UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE RETENCIÓN DE AGUA PARA RIPIOS DE LIXIVIACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DEL PAPEL FILTRO

Memoria de Título presentada por

Alejandro René Deulofeu Zegers

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Jaime Musso Hott

Junio de 2022

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA TESIS:

ANÁLISIS DE LA CURVA SWRC MEDIANTE EL MÉTODO DEL PAPEL FILTRO PARA EFECTOS DE LA DESATURACIÓN EN RIPIOS DE LIXIVIACIÓN

AUTOR:

ALEJANDRO RENÉ DEULOFEU ZEGERS

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERÍA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Jaime Musso .....

Gonzalo Suazo .....

Valparaíso, Chile, Junio de 2022

AGRADECIMIENTOS

Agradecer por sobre todo y de todo corazón a mi madre Julia, por ayudarme, protegerme y guiarme en cada momento, por el sacrificio, esfuerzo y ganas que entregó, para que yo me desarrollara en mi carrera universitaria y lograra mis metas, sin ti mama nada de esto sería posible.

Agradecer también a Jaime Musso por haber confiado en mí para llevar a cabo esta investigación, por compartir conmigo sus conocimientos, por su colaboración y buena disposición para lograr este objetivo. A todos los que conforman Lemco por ayudarme en todo que necesité, sobre todo a don René Martínez, Maximiliano Vásquez y Don Nelson por su buena onda, disposición y por el tiempo invertido en ayudarme. A todos los que de alguna forma se involucraron en esta investigación ya sea ayudándome a elaborar probetas o acompañarme mientras esperaba lograr la humedad deseada.

Agradezco mi familia por acompañarme en este proceso, en especial a mi abuelo René Zegers por inculcarme su manera de ser y guiarme cuando más lo necesité, a mi hermano André por soportarnos mutuamente, a mi tía Inelia por siempre entregarme cariño y soporte, a todos mis primos en especial al Pipe por ayudarnos cada vez que lo necesitamos. A mi viejo y a todo el resto de los familiares que me apoyaron en este camino, y a mis amigos de San Felipe, Peña Blanca y la UTFSM, que gracias a ustedes lograba juntar motivación y apoyo para seguir con esas largas noches de estudio, certámenes, pichangas y carretes.

Agradecer a Rocío por su cariño, por siempre apoyarme, estar conmigo y acompañarme hasta en las situaciones más adversas, por tus retos y preocupaciones hoy termina este difícil camino. A mis amigos: Watis, Pipe, Javier, Feilei y Zelaya por su apañe y soporte en todos estos años. También una mención especial a los tigritos y a todos aquellos que conocí en la Universidad con los que generamos grandes lazos de amistad: Lalo, Robert, Juani, Franco, Tomi, Henry, Sebita, Joaking, Monosky, Muchon, Martin, Cascot y muchos más, a todos los demás compañeros de carrera que compartimos ramos, equipos de futbol, compañeros de estudio, ayudantes y profesores que aportaron en mi desarrollo universitario.

Tata lo logré, te amo mucho.

RESUMEN

La extracción de mineral genera inmensas cantidades de desechos, dentro de los residuos masivos mineros, los ripios de lixiviación, ya sea en pilas para extraer mediante solución acida el mineral de interés restante del material chancado o en botaderos posterior a la extracción, presentan cambios en su estabilidad físico-química dependiendo del contenido de humedad, poniendo en riesgo la estructura donde se almacenan los residuos frente a un eventual solicitación externa. No obstante, los desafíos implicados en la ingeniería del diseño, construcción y posterior cierre luego de su vida útil, implica buscar técnicas para mejorar el conocimiento sobre el comportamiento de las propiedades de los suelos no saturados. Para concretar este propósito se practican distintos tipos de ensayos directos o indirectos para obtener la succión (propiedad clave). Sin embargo, a pesar de los variados ensayos experimentales vigentes para obtener la succión, ningún método está exento de daño en su equipo debido a la naturaleza acida de los ripios de lixiviación.

En relación al comportamiento no saturado, es de interés de modo de poder contribuir a la evaluación de su estado tensional y permeabilidad de estos materiales, es mediante la curva de retención de agua del suelo o soil water retention curve (SWRC) en inglés. Esta curva grafica la succión matricial que ejerce el fluido versus el contenido de humedad que presenta el suelo, puede ser relacionada con propiedades fundamentales del suelo no saturado, como son la resistencia al corte, la permeabilidad y el hinchamiento. Por lo que el objetivo de esta investigación es elaborar herramientas e instrumentos para obtener la succión matricial mediante un método de laboratorio experimental que se adapte de buena manera la naturaleza de los ripios de lixiviación, sin sufrir daños en su equipamiento y graficar a través de la SWRC los resultados obtenidos mediante un ajuste matemático que se acomode de mejor manera a las distintas granulometrías que se presentan este suelo, comparando con resultados y estimaciones obtenidas a partir de otros métodos concluyentes. Ante las buenas estimaciones obtenidas por el método, para reproducir realmente el comportamiento de estos materiales, se propone una nueva curva a partir de solución acida para describir el comportamiento in situ de estos residuos mineros.

En este contexto, se implementó y llevó a cabo en el laboratorio del LEMCO el método del papel filtro, debido a los equipos y procedimiento con los que se desarrolla el ensayo, este equipamiento no sufre ningún tipo de alteración en presencia de un bajo pH, ya que la mayor parte está constituida por material plástico y este no reacciona ni se degenera en contacto del ácido. En la metodología se confeccionaron los contenedores y moldes requeridos para el procedimiento experimental detallado en la norma ASTM D5298-16, con énfasis en la resistencia a la corrosión y se utilizó la curva de calibración que entrega esta norma para los papeles Whatman N°42, adaptados los ajustes matemáticos se modelan de manera satisfactoria las características de los ripios de lixiviación.

Por consiguiente, se presentan los resultados obtenidos al ensayar el método del papel filtro a dos muestras de ripios de lixiviación, ambas provenientes de distintas ubicaciones en un mismo botadero de ripios de la industria minera nacional, cada espécimen ensayado en tres ocasiones , graficando así mediante el ajuste de Fredlund & Xing (1994) los datos obtenidos utilizando la curva de calibración de la norma ASTM D5298-16. Demostrando que los resultados obtenidos son concluyentes y concordantes con publicaciones existentes, lo que abre paso al desarrollo de la curva de retención de solución acida o en inglés “soil acid retention curve” (SARC) en la cual se utiliza una solución con ácido sulfúrico similar a la que reciben los ripios en las mineras, por lo que modela un comportamiento más cercano a el comportamiento real del suelo no saturado. El método del papel filtro no tuvo inconvenientes al utilizar esta solución acida y obtuvo resultados congruentes a la granulometría del material ensayado y valores distintos a los obtenidos mediante la utilización de agua. Se contrasta en el aumento del límite de saturación en un 5% aproximadamente y una mayor permeabilidad con respecto al ensayo tradicional con agua.

ABSTRACT

The extraction of mineral generates immense amounts of waste, within the massive mining waste, the leaching waste, either in heaps to extract the remanent mineral of interest from ripped material through acid solution or in dumps after extraction, they present changes in its physical-chemical stability depending on the moisture content, putting at risk the waste storage structure in face of a possible external phenomenon. However, the challenges involved in the engineering of the design, construction and subsequent closure after its useful life, allow the search for techniques to improve the knowledge about the behavior of the properties of unsaturated soils. To achieve this purpose, different types of direct or indirect tests are carried out to obtain suction (key property). Notwithstanding, despite the various experimental tests in place to obtain suction, no method is exempt from damage to its equipment due to the acid nature of the leaching waste.

In relation to Unsaturated behavior, is of interest in order to be able to contribute to the evaluation of its stress state and permeability of these materials, is through the soil water retention curve (SWRC) or "curva de retencion de agua del suelo" in Spanish. The SWRC graphs the matrix suction exerted by the fluid versus the moisture content presented by the soil, it can be related to fundamental properties of the unsaturated soil, such as shear strength, permeability and swelling. Therefore, the objective of this research is to develop tools and instruments to obtain matrix suction through an experimental laboratory method well adapted to the nature of the leaching waste, without suffering damage to its equipment and to graph through the SWRC the results obtained of a mathematical adjustment that better accommodates the different granulometries that occur in this soil, comparing with results and estimates obtained from other conclusive methods. On the proof of the good estimates obtained by the method, to really reproduce the behavior of these materials, a new curve is proposed using an acid solution despite of water describing the on-site behavior of these mining wastes.

In this context, the filter paper method was implemented and executed in the LEMCO laboratory, due to the equipment and procedure with which the test is developed, this equipment does not suffer any type of alteration in the presence of a low pH, since most of it is made up of plastic material and this does not react or degenerate in contact with acid. In the methodology, the containers and molds required for the experimental procedure detailed in the ASTM D5298-16 standard were made, with emphasis on corrosion resistance, and the calibration curve provided by this standard for Whatman No. 42 papers was used. Once the mathematical settings were adjusted, the characteristics of the leaching cuttings are modeled in a satisfactory way.

