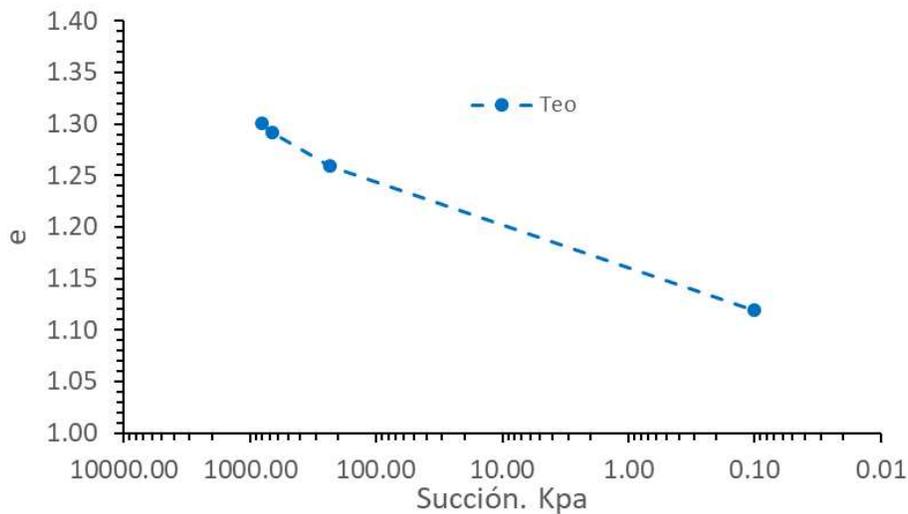


**Figura 181.** Gráfica de esfuerzos efectivos contra succión para muestras cargadas a 381.41 kPa (réplica 2).

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**

**Tabla 129.** Simulación del comportamiento volumétrico de muestra cargada a 381.41 kPa (réplica 2).

Etapa	Réplica 2								Iteración 1		Iteración 2	
	Presión Aplicada Kpa	Sw %	ef	S kpa	$\chi_{corr}$	$S*\chi_{corr}$	$p'$ kpa	$\Delta P'$ Kpa	de	$e_{teórica}$	de	$e_{teórica}$
Sw inicial	0.00	57.24	1.609	810.50	0.0515	41.74	41.74					
Sw inicial	48.85	57.24	1.488	810.50	0.0515	41.74	90.59					
Sw inicial	97.70	57.24	1.377	810.50	0.0515	41.74	139.44					
Sw inicial	198.74	57.24	1.349	810.50	0.0515	41.74	240.48					
Sw inicial	381.49	57.24	1.300	810.50	0.0515	41.74	415.45		1.300		1.300	
Incremento Sw 1	381.49	60.00	1.231	659.50	0.0606	39.97	421.45	7.329	-0.009	1.292	-0.009	1.292
Incremento Sw 2	381.49	80.00	1.165	231.10	0.1440	33.28	414.77	34.897	-0.043	1.258	-0.041	1.259
Incremento Sw 3	381.49	100.00	1.158	0.10	0.9230	0.09	396.28	169.646	-0.218	1.082	-0.181	1.119
Descarga	0.00	100.00	1.467	0.10	0.9230	0.09	14.80					