Consequently, the results obtained when testing the filter paper method on two samples of leaching waste are presented, both from different locations in the same waste dump of Chile mining industry, each specimen tested on three occasions, thus graphing through the adjustment of Fredlund & Xing (1994) the data obtained using the calibration curve of the ASTM D5298-16 standard. Demonstrating that the results obtained are conclusive and consistent with existing publications, which opens the way to the development of the soil acid retention curve (SARC) or "curva de retención de solución acida del suelo" in Spanish, in which a solution of a percentage of sulfuric acid and water is used similar to that received by the waste in the mining facilities, so it models a behavior closer to the real behavior of the unsaturated soil. The filter paper method had no drawbacks when using this acid solution and obtained results consistent with the granulometry of the tested material and values different from those obtained by using water. It is contrasted in the increase of the saturation limit by approximately 5% and a greater permeability with respect to the traditional test with water.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS I

RESUMEN II

ABSTRACT III

ÍNDICE IV

ÍNDICE DE FIGURAS VII

ÍNDICE DE TABLAS X

1 INTRODUCCIÓN 1

2 OBJETIVOS 6

2.1 OBJETIVOS GENERALES 6
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 6
2.3 ALCANCES 6

3 MARCO TEÓRICO 7

3.1 SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS Y SWRC 7
3.1.1 AGUA DE RETENCIÓN 8
3.1.2 AGUA CAPILAR 8
3.1.3 AGUA GRAVÍFICA 9
3.2 TENSIÓN SUPERFICIAL 9
3.3 CAPILARIDAD 11
3.3.1 ALTURA CAPILAR 11
3.3.2 PRESIÓN CAPILAR 12
3.4 SUCCIÓN DEL SUELO 14
3.4.1 SUCCIÓN MATRICIAL 15
3.4.2 SUCCIÓN OSMÓTICA 16
3.5 CURVA DE RETENCIÓN DE AGUA DEL SUELO 16
3.5.1 CARACTERIZACIÓN DE LA SWRC 16
3.5.2 FORMA DE LA SWRC 20
3.6 MODELOS DE ESTIMACIÓN Y AJUSTE DE LA SWRC 21
3.6.1 BUCKINGHAM 21
3.6.2 BROOKS & COREY 22
3.6.3 BRUTSAERT 22
3.6.4 CAMPBELL 23

3.6.5 VAN GENUCHTEN 23
3.6.6 BUMB & MCKEE 24
3.6.7 VEREECKEN ET AL. 24
3.6.8 D.G. FREDLUND & XING 25
3.6.9 PEREIRA & FREDLUND 26
3.6.10 M.D. FREDLUND ET AL. 26
3.6.11 AUBERTIN ET AL. (KOVACS MODIFICADO) 28
3.6.12 PHAM ET AL. 31
3.6.13 PHAM & FREDLUND 32
3.7 PARÁMETROS DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS DE ESTIMACIÓN Y AJUSTE 33
3.7.1 ENTRADA DE AIRE (AEV) 33
3.7.2 SUCCIÓN RESIDUAL 35
3.7.3 RESISTENCIA AL CORTE 36
3.7.4 COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD 38
3.8 RESTRICCIONES DE LA SWRC 39
3.8.1 TIPO DE MUESTRA 39
3.8.2 HISTÉRESIS DE LA SWRC 41
3.8.3 PREPARACIÓN DE LA PROBETA 42

4 RELAVES MINEROS 44

4.1 DEPÓSITOS DE RELAVES 44
4.2 TRANQUES DE RELAVES 47
4.3 DEPÓSITOS DE RELAVES EN CHILE 50
4.4 COMPORTAMIENTO PARCIALMENTE SATURADO DE LOS RELAVES 52
4.4.1 INFLUENCIA DEL AGUA CAPILAR 52
4.4.2 EFECTOS RAZÓN SÓLIDO/AGUA 53
4.4.3 PERMEABILIDAD E INFILTRACIÓN 54
4.4.4 ESTABILIDAD FÍSICA Y QUÍMICA DE LOS TRANQUES DE RELAVES 55
4.4.4.1 Estabilidad Física 55
4.4.4.2 Estabilidad Química 58
4.4.5 COMENTARIOS Y DISCUSIÓN 61

5 RIPIO DE LIXIVIACIÓN, ROCA ESTÉRIL, SOBRECARGA, ESCORIA, DESMONTE Y MINERAL DE BAJA LEY. 61

5.1 INTRODUCCIÓN 61
5.2 BOTADEROS 63
5.2.1 BOTADEROS EN LADERAS 64
5.2.2 BOTADEROS EN PILAS 64
5.2.3 TIPOS DE BOTADEROS 64
5.2.4 OPERACIONES EN BOTADEROS 65
5.3 ROCA ESTÉRIL Y/O SOBRECARGA 67
5.4 RIPIOS DE LIXIVIACIÓN 69

6 LIXIVIACIÓN 73

6.1 TIPOS DE LIXIVIACIÓN 74
6.1.1 LIXIVIACIÓN EN BOTADEROS 74
6.1.2 LIXIVIACIÓN EN PILAS 75
6.1.2.1 Altura del lecho 77
6.1.2.2 Flujo especifico 77
6.1.2.3 Tiempo de lixiviación 77
6.1.2.4 Concentración y dosificación de ácido sulfúrico 78
6.1.2.5 Sistema de drenaje y colección 78
6.1.3 LIXIVIACIÓN EN TANQUES 78
6.1.4 LIXIVIACIÓN POR AGITACIÓN 79
6.1.5 LIXIVIACIÓN IN SITU 80
6.1.6 BIOLIXIVIACIÓN 81
6.1.6.1 Biolixiviación indirecta 81
6.1.6.2 Biolixiviación directa 81

7 TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE LA SWRC EN LABORATORIO 83

7.1 MÉTODOS DIRECTOS 83
7.1.1 TENSIÓMETRO 83
7.1.2 SONDA DE SUCCIÓN 84
7.2 MÉTODOS INDIRECTOS 85
7.2.1 REFLECTÓMETRO (TDR) 85
7.2.2 SENSOR DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (ECS) 86
7.2.3 SENSOR DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (TCS) 87
7.2.4 PSICRÓMETROS 87
7.2.4.1 Psicrómetro de termopar (thermocouple psychrometers) 88
7.2.4.2 Psicrómetro de bucle húmedo 88
7.2.5 ASTM D6836-16 89
7.2.5.1 Higrómetro de espejo frio 89
7.2.5.2 Método traslación de ejes 90
7.2.6 ASTM D5298-16, MÉTODO DEL PAPEL FILTRO 92

8 MÉTODO DEL PAPEL FILTRO EN UTFSM 95

8.1 APARATOS Y MATERIALES 95
8.2 RIPIOS DE LIXIVIACIÓN 95
8.2.1 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA 96
8.2.2 LÍMITE DE SATURACIÓN ws 96
8.3 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA 97
8.3.1 RESULTADOS DE PREPARACIÓN DE LA MUESTRA 99
8.4 PROCEDIMIENTO MÉTODO PAPEL FILTRO 99
8.5 CURVA DE RETENCIÓN DE ÁCIDO DEL SUELO, SARC 105

9 ANÁLISIS DE LAS SWRC RESULTANTES DEL MÉTODO DEL PAPEL FILTRO PARA RIPIOS LIXIVIADOS. 106

9.1 ANÁLISIS DE DATOS 107
9.2 SWRC DE RIPIO DE LIXIVIACIÓN L1 108
9.3 SWRC DE RIPIO DE LIXIVIACIÓN L2 110
9.4 VALORES DE PARÁMETROS RELEVANTES PARA LA OBTENCIÓN DE LA SWRC 112
9.5 SARC DE RIPIO DE LIXIVIACIÓN L1 113
9.6 COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD NORMALIZADO 114
9.7 COMENTARIOS DEL MÉTODO 119

10 CONCLUSIONES 120

11 BIBLIOGRAFÍA 122

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 . MAPA CONCEPTUAL DE SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS Y TOTALMENTE SATURADOS. 1
FIGURA 2. GRÁFICO REPRESENTATIVO DE CANTIDAD DE FAENAS ABANDONADAS POR TIPO EN CHILE. 3
FIGURA 3. LÍNEA DE TIEMPO DE LA EVOLUCIÓN DE LA NORMATIVA APLICABLE A FAENAS MINERAS. 4
FIGURA 4. REPRESENTACIÓN DEL SUELO PARCIALMENTE SATURADO (FREDLUND, 1995) 8
FIGURA 5. FUERZAS INTERMOLECULARES QUE ACTÚAN SOBRE LA PIEL CONTRÁCTIL (FREDLUND ET AL.2012) 9
FIGURA 6. LAS FUERZAS DE TENSIÓN SUPERFICIAL ASOCIADAS CON LA SUPERFICIE CURVA BIDIMENSIONAL. (FREDLUND ET AL.2012) 10
FIGURA 7. MODELO FÍSICO DE LA CAPILARIDAD (FREDLUND TE AL. 2012) 12
FIGURA 8. RELACIÓN DE LA SUCCIÓN MATRICIAL Y EL TAMAÑO DE PORO PARA VARIOS SUELOS (FREDLUND ET AL. 2012) 13
FIGURA 9. SUCCIÓN TOTAL, MATRICIAL Y OSMÓTICA MEDIDA EN ARCILLA REGINA COMPACTADA (KRAHN Y FREDLUND, 1972) 15
FIGURA 10. ELEMENTOS MOSTRANDO EL ESTADO DE ESFUERZO EN SUELOS SATURADOS Y PARCIALMENTE SATURADOS (D.G. FREDLUND 2000). 19
FIGURA 11. ZONAS DE LA SWRC (FREDLUND 2000). 20
FIGURA 12. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE SUCCIÓN REPRESENTATIVAS PARA ARENAS, LIMOS Y ARCILLAS (LU NING Y LIKOS W.J. 2004). 21
FIGURA 13. SWRC ESTABLECIDAS POR BUCKINGHAM 1907 (NARASIMHAN 2007) 22
FIGURA 14. CURVA OBSERVADA Y CALCULADA DE LAS PROPIEDAD HIDRÁULICAS DEL SUELO "TOUCHET SLIT LOAM"(VAN GENUTCHEN 1980) 24
FIGURA 15. LA SWRC NORMALIZADA PARA TODO RANGO DE VALORES DE LA SUCCIÓN. (FREDLUND Y XING 1994) 25
FIGURA 16. MEJOR ESTIMACIÓN PARA CADA UNA DE LAS CINCO SWRC USANDO LAS PTF PROPUESTAS: SILTY CLAY LOAM $R2$= 0.80; LOAM $R2$ = 0.98; SAND $R2$=0.99; SANDY LOAM $R2$=0.97; SILT LOAM $R2$=0.99. (M.D. FREDLUND ET AL. 2002) 28
FIGURA 17. CURVA DE RETENCIÓN DE AGUA OBTENIDA MEDIANTE MÉTODO MK PARA UNA ARENA FIRME, UNIFORME Y DENSA (AUBERTIN ET AL 2003). 30
FIGURA 18. SWRC PARA ARENA ARTIFICIAL, LIMO Y ARCILLA (Q. PHAM Y FREDLUND 2005). 32
FIGURA 19. TÍPICA SWRC PARA UN SUELO QUE CAMBIA DE VOLUMEN CON LA INDICACIÓN DE LA SIGNIFICANCIA DE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS (Q. PHAM Y FREDLUND 2008). 33
FIGURA 20. REGIONES TÍPICAS DE LA CURVA DE RETENCIÓN DE AGUA (PÉREZ 2008) 34
FIGURA 21. CURVA DE RETENCIÓN DE AGUA CON PUNTOS TÍPICOS (FREDLUND Y RAHARDJO 1993) 35
FIGURA 22. REPRESENTACIÓN TRIDIMENSIONAL DEL ESFUERZO DE COMPRESIÓN EXPRESADO EN TÉRMINOS DE VARIABLES DE ESTADO DE ESFUERZO (VANAPALLI ET AL. 1999) 37
FIGURA 23. RESISTENCIA A LA FALLA VS SUCCIÓN Y ESFUERZO NORMAL NETO PARA ARENA ARCILLOSA DE MADRID (ESCARIO Y SÁEZ 1986) 37
FIGURA 24. VALOR DE ϕbCONTRA SUCCIÓN (GAN, FREDLUND Y RAHARDJO,1988) 38
FIGURA 25. A) UNA SWRC TÍPICA. B) COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA AL CORTE DEL SUELO Y COMO SE RELACIONA CON LA SWRC.(S.K.VANAPALLI ET AL. 1996) 38
FIGURA 26. LAS FUNCIONES DE PERMEABILIDAD EMPÍRICAS DE GARDNER SE MUESTRAN PARA UNA ARENA Y UN LIMO ARCILLOSO. 39

Figura 27. Ilustracion de la influencia del estado incial de la muestra en la curva de retencion (Fredlund 2002) 40
Figura 28. Descripcion grafica de las curvas intermediarias entre la humectacion(wetting) y secado(drying), tambien las curvas inciaiales (D.G.Fredlund 2000) 41
Figura 29. (a)Histeresis de la curva caracteristica del suelo. (b) Efecto del angulo de contacto y (c) el efecto "ink bottle" como potencial mecanismo de histeresis (M Tuller, 2005) 42
Figura 30. Influencia de la densidad seca de la muestra en la SWRC durante el secado(Yulong chen 2018) 43
Figura 31. Tranque de relaves minera Spence Growth Option (CONPAX) 45
Figura 32. Embalse de relaves "La Brea" Caserones (SERNAGEOMIN) 45
Figura 33. Relaves de alto espesamiento (Minería chilena w3.mch.cl) 46
Figura 34. Relaves filtrados en Cerro Lindo, Ica, Perú (NEXA) 46
Figura 35. Embancamiento de relaves en la bahía Chañaral (Google Maps) 47
Figura 36. Componentes de un tranque de relaves (SERNAGEOMIN) 48
Figura 37. Esquemas ilustrativos de tranques construidos aguas arribas, aguas abajo y verticalmente (Modificado de Vick 1983) 49
Figura 38. Buena y mala práctica en construcción aguas arriba. La napa freática debe cruzar por debajo de la presa para reducir la susceptibilidad a licuefacción (Kossoff et. al., 2014) 49
Figura 39. Cantidad de depósitos de relaves por región (modificado de "análisis de catastro de depósito de relaves en chile y guía de estructura de datos" 2020) 50
Figura 40. Estado de los depósitos por región (modificado de "análisis de catastro de depósito de relaves en chile y guía de estructura de datos" 2020) 50
Figura 41. Tipos de depósitos de relaves (modificado de "análisis de catastro de depósito de relaves en chile y guía de estructura de datos" 2020) 51
Figura 42. Métodos de construcción de tranques de relaves (modificado de "análisis de catastro de depósito de relaves en chile y guía de estructura de datos" 2020) 51
Figura 43. Conductividad hidráulica para suelos parcialmente saturados (Khire et al. 2000) 55
Figura 44. Modelo conceptual de una presa de residuos mineros indicando los factores que afectan su funcionamiento (Modificado de Zandarín et al., 2009) 56
Figura 45. Vertido de lamas en cubeta y arena en talud desde la cresta del tranque (modificado Valenzuela 2016) 56
Figura 46. Mezclas sólido/líquido: pulpa, pulpa de alta densidad, pasta y torta, con respectivos equipamientos de obtención y transporte asociado al esfuerzo de fluencia. (Modificado Landriault, 2002) 58
Figura 47. Etapas de oxidación de la pirita($\boldsymbol{FeS2}$) (Modificado Broughton y Robertson 1992) 60
Figura 48. Drenaje minero ácido (Guía metodológica para la estabilidad química de faenas e instalaciones mineras 2015) 60
Figura 49. Catastro de faenas abandonadas actualizado al 2019 61
Figura 50. Representación de la ubicación del botadero. 63
Figura 51. Esquema de botaderos en laderas. 64
Figura 52. Esquema de compactación del botadero y problemas de homogeneidad(modificado Portal Minero) 66
Figura 53. Fallas posibles debido a grietas en material suelto. (modificado Portal Minero) 67
Figura 54. Vista de un botadero de roca estéril en el noroeste de Australia(G. McPhail 2017) 68
Figura 55. Sobrecarga de la mina de cobre Chuquicamata (Edward Burtynsky 2017) 68
Figura 56. Apilador descargando ripio en el botadero (Carolina Vergara SRK 2019) 69
Figura 57. Representación de aglomerados (a) lixiviados (b) sin lixiviar (Modificado E.Domic 2001) 70
Figura 58. Comparación de las curvas granulométricas material chancado aglomerado y ripios de lixiviación (Carolina Vergara 2021) 71
Figura 59. Técnicas de lixiviación aplicadas a la minería (Fundamentos para la implementación de minería in situ, C. Bahamóndez 2014) 73
Figura 60. Sistemas de formación y operación de botaderos para lixiviación. A la izquierda dos formas de operación de camiones y bulldozer. A la derecha corte transversal de una operación de lixiviación en botadero. (E. Domic 2001) 74
Figura 61. Irrigadores en pilas de lixiviación. (NETAFIM) 75
Figura 62. Esquema de formación de una pila con camión y apilador, notar la instalación simultanea de la membrana LDPE bajo de la pila sin ser afectada por la operación de descarga. (E. Domic 2001) 76
Figura 63. Esquema del sistema de filtración en la pila (López E. 2012) 77
Figura 64. Mecanismo que da origen a la lixiviación 77
Figura 65. Corte transversal de un tanque de lixiviación de minerales (E. Domic 2001) 79
Figura 66. A la izquierda un agitador neumático y a la derecha un agitador mecánico (Sepro mineral systems) 80