**Figura 182.** Gráfica de relación de vacíos contra succión para muestra cargada a 381.41 kPa (réplica 2).

**ANEXO I. COMPARACIÓN TEÓRICO EXPERIMENTAL DE  
COMPORTAMIENTO VOLUMÉTRICO**

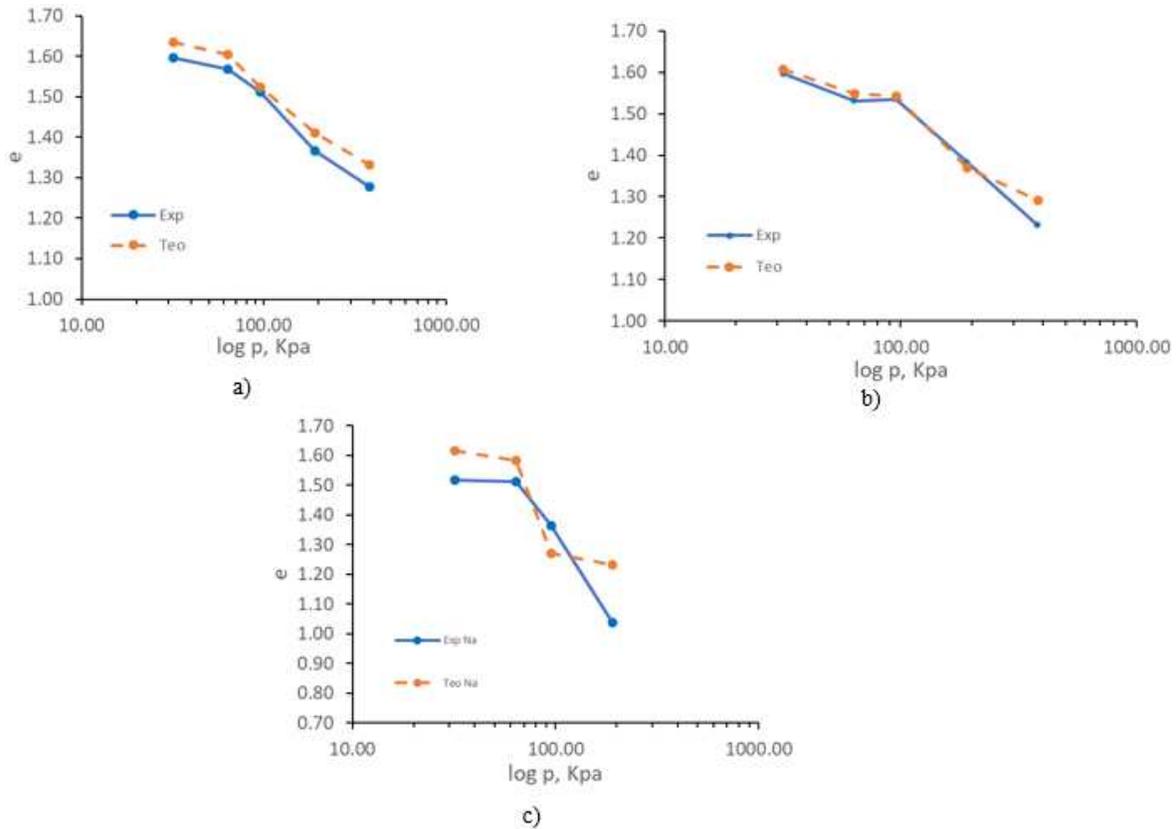
**Tabla 130.** Comparación teórico-experimental de comportamiento volumétrico de muestras con grado de saturación de 60%.

<b>Sw = 60%</b>							
	<b><math>\sigma_n</math> (Kpa)</b>	<b><math>p'</math> (kpa)</b>	<b><math>e_f</math></b>	<b><math>e_{teorico}</math></b>	<b><math>(V_{teo}-V_{Exp})^2</math></b>	<b>ECM</b>	<b><math>R^2</math></b>
Réplica 1	31.78	31.78	1.597	1.635	0.00150	0.0012	0.9859
	63.57	63.66	1.568	1.604	0.00128		
	95.35	95.45	1.512	1.524	0.00015		
	190.71	190.80	1.366	1.412	0.00212		
	381.41	381.51	1.278	1.332	0.00290		
Réplica 2	31.78	31.78	1.597	1.607	0.00010		
	63.57	63.66	1.531	1.549	0.00031		
	95.35	95.45	1.535	1.542	0.00004		
	190.71	190.80	1.383	1.369	0.00019		
	381.41	381.51	1.231	1.292	0.00367		
$\Sigma =$					0.01227		

<b>Sw = 60%, Suelo mezclado con Sodio</b>							
	<b><math>\sigma_n</math> (Kpa)</b>	<b><math>p'</math> (kpa)</b>	<b><math>e_f</math></b>	<b><math>e_{teorico}</math></b>	<b><math>(V_{teo}-V_{Exp})^2</math></b>	<b>ECM</b>	<b><math>R^2</math></b>
	31.78	31.78	1.518	1.618	0.00987	0.0154	0.8482
	63.57	63.66	1.511	1.583	0.00524		
	95.35	95.45	1.365	1.272	0.00874		
	190.71	190.80	1.038	1.232	0.03769		
$\Sigma =$					0.06155		

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**



**Figura 183.** Comparación teórica – experimental de las curvas de compresibilidad de muestras a  $S_w = 60\%$ . a) Réplica 1, b) Réplica 2 y c) Réplica suelo mezclado con cloruro de sodio.