Figura 67. Proceso de recuperación in situ (Nuclear Regulatory Commission) 80
Figura 68. A la izquierda "Thiobacillus ferrooxidans" y a la derecha "Thiobacillus thiooxidans". 81
Figura 69. Proceso de biolixiviación aplicado a la obtención de cobre a partir del material original (Springer 2009) 82
Figura 70. Mapa conceptual de métodos para obtener la succión en laboratorio 83
Figura 71. Tensiómetro (Fotografías y gráficas de QAMPO) 84
Figura 72. Mini sonda de succión para medir la succión matricial (D. Fredlund et. al 2002) 84
Figura 73. Reflectrometro marca Megger 86
Figura 74. Un sistema de medicion a contacto de la electro conductivdad del suelo (LSUAgcenter 2011) 86
Figura 75. TCR24 - Sistema de adquisición de datos para la conductividad térmica del suelo. 87
Figura 76. Psicrómetro de termopar Peltier de unión única enjaulado con pantalla (según Brown y Collins, 1980). 88
Figura 77. Psicómetro que indica y almacena datos de temperatura de bulbo húmedo, punto de rocío y HRA 89
Figura 78. WP4C higrómetro de espejo frio(Morphola) 90
Figura 79. Vista de sección transversal de plato cerámico en cámara de presión para la curva de retención (Pa.Suriya 2015) 91
Figura 80. Dibujo esquematico de la medicion de la succion total y matricial mediante el metodo de papel filtro (Bulut y Leong 2008) 92
Figura 81. Ripios de lixiviación en estudio. 95
Figura 82. Curva granulométrica de L1 y L2 96
Figura 83. Muestras totalmente secas. (Izq.) L1, (Der.) L2. 97
Figura 84. Molde de PVC para muestras de ripio. 97
Figura 85. Compactación por capas para muestra en molde de PVC. 98
Figura 86. Moldes con muestras en proceso de saturación. (Izq.) L2 y (Der.) L1 98
Figura 87. Papel filtro Whatman n°42. 99
Figura 88. Esquema molde para ripios de lixiviación con PVC y plásticos. 100
Figura 89. Esquema emparedado papel filtro entre moldes de muestra. 100
Figura 90. Probeta conformada por dos moldes con muestra y emparedado de papel filtro entre ambas muestras. 101
Figura 91. Probeta sellada con huincha aisladora. 101
Figura 92. Probetas terminadas listas para el equilibrio térmico de 7-14 días. 102
Figura 93. Medición de contenedores metálicos para el papel filtro en balanza digital de precisión. 102
Figura 94. Horno con contenedores metálicos secando el papel filtro húmedo. 103
Figura 95. Curvas de calibración de contenido de agua-succión para humedecer 104
Figura 96. Moldes con muestra compactada en proceso de saturación con solución acida. 105
Figura 97. Probetas saturadas en ácido luego de la extracción del papel filtro 106
Figura 98. Contenido de agua del papel filtro versus contenido gravimétrico de agua en el suelo. 107
Figura 99. Succión matricial versus contenido gravimétrico de agua en el suelo. 107
Figura 100. Curva de retención de agua del ripio de lixiviación L1 8-9, ajustada mediante Fredlund & Xing 1994. 108
Figura 101. Curva de retención de agua del ripio de lixiviación L1 23-9, ajustada mediante Fredlund & Xing 1994. 108
Figura 102. Curva de retención de agua del ripio de lixiviación L1 8-10, ajustada mediante Fredlund & Xing 1994. 109
Figura 103. Curvas de retención de agua del ripio de lixiviación L1, ajustadas mediante Fredlund & Xing 1994. 109
Figura 104. Curva de retención de agua para el ripio de lixiviación L2 8-9, ajustada mediante Fredlund & Xing 1994. 110
Figura 105. Curva de retención de agua para el ripio de lixiviación L2 23-9, ajustada mediante Fredlund & Xing 1994. 111
Figura 106. Curva de retención de agua para el ripio de lixiviación L2 8-10, ajustada mediante Fredlund & Xing 1994. 111
Figura 107. Curvas de retención de agua del ripio de lixiviación L2, ajustadas mediante Fredlund & Xing 1994. 112
Figura 108. SARC para ripio de lixiviación L1 113
Figura 109. Comparación entre SARC y SWRC del ripio de lixiviación L1 114
Figura 110. Coeficiente de permeabilidad para L1 8-9 115
Figura 111. Coeficiente permeabilidad para L1 23-9 115
Figura 112. Coeficiente de permeabilidad para L1 8-10 115
Figura 113. Coeficientes de permeabilidad para L1 116
Figura 114. Coeficientes de permeabilidad para L2 8-9 116
Figura 115. Coeficiente de permeabilidad para L2 8-23 116
Figura 116. Coeficiente de permeabilidad para L2 8-10 117

Figura 117. Coeficientes de permeabilidad para L2 117
Figura 118. Coeficiente de permeabilidad para L1 SARC 117
Figura 119. Coeficiente de permeabilidad L1 vs L1 SARC 118
Figura 120. Coeficiente permeabilidad para L2 vs L1 SARC 118

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ecuaciones de tensiones efectivas en suelos parcialmente saturados (Modificado de Alfaro, 2008) 18
Tabla 2. Variación de la pendiente límite con la concentración de sólidos en una pulpa de relaves (Modificado Ramírez 2007). 54
Tabla 3. Fuentes potencialmente generadoras de ADM durante la operación y al cierre de una faena minera (modificado guía metodológica para la estabilidad química de faenas e instalaciones mineras 2015) 59
Tabla 4. Factores que afectan la hidrología de la lixiviación en botaderos 72
Tabla 5. Curvas de calibración para papel filtro Whatman n°42 (Modificado Bicalho et al). 93
Tabla 6. Caracterización geotécnica de L1 y L2. 96
Tabla 7. Límite de saturación para L1 y L2. 97
Tabla 8. Resumen de resultados de preparación de la muestra 99
Tabla 9. Tabla resumen de puntos de la SWRC donde contenido gravimétrico de agua se asocia a la succión obtenida mediante el método del papel filtro. 112
Tabla 10. Resumen de parámetros de ajuste para modelo de Fredlund & Xing 1994. 113
Tabla 11. Parámetros de ajuste para modelo de Fredlund & Xing 1994. 114

1 INTRODUCCIÓN

Karl von Terzaghi, ingeniero Austriaco Estadounidense conocido como el padre de la mecánica de suelos, estuvo desde el comienzo de su carrera dedicando todos sus esfuerzos para hallar el método racional para resolver todos los problemas relacionados con la ingeniería de suelos y cimentaciones. La coronación de todos sus años de esfuerzo se da en 1925, con la publicación de "Erdbaumechanik", considerada hoy como el punto de partida de la ingeniería geotécnica. Desde este punto en adelante la mecánica de suelos pasa a ser estudiada en todo el mundo obteniendo grandes avances, lo que genera una base científica reconocida para continuar investigando para la posteridad. La mecánica del suelo es una ciencia aplicada relativamente joven. Terzaghi publicó su versión en inglés de "Theoretical Soil Mechanics"(Terzaghi, 1943). El libro proporcionó un contexto basado en la ciencia para analizar el comportamiento físico de suelos saturados. La ingeniería geotécnica ha cambiado de muchas maneras desde la década de 1940. Los procedimientos para realizar investigaciones subterráneas han sufrido algunos cambios, pero los procedimientos de investigación siguen siendo bastante similares. La obtención de muestras en profundidad aún se realiza mediante perforación obteniendo así muestras de suelo perturbadas y no perturbadas tomados a intervalos para pruebas de laboratorio posteriores. Sin embargo, la forma en que obtenemos nuestras soluciones de ingeniería geotécnica ha cambiado drásticamente. Terzaghi y sus contemporáneos estudiaron el contexto de la mecánica del suelo en un momento en que las herramientas para resolver problemas matemáticos eran significativamente diferentes de las herramientas que hay disponibles hoy en día.

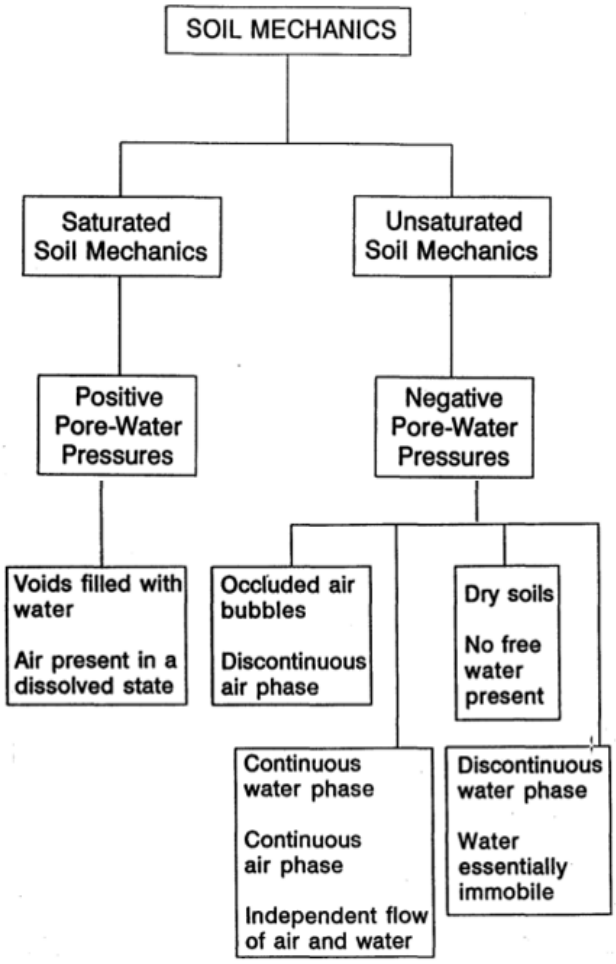

Figura 1 . Mapa conceptual de suelos parcialmente saturados y totalmente saturados.

La mecánica del suelo implica una combinación de ingeniería mecánica, comportamiento del suelo y propiedades de los suelos. Esta descripción es bastante amplia y puede abarcar una gran gama de tipos de suelos. El desarrollo de la mecánica de suelos clásica ha dado lugar a un énfasis en tipos particulares de suelos, suelos comunes como gravas, arenas, limos y arcillas. Estos suelos pueden estar en una condición límite como lo es con los poros saturados de agua o tener otros fluidos rellenando los vacíos, como aire lo que conlleva al suelo a estar seco. Estos materiales han constituido el énfasis principal en numerosos libros de texto de mecánica de suelos. Cada vez más, se reconoce que se debe prestar atención a un espectro más amplio de materiales del suelo.

Existen numerosos materiales de suelo encontrados en la práctica de la ingeniería cuyo comportamiento no es consistente con los principios y conceptos de la mecánica clásica de suelos saturados. La presencia de más de una fase fluida, por ejemplo, da como resultado un comportamiento del material que es un desafío para la práctica de la ingeniería. Los suelos que están parcialmente saturados (es decir, existe agua y aire en los huecos) forman la categoría más grande de suelos que no se adhieren al

comportamiento de la mecánica clásica de suelos saturados como se muestra en la Figura 1.

Con respecto a los estudios historicos de la mecanica de suelos parcialmente saturada puede divirse en tres periodos. Antes de 1965, en el primer periodo fueron realizadas investigaciones para validar el concepto de las tensiones efectivas (Bishop, 1959) y (Aitchison, 1961). Durante este periodo se modifico el concepto de las tensiones efectivas para analizar el comportamiento de los suelos parcialmente saturados.