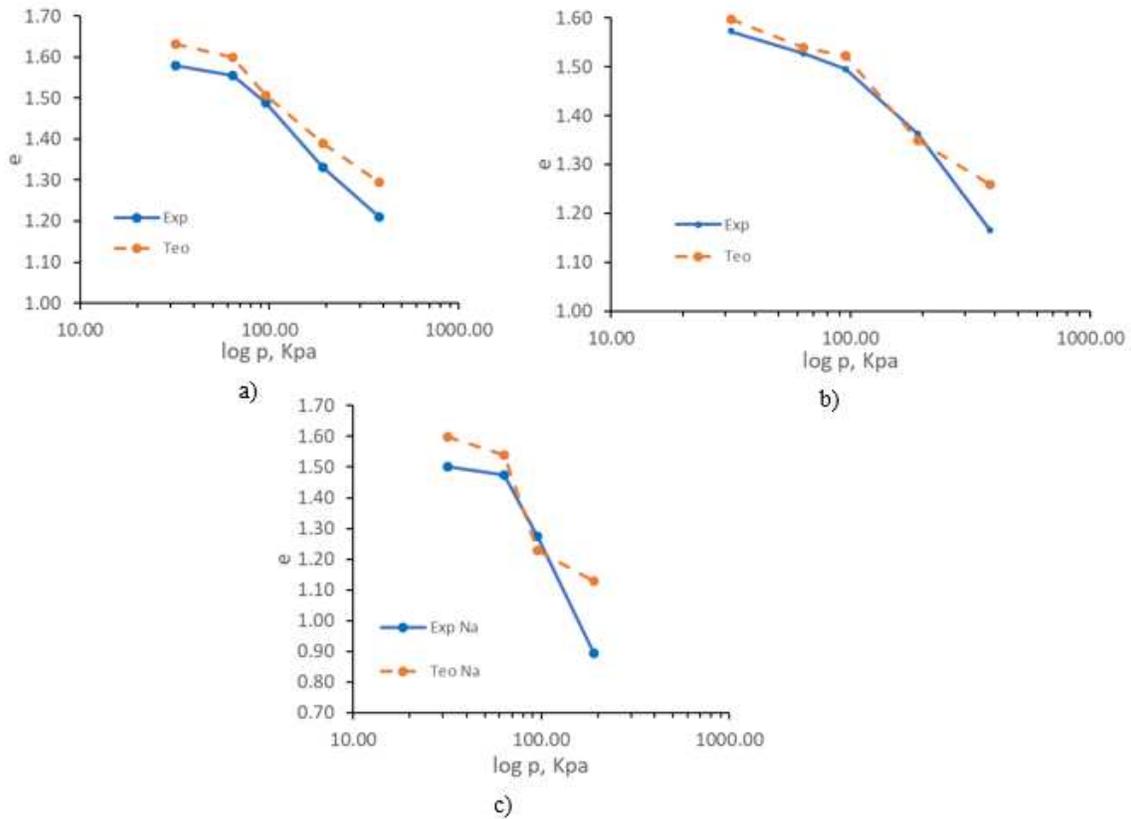
**Tabla 131.** Comparación teórico-experimental de comportamiento volumétrico de muestras con grado de saturación de 80%.

		Sw = 80%						
		$\sigma_n$ (Kpa)	$p'$ (kpa)	$e_f$	$e_{teorico}$	$(V_{teo}-V_{Exp})^2$	ECM	$R^2$
Réplica 1		31.78	31.78	1.579	1.631	0.00273	0.0026	0.9804
		63.57	63.66	1.555	1.600	0.00204		
		95.35	95.45	1.488	1.506	0.00033		
		190.71	190.80	1.331	1.390	0.00346		
		381.41	381.51	1.210	1.294	0.00705		
Réplica 2		31.78	31.78	1.572	1.597	0.00066	0.0026	0.9804
		63.57	63.66	1.527	1.540	0.00015		
		95.35	95.45	1.495	1.522	0.00074		
		190.71	190.80	1.362	1.349	0.00016		
		381.41	381.51	1.165	1.259	0.00882		
						$\Sigma =$	0.02614	

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**

---

<b>Sw = 80%, Suelo mezclado con Sodio</b>						
$\sigma$ (Kpa)	$p'$ (kpa)	$e_f$	$e_{teorico}$	$(V_{teo}-V_{Exp})^2$	ECM	$R^2$
31.78	31.78	1.501	1.598	0.00949	0.0174	0.9170
63.57	63.66	1.474	1.538	0.00411		
95.35	95.45	1.274	1.228	0.00206		
190.71	190.80	0.895	1.128	0.05396		
$\Sigma =$				0.06962		