El segundo periodo comprendio desde 1965 a 1987 donde se realizaron muchas investigaciones e.g. para llegar a utilizar dos variables de estado para describir el comportamiento parcialmente saturado. Pero en 1977, (Delwyn G. Fredlund & Morgenstern, 1977) instauraron dos variables de estado tensional en los suelos la "tension neta" (tension total menos presion de aire en los poros) y la "succion"(presion de aire menos presion de agua en los poros) con los que se podia describir el comportamiento de los suelos no saturados. Durante este peridoso se desarrollaron estructuras independientes para modelar comportamientos en el cambio de volumen y de corte de forma independiente en terminos des estas dos variables.

En el tercer y mas reciente periodo, desde 1987, se caracterizo el suelo mediante modelos matematicos basados en su grado de saturación mediante la succion, con la ayuda de la curva de retencion de agua del suelo. Se investigó el limite elastico de los suelos parcialmente saturados cuando son sometidos a carga y descarga (histeresis), y también se comenzo a enlazar el comportamiento de cambio de volumen con la resistencia al corte desarrollandose modelos elastoplásticos. Con el avance de la tecnología los equipos de laboratorio permitieron investigar y medir de forma mas precisa el comportamiento de los suelos parcialmente saturados. Algunos estudios han demostrado los efectos del grado de saturación en la deformación y resistencia al corte del suelo, sobre todo en suelos con gran capacidad expansiva o colapsable (Meza, 2005).

Es importante estudiar la teoria de esta areá de la mecánica de suelos ya que es lo mas cercano a la realidad en practicas ingenieriles como por ejemplo, estabildiad de taludes, asentamiento en fundaciones, problemas asociados a transmision de contaminantes quimicos (conductividad hidráulica), entre otros. Al incluir el parámetro de la succión se pueden generar soluciones mas acotadas al comportamiento real del suelo, disminuyendo asi el sobredimiensionamiento en las estructuras.

La diferenciación entre suelos saturados y suelos parcialmente saturados se vuelve necesaria debido a diferencias básicas en la naturaleza del material y la respuesta mecánica de este. Esto es debido a la diferencia en la presión de poros que ejercen los fluidos dependiendo si se encuentran en fase continua o discontinua, esto se puede explicar de manera sencilla, cuando el aire esta disuelto en el agua la fase del agua es continua y la presión de poro es positiva (suelo saturado) en cambio a medida que pequeñas burbujas de aire se empiezan a juntar hasta que logran crear una fase continua (fluida) de aire y discontinua de agua (agua genera meniscos por tensión superficial), la presión de poros es negativa. Para luego cuando todos los poros se logren colmar de aire las presión de los poros será igual a la presión atmosférica. Por lo que nos encontramos con cuatro fases dentro del comportamiento de los suelos parcialmente saturados, dos de las fases se equilibran bajo las presiones aplicadas (en la "membrana contráctil" y las partículas sólidas o suelos) y las otras dos fluyen bajo las presiones aplicadas (al aire y agua).

Muchos tipos de suelos permanecen en condiciones parcialmente saturadas, pero esta investigación se centra en un grupo de gran importancia como son los residuos mineros masivos, estos residuos provienen de los procesos mineros que se llevan a cabo a nivel mundial y tienen características tanto físicas como químicas muy variadas dependiendo tanto del lugar geográfico del yacimiento como del proceso minero al cual fue expuesto el material.

En Chile la minería desarrollo nuestra identidad como nación y ha sido clave para el desarrollo del país, al ser el mayor productor de cobre en el mundo con casi el 30% de la producción cuprífera mundial (5,6 millones de toneladas) debiésemos preocuparnos ya que, por un proceso conocido como la extracción del cobre, se genera alta cantidad de residuos mineros y diferentes tipos de ellos. Los residuos mineros masivos más conocidos son los relaves provenientes del proceso de flotación. Por ejemplo, en la extracción del cobre dependiendo de la ley del mineral, ya sea 7% o 0.7%. Una tonelada de cobre producida para 7% genera 11,5 toneladas de residuo minero, en cambio para un 0.7% genera 164,5 toneladas de residuo minero. Debido a la baja en las leyes del minería del cobre en Chile el porcentaje es aún menor que la segunda cifra, por lo que muchos residuos se generan en la fabricación del cobre. Todos estos residuos generados se acopian cerca de la extracción y se diferencian por el tipo de material acopiado (clasificados según los procesos anteriores), como lo son los depósitos de relaves (tranques, embalses y tortas), ripios de lixiviación (pilas o botaderos) y botaderos de baja ley (estériles, escorias, desmotes y marinas).

Para hacer una idea en Chile la minera estatal Codelco que genera el 30% de la producción de cobre del país, el año 2020 género en términos de residuos mineros 574 millones de toneladas, de las cuales el 69%, es decir, 398 millones de toneladas, están acopiadas en botaderos o pilas y el 31%, es decir, 175 millones de toneladas restante en tranques o embalses de relaves. Esto quiere decir que los depósitos existentes que llevan años acumulando residuos pueden llegar a tener dimensiones gigantescas, midiendo en algunos casos más de cien metros de alto y varios kilómetros de largo.

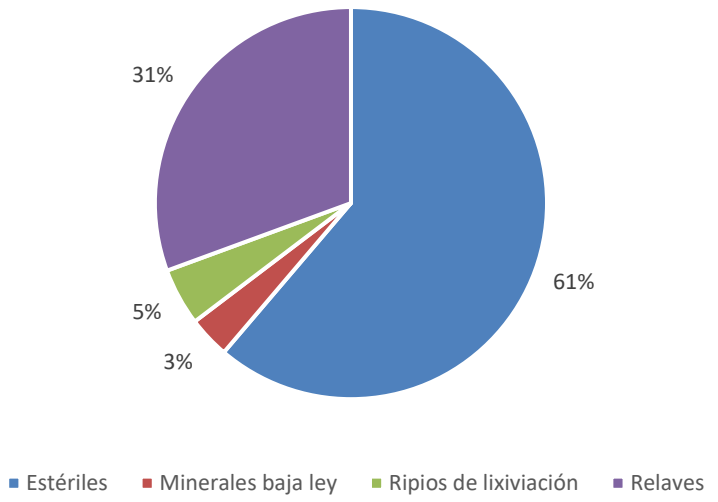

Figura 2. Gráfico representativo de cantidad de faenas abandonadas por tipo en Chile.

Otro preocupante situación viven los depósitos de faenas abandonadas en el país, ya que no cuentan con monitoreo y son miles de faenas, de las cuales por lo menos 130 son ripios de lixiviación (Figura 2). Esta investigación se basa en los ripios debido a las condiciones en que se acopian que son las pilas y botaderos. Estas estructuras de almacenaje pueden generar impactos irreversibles en el medio donde se emplazan si no fueron diseñadas de manera correcta, que debido a fenómenos climáticos como lluvias o sequias, se ven expuestos a diferentes factores que pueden afectar su estabilidad tanto física (cambios en su resistencia relacionado al grado de saturación) como química (reacciones en minerales debido al oxígeno).

Considerando esta situación es necesario mejorar la normativa aplicable a depósitos de faenas, donde solo a partir del 2004 con el decreto supremo N°132 se aprueba el reglamento de seguridad minera dando comienzo a un aumento paulatino de la regulación en este ámbito, con el mayor hito en los últimos 20 años, la creación de organismos gubernamentales que buscan proteger el medio ambiente

(MMA, SEA y SMA), estos organismos pusieron a disposición herramientas y promulgaron leyes para así abordar de manera integral el desafío de lograr una minería cada vez más sustentable, como se muestra en la Figura 3. Cabe destacar que está en proceso de tramitación una actualización al D.S. 248 que busca fortalecer el monitoreo de los depósitos de relaves a través de un plan de monitoreo integral.

Figura 3. Línea de tiempo de la evolución de la normativa aplicable a faenas mineras.

La posibilidad de aprovechar millones de toneladas de mineral cuprífero de descarte acumulado por decenas de años de operación minera, incentivó a los investigadores a comienzos del siglo XXI. Descubriendo nuevos tratamientos como la biolixiviación para aprovechar todo el material en botaderos. La importancia de la minería para la economía mundial resulta imposible de soslayar, pero al mismo tiempo no se puede dejar de mencionar la existencia de múltiples problemas ambientales directamente relacionados con esta actividad. De esta forma, es cada vez más urgente el desarrollo de nuevas tecnologías que deriven en una minería realmente sustentable, capaz de reducir al mínimo su impacto sobre el medio ambiente.

En base a todo lo anterior, esta investigación entrega un completo recorrido de la teoría detrás de la curva de retención de agua del suelo, empezando por los fenómenos que conlleva el estado parcialmente saturado, tales como la tensión superficial del agua y la capilaridad, definiendo el termino de succión en los suelos y diferenciar la succión matricial de la osmótica. Con esta base detallar exhaustivamente la curva de retención a través de sus parámetros y forma, estudiando los modelos matemáticos de estimación y ajuste que se han desarrollado a través de la historia y resaltando los parámetros importantes que dominan la forma de las distintas curvas. Lo anterior conlleva a sugerir algunas restricciones que tiene la curva con respecto al manejo de los experimentos, todo esto en el primer capítulo del presente texto.

El segundo capítulo detallará a cabalidad la importancia de los relaves mineros en Chile especificando los tipos de depósitos utilizados y la cantidad existente en la actualidad. Mediante el estudio del

comportamiento parcialmente saturado de los relaves se generalizarán algunos parámetros que sirven como comparación con otros residuos mineros, como la influencia capilar en los depósitos, las razones de sólidos y líquidos que los componen, la permeabilidad e infiltración en estos relaves. Todo esto con el objetivo de comprender y asegurar la estabilidad físico-química de los depósitos de residuos mineros.