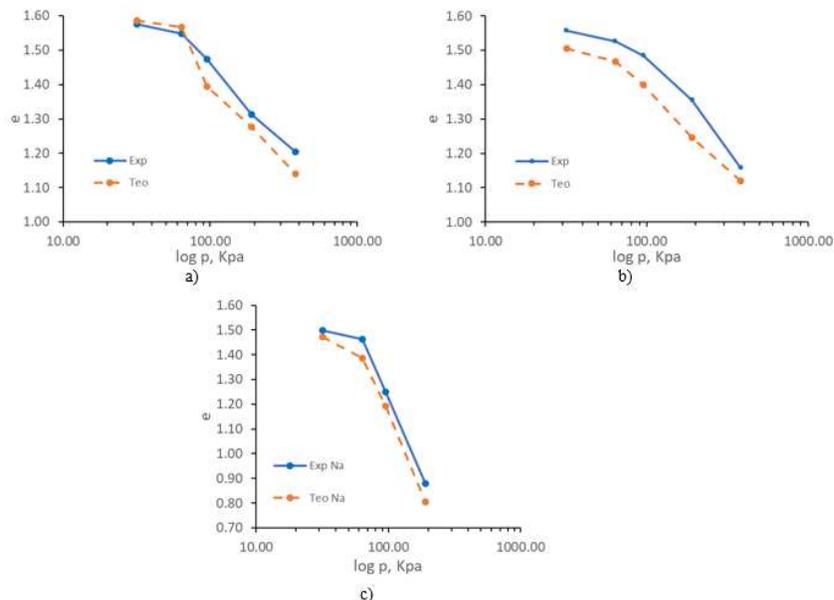
**Figura 184.** Comparación teórica – experimental de las curvas de compresibilidad de muestras a Sw = 80%. a) Réplica 1, b) Réplica 2 y c) Réplica suelo mezclado con cloruro de sodio.

**Comportamiento y modelación de suelos dispersivos de la ciudad de Rioverde,  
S.L.P.**

**Tabla 132.** Comparación teórico-experimental de comportamiento volumétrico de muestras con grado de saturación de 100%.

Sw = 100%							
	$\sigma_n$ (Kpa)	$p'$ (kpa)	$e_f$	$e_{teorico}$	$(V_{teo}-V_{Exp})^2$	ECM	$R^2$
Réplica 1	31.78	31.78	1.575	1.587	0.00014	0.0039	0.9732
	63.57	63.66	1.548	1.567	0.00036		
	95.35	95.45	1.474	1.395	0.00632		
	190.71	190.80	1.313	1.276	0.00137		
	381.41	381.51	1.203	1.139	0.00411		
Réplica 2	31.78	31.78	1.558	1.505	0.00283		
	63.57	63.66	1.526	1.468	0.00338		
	95.35	95.45	1.485	1.399	0.00726		
	190.71	190.80	1.355	1.246	0.01191		
	381.41	381.51	1.158	1.119	0.00154		
$\Sigma =$					0.03922		

Sw = 100%, Suelo mezclado con Sodio							
$\sigma_n$ (Kpa)	$p'$ (kpa)	$e_f$	$e_{teorico}$	$(V_{teo}-V_{Exp})^2$	ECM	$R^2$	
31.78	31.78	1.497	1.47	0.00068	0.0037	0.9977	
63.57	63.66	1.463	1.39	0.00580			
95.35	95.45	1.249	1.19	0.00310			
190.71	190.80	0.879	0.81	0.00529			
$\Sigma =$					0.01486		



**Figura 185.** Comparación teórica – experimental de las curvas de compresibilidad de muestras a Sw = 80%. a) Réplica 1, b) Réplica 2 y c) Réplica suelo mezclado con cloruro de sodio.

**Tabla 133.** Análisis estadístico de confianza y correlación de resultados de simulación de comportamiento volumétrico.

<b>Grado de Dispersión</b>	<b>Variable comparada</b>	<b>Sw %</b>	<b>Error Cuadrático medio</b>	<b>Coef. De Correlación múltiple al Cuadrado</b>
Intermedio	Relación de Vacíos	60	0.0012	0.9859
	Relación de Vacíos	80	0.0026	0.9804
	Relación de Vacíos	100	0.0039	0.9732
Alto	Relación de Vacíos	60	0.0154	0.8482
	Relación de Vacíos	80	0.0174	0.9170
	Relación de Vacíos	100	0.0037	0.9977