En este contexto, es importante mencionar que la presente investigación erige su relevancia en los residuos del proceso de lixiviación, en específico los ripios lixiviados. Ya que en particular estos residuos tienen un comportamiento variable a través del tiempo debido a que los cambios en su saturación afectan la composición química, y por consiguiente las propiedades físicas de estos residuos. Lo que repercute en parámetros importantes como que la resistencia a la falla se vea condicionada por los cambios en la humedad del suelo. Por lo que el siguiente capítulo abarcará el proceso de la lixiviación y los ripios que este deja como excedente luego de extraer el mineral metálico deseado en la minería.

Con el marco teórico concluso, se dará inicio al capítulo cuatro describiendo los métodos experimentales de laboratorio actuales, que logran obtener la succión matricial de los suelos requerida para la confección de la curva de retención. Se analizará la normativa internacional que rige los distintos tipos de ensayos asociados al análisis parcialmente saturado. Se clasificarán los métodos según el rango de succiones que logran describir. Y se realizará especial énfasis en el método del papel filtro el cual será descrito a detalle con el objetivo de realizarlo de la mejor manera en las dependencias de la Universidad Santa María.

En base a lo expuesto, esta investigación supone una propuesta metodológica particular, respecto a cómo trabajar el método del papel filtro en los experimentos de laboratorio. Innovando en torno al equipamiento y soluciones que se utilizan para su realización, documentando el procedimiento para la obtención de los resultados. Logrando una comparación de resultados del método implementado y los métodos normados de este ensayo. Las solución acida en bajo porcentaje utilizada busca recrear el efecto de las soluciones lixiviantes usadas comúnmente que permanecen lixiviando a lo largo del tiempo y escurren de manera natural al enfrentarse a infiltraciones de agua provocadas por fenómenos meteorológicos recurrentes como la lluvia.

En este contexto, y a modo de cierre de esta introducción, se presentarán los resultados obtenidos mediante los métodos de papel filtro convencionales y la metodología impuesta, comparando así las curvas de retención de agua de los ripios obtenidas de la succión y contenido volumétrico obtenido en el laboratorio. Generando conclusiones en torno a cómo afecta la resistencia al corte de estos materiales de residuo el cambio en su saturación parcial. Con todo esto se busca desarrollar el estudio en torno a la curva de retención obtenida mediante el método del papel filtro aplicable a ripios de lixiviación de la minería nacional.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Generales

- Caracterizar la SWRC en ripios de lixiviación de la industria minera nacional a partir del método experimental del papel filtro.

2.2 Objetivos Específicos

- Describir los suelos parcialmente saturados con énfasis en la curva de retención de agua y los modelos matemáticos de ajuste.
- Establecer una metodología para la obtención de la curva de retención de agua mediante el método del papel filtro.
- Desarrollar implementos para la obtención de la curva de retención de agua aplicable a botaderos de ripios provenientes de la industria minera en la Universidad Técnica Federico Santa María.
- Presentar las principales características de los ripios de lixiviación, con énfasis en el comportamiento parcialmente saturado.
- Analizar y caracterizar las propiedades de los suelos provenientes de los botaderos de ripios de la industria nacional, para la posterior obtención de la curva de retención de agua.
- Analizar la curva de retención de agua de los ripios de lixiviación de la industria nacional mediante el método del papel filtro.
- Analizar la curva de retención de solución acida del ripio de lixiviación de la industria nacional mediante el método del papel filtro.

2.3 Alcances

- Debido a la disponibilidad de muestras de ripio y la confidencialidad de esta, sólo se dispondrá información acerca del tipo de depósito (característica estructural) y el mineral de extracción correspondiente.
- Los resultados de la investigación se limitan a los depósitos de ripios de lixiviación de una faena minera en específico, por ende, estos valores sólo serán válidos en esta área de estudio, por lo que su extrapolación sólo será posible mediante un buen criterio hacia depósitos de características similares.
- Las curvas de retención de agua que se presentan en este estudio, corresponden a curvas de secado o de desaturación, para muestras de ripios de lixiviación con la humedad necesaria para ser compactadas a una densidad especifica.
- Para la obtención de la curva de retención de agua se utilizará un método barato y eficiente mediante moldes de PVC y un contenedor térmico de plumavit, usando papel filtro tipo Whatmann n°42.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS Y SWRC

Para comenzar este capítulo se enfrentará el estudio de los suelos parcialmente saturados definiendo los cimientos para afrontar de mejor manera los siguientes capítulos de este estudio. Dicho esto, la definición de los suelos parcialmente saturados está basada en su composición, ya que, a diferencia de un suelo saturado, compuesto por agua y suelo, el suelo parcialmente saturado está compuesto por tres fases bien distinguidas como lo son: el agua, el aire y el suelo. Adicionalmente, (Delwyn G. Fredlund & Morgenstern, 1977) en su estudio "Stress State Variables for Unsaturated Soils", mencionan una cuarta fase que componen los suelos parcialmente saturados, esta es la interfaz agua-aire (contractile skin), cuando esta cuarta fase se desarrolla a lo largo del suelo cambia sus propiedades mecánicas de comportamiento, debido al poco espesor de esta fase, un reducido número de moléculas, no toma importancia en el volumen ni la masa del suelo; por lo que normalmente es considerado parte de la fase acuosa.

De acuerdo a (D. G. Fredlund et al., 1996a), los suelos parcialmente saturados pueden ser representados según la Figura 4, en la cual la línea horizontal representa el nivel freático presente en el suelo. El clima de la superficie del suelo es un factor importante que controla la profundidad del nivel freático y, por lo tanto, el espesor de la zona de suelo parcialmente saturado. Independiente de dichas condiciones, la Figura 4 presenta un esquema generalizado de la configuración de los suelos parcialmente saturados. Bajo la línea del nivel freático se encuentra el suelo saturado, mientras que por encima de esta línea se tiene la llamada zona vadosa (Alfaro Soto, 2008).

Los suelos in situ comienzan a saturarse en el nivel freático y tienden a volverse insaturados hacia la superficie del suelo ya que la franja capilar inmediatamente por encima del nivel freático está esencialmente saturada. Sin embargo, toda la zona sometida a presiones negativas del agua intersticial se ha convertido en una zona de suelo insaturado, forma una transición entre el agua de la atmósfera y el agua subterránea (es decir, zona de presión de agua de poro positiva). (D. G. Fredlund et al., 1996b) indica que bajo el nivel freático las presiones de poros serán positivas, mientras que sobre dicho nivel donde el suelo presente algún grado de humedad por debajo de la saturación, las presiones intersticiales, en general, serán negativas o de succión.

En la llamada zona vadosa pueden distinguirse dos capas. La primera se encuentra inmediatamente sobre la línea del nivel freático, donde se genera la franja capilar, alcanzando un grado de saturación cercano a un 100%, con un espesor variable que puede llegar hasta los 10[m] de espesor. La potencia de esta franja capilar dependerá del tipo de suelo. Sobre esta capa el suelo presenta presiones intersticiales o de poros negativa. Debido al papel importante que ocupa el contenido de agua en el comportamiento de los suelos parcialmente saturados, es adecuado detenerse un momento para diferenciar los tipos de agua presentes en el suelo. se pueden distinguir básicamente de tres índoles las cuales corresponden al agua de retención, el agua capilar y el agua gravífica.

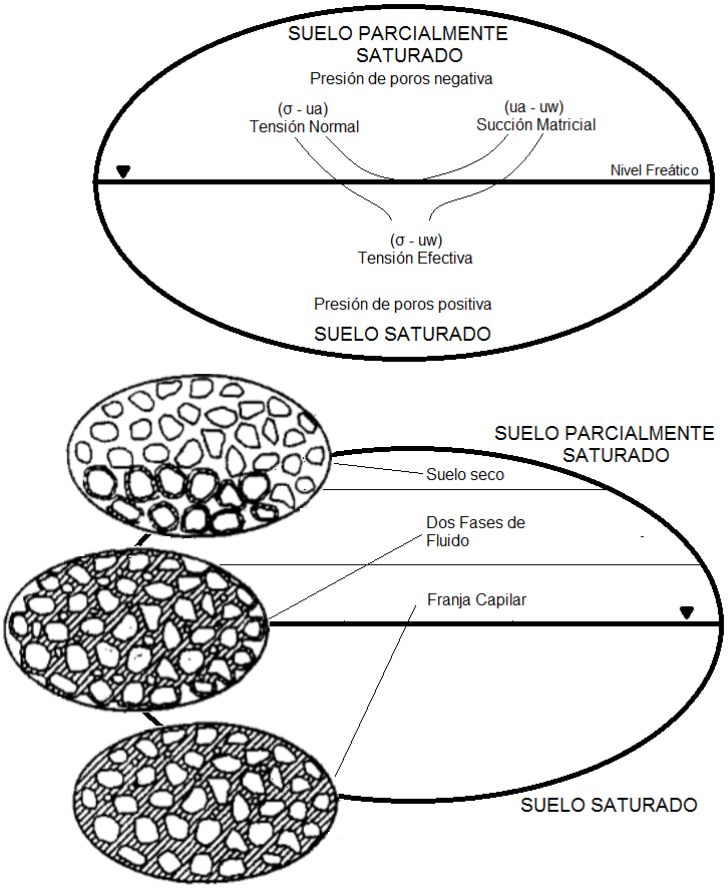

Figura 4. Representación del suelo parcialmente saturado (Fredlund, 1995)

3.1.1 Agua de Retención

El agua de retención es aquella ubicada en los poros o alrededor de las partículas, en contra de la acción de gravedad. Se presenta como agua higroscópica y como agua pelicular.

- El agua higroscópica corresponde a aquella que se encuentra fuertemente fijada a las partículas de suelo, producto de enlaces químicos entre los dipolos del agua y las valencias libres presentes en los minerales. Corresponde a un agua muy difícil de desplazar, a menos que sea en estado de vapor. Toma relevancia en los materiales finos como limos y arcillas, donde el agua retenida por esta vía puede alcanzar una magnitud de un 15 – 20% (en términos de humedad), en cambio para suelos granulares gruesos sólo llega hasta el 0,2 – 0,5%.

- El agua pelicular en cambio, corresponde a aquella agua de retención que envuelve a las partículas de suelo y al agua higroscópica, presentando un espesor que no sobrepasa las 0,1 micras. La retención de esta agua se encuentra asociada a la tensión superficial, y es posible desplazarla en estado líquido debido a la atracción molecular que se genera entre partículas vecinas.

3.1.2 Agua Capilar

El agua capilar corresponde al agua retenida en los microporos, debido a la capilaridad y la tensión superficial. Aquí se distingue el agua capilar aislada o colgada, la cual no tiene relación con la zona saturada y podría deberse a situaciones de infiltración de lluvias; y el agua capilar continua, la cual hace referencia a la zona saturada, pudiendo alcanzar varios metros de altura, según lo expresado por (D. G. Fredlund et al., 1996b).

3.1.3 Agua Gravífica

Finalmente se tiene el agua gravífica, la cual se define como el agua que se desplaza libremente a través del suelo por efecto de la gravedad, y corresponde a la parte activa de las aguas subterráneas siendo la principal responsable del transporte de solutos.

Otro termino clave para comprender el comportamiento de los suelos parcialmente saturados es el fenómeno de la capilaridad, este está asociado a la componente matricial, donde la altura de agua y el radio de curvatura tienen un efecto directo en la relación del contenido de agua con la succión (presión negativa). Este fenómeno, es posible verlo, en los suelos las partículas están distribuidas aleatoriamente, se puede utilizar una analogía para explicar el fenómeno de capilaridad. En un principio, la presión y altura capilar siguen una tendencia similar en suelos y en tubos capilares, donde el radio del tubo es análogo al radio de los poros, donde su disminución se traduce en una mayor altura de ascenso (D. G. Fredlund & Rahardjo, 1993).

Para entender bien la capilaridad primero se debe detallar la definición de tensión superficial.

3.2 Tensión superficial

La interfaz aire-agua tiene una característica llamada tensión superficial. El fenómeno de la tensión superficial es causado por fuerzas intermoleculares que actúan sobre las moléculas de la piel contráctil. Estas fuerzas son diferentes de las fuerzas que actúan sobre las moléculas dentro del agua como se muestra en la Figura 5.

Una molécula dentro del agua está sujeta a fuerzas iguales en todas las direcciones, lo que significa que no hay fuerza desequilibrada. Las moléculas de agua en la piel contráctil estarán sujetas a fuerzas desequilibradas y fluirán hacia el agua. Se genera tensión a lo largo de la piel contraída para hacer que la piel contraída esté en un estado equilibrado. La propiedad de contraer la piel que le permite ejercer una fuerza de tracción se denomina tensión superficial, que se mide por la fuerza de tracción por unidad de longitud de la piel que se contrae. La tensión superficial es tangente al encogimiento de la superficie de la piel.

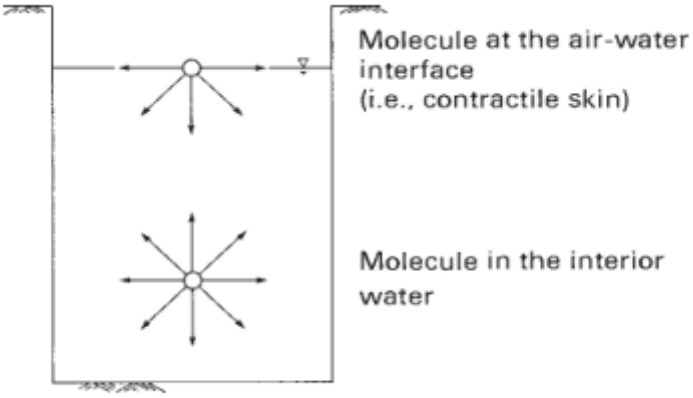

Figura 5. Fuerzas intermoleculares que actúan sobre la piel contráctil (Fredlund et al.2012)

La tensión superficial hace que la piel contraída se comporte como una membrana elástica. La piel contráctil se comporta como un globo inflado, donde la presión dentro del globo es mayor que la presión exterior. Si cada lado de la membrana bidimensional flexible se somete a presiones diferentes, la membrana debe tener una curvatura cóncava hacia una presión mayor y se debe aplicar tensión a la membrana para lograr el equilibrio. La diferencia de presión en la superficie curva puede estar relacionada con la tensión superficial de la membrana y el radio de curvatura (Figura 6).

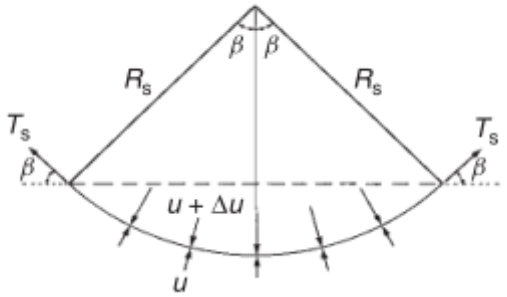

Figura 6. Las fuerzas de tensión superficial asociadas con la superficie curva bidimensional. (Fredlund et al.2012)

La presión que actúa sobre la membrana es u y u + Δu. La película tiene un radio de curvatura R_s y una tensión superficial T_s. Las fuerzas horizontales a lo largo de la membrana se equilibran entre sí. Requisitos de equilibrio de fuerzas en la dirección vertical

$$2T_s \sin\beta = 2\Delta u R_s \sin\beta \tag{1}$$

Donde: $2R_s \sin\beta$ = Largo de la membrana proyectada en el plano horizontal.

Reordenando la ecuacion nos queda:

$$\Delta u = \frac{T_s}{R_s} \tag{2}$$

La ecuación 2 entrega la diferencia de presión en una superficie curva bidimensional con radio R_s y tensión superficial T_s. Para superficies deformadas o en forma de silla de montar (es decir, membranas tridimensionales), se puede ampliar usando la ecuación de Laplace:

$$\Delta u = T_s(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}) \tag{3}$$

Donde:

R_1, R_2 = Radio de curvatura de una membrana deformada en dos planos principales ortogonales

Si el radio de curvatura es el mismo en todas las direciones la ecuacion se vuelve:

$$\Delta u = \frac{2T_s}{R_s} \tag{4}$$

La presión del aire (u_a) de la piel contráctil en el suelo insaturado es mayor que la presión del agua u_w. La diferencia de presión $u_a - u_w$ se denomina succión de matriz (o presión capilar) en el suelo. La diferencia de presión hace que la piel contractil se doble a la curvatura que se muestra en la ecuacion 5 :

$$u_a - u_w = \frac{2T_s}{R_s} \tag{5}$$

Esta fórmula es del modelo capilar de Kelvin. El radio de curvatura de la piel contráctil disminuye a medida que aumenta la succión de la matriz del suelo. La piel curva y contraída a menudo se llama menisco. Cuando la diferencia entre la presión de aire de poro y la presión de agua de poro se vuelve cero, el radio de curvatura R_s se vuelve infinito. Por lo tanto, cuando la succión de la matriz se vuelve cero, hay una interfaz aire-agua plana. Curiosamente, incluso en estas condiciones, las propiedades de tensión superficial del agua permanecen constantes.

3.3 Capilaridad

El fenómeno capilar está relacionado con la succión matricial de la succión total. La altura ascendente del agua en el tubo capilar y el radio de curvatura de la interfaz aire-agua afectan directamente la relación de succión matricial del agua en el suelo (es decir, la curva característica suelo-agua). Para el proceso de humectación y secado en el suelo, la elevación capilar es diferente debido al cambio del tamaño de los poros capilares.

3.3.1 Altura capilar

Considere insertar un pequeño tubo de vidrio en el agua en condiciones atmosféricas (Figura 7). Debido a la piel contráctil y la tensión superficial de la piel, el agua sube por el tubo.

La tendencia del agua a mojar la superficie del tubo de vidrio (es decir, higroscopicidad). El comportamiento capilar puede analizarse considerando la tensión superficial T_s que actúa alrededor del menisco. La tensión superficial T_s actúa sobre la pared vertical del capilar en un ángulo α_1. Este ángulo se denomina ángulo de contacto y su tamaño depende de la adhesión entre las moléculas de la piel contraíble y el material (es decir, vidrio) que forma el tubo.

Consideremos el equilibrio de fuerza vertical del agua capilar en el tubo que se muestra en la figura 5. El componente vertical de la tensión superficial (es decir, $2\pi r T_s \cos \alpha_1$) es responsable de mantener el peso de la columna de agua, y la altura de la columna de agua es h_c (es decir, $\pi r^2 h_c \rho_w g$):

$$2\pi r T_s \cos \alpha_1 = \pi r^2 h_c \rho_w g \tag{6}$$

Donde:

r = radio del tubo capilar,

T_s = tension superficial del agua,

α_1 = Angulo de contacto,

h_c = altura capilar, y

g = aceleración de gravedad.

La ecuación 6 se puede reorganizar para dar la altura máxima de agua en el tubo capilar, h_c:

$$h_C = \frac{2T_s}{\rho_w g R_s} \tag{7}$$

R_s = radio de curvatura del menisco (es decir, $r/\cos \alpha_1$).

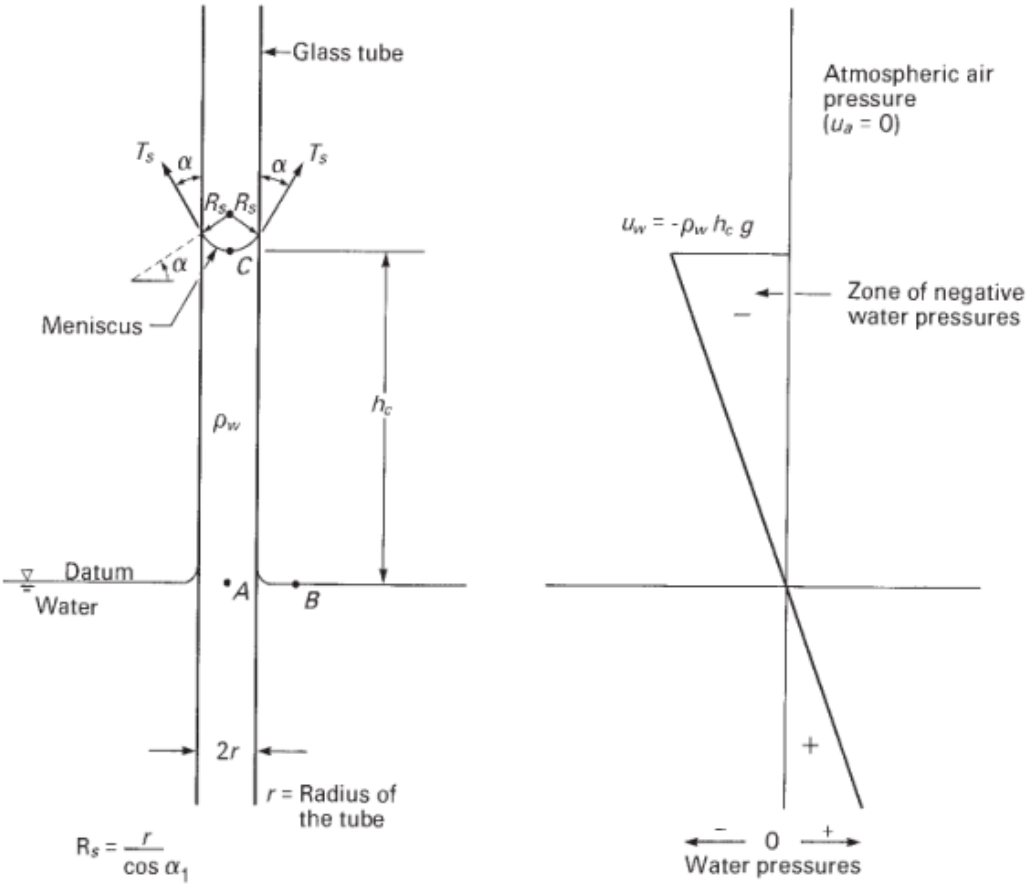

Figura 7. Modelo físico de la capilaridad (Fredlund te al. 2012)

El ángulo de contacto entre la piel que se contrae de agua pura y el vidrio limpio es cero (es decir, $\alpha_1 = 0$). Cuando el ángulo α es cero, el radio de curvatura R_s es igual al radio r del tubo (Figura 7). Por lo tanto, en un tubo de vidrio limpio, la altura capilar del agua pura es:

$$h_c = \frac{2Ts}{\rho_w g r} \tag{8}$$

El radio del tubo es similar al radio del agujero en el suelo. La ecuación 8 muestra que la altura del capilar aumenta a medida que disminuye el radio del agujero. La altura del capilar se puede trazar contra el radio del agujero usando una ecuación lineal, como se muestra en la Figura 7.

3.3.2 Presión capilar

Los puntos A, B y C en el sistema capilar que se muestra en la Figura 7 están en un estado de equilibrio hídrico estático. La presión del agua en los puntos A y B son la presión atmosférica (es decir, el punto A es igual a la presión intersticial del agua en el punto B igual a 0,0). La elevación del punto A y del punto B en el agua La superficie se considera el punto de referencia del sistema (es decir, altitud cero). Como resultado, la altura hidráulica (es decir, es decir, elevación altura más altura de presión en A y B) es igual a cero.

El punto C está ubicado a la altura h_c desde el punto de referencia (es decir, la altura de elevación es igual a h_c). Para tener equilibrio hidrostático se necesita una altura hidráulica entre los puntos C, B y A igual. En otras palabras, la altura hidráulica en el punto C también es igual a cero.

Esto significa que la altura de presión en el punto C es igual a la presión negativa de la altura de elevación en el punto C. La presión del agua en el punto C se puede calcular como

$$u_w = -\rho_w g h_c \tag{9}$$

Donde: u_w = presión del agua.

Las presiones del agua por encima del punto A en el tubo capilar son negativas, como se muestra en la Figura 7. Se dice que el agua del tubo capilar está bajo tensión. Por otro lado, en el agua las presiones por debajo del punto A (es decir, nivel freático) son positivas debido a las condiciones de presión hidrostática. En el punto C, la presión del aire es atmosférica (es decir, u_a = 0) y la presión del agua es negativa (es decir, $u_w = -\rho_w g h_c$). La succión matricial $u_a - u_w$ en el punto C se puede expresar de la siguiente manera:

$$u_a - u_w = \rho_w g h_c \tag{10}$$

Sustituyendo la ecuación 8 en la ecuación 10 permite escribir la succión matricial en términos de tensión superficial:

$$u_a - u_w = \frac{2T_s}{R_s} \tag{11}$$

La ecuación 11 se aplica al encogimiento de la piel contráctil. El radio de curvatura R_s se puede considerar como por hipótesis ángulo de contacto cero (es decir, α_1 = 0). A medida que el radio del orificio se torna más pequeño, la succión de la matriz en el suelo se vuelve más grande, como se muestra en la figura de la Figura 8. La tensión superficial tiene la capacidad de soportar la columna de agua h_c en el capilar. La tensión superficial relacionada a la piel contráctil crea una fuerza de reacción en la pared capilar en la dirección de la componente vertical. Esta fuerza de reacción crea una tensión de compresión en la pared del tubo. En otras palabras, el peso de la columna de agua se transfiere al tubo a través de la piel contráctil. La piel contráctil provoca un aumento de la compresión en la estructura del suelo en la zona capilar. Como resultado, la presencia de la succión matricial en un suelo parcialmente saturado produce una disminución de volumen y un incremento en la resistencia al corte del suelo.

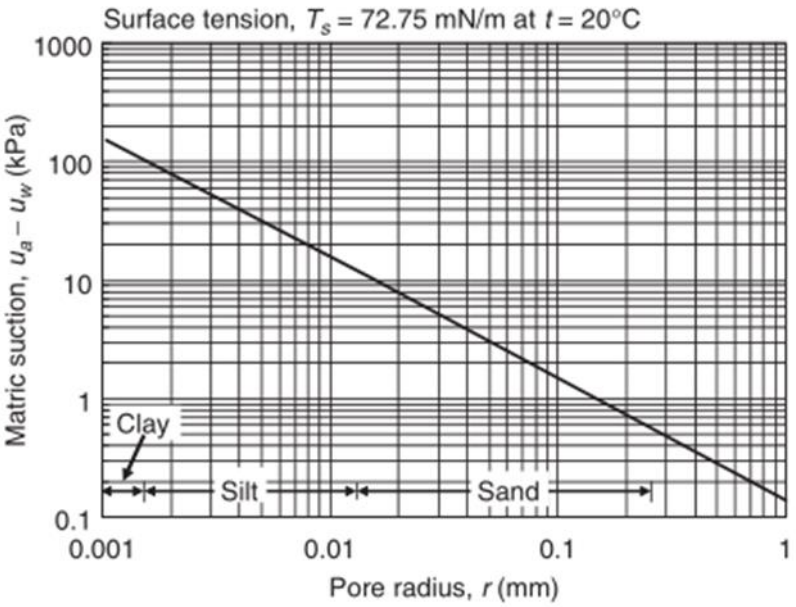

Figura 8. Relación de la succión matricial y el tamaño de poro para varios suelos (Fredlund et al. 2012)

3.4 Succión del suelo

La succión del suelo es la presión isotrópica ejercida por el agua de poro para absorber más agua, esta presión se produce por las fuerzas en los meniscos entre poros y los fenómenos fisicoquímicos que ocurren en el suelo debido al agua. En ingeniería geotécnica, la succión se define como una cantidad que mide el potencial termodinámico del agua del poro del suelo en relación con el potencial de referencia del agua libre. El potencial de agua de poro se puede dar por efectos de adsorción capilar y osmótica (Manahiloh et al., 2016). La succión total en los suelos, ψ_t, representa la energía asociada a la capacidad del suelo para retener agua (H. C. Lee et al., 1990), y se expresa como la suma entre la componente osmótica de la succión, ψ_o, y la componente matricial de la succión, ψ.

$$\psi_t = \psi + \psi_o = (u_a - u_w) + \psi_o \tag{12}$$

Donde:

$\psi = (u_a - u_w)$ Succión matricial [kPa],

u_a Presión de poro de aire [kPa],

u_w Presión de poro de agua [kPa], y

ψ_o Presión osmótica [kPa]

Se sabe que la succión matricial varía con el tiempo principalmente como resultado de las condiciones impuestas por los cambios ambientales. Algún cambio en la succión afecta el equilibrio general de la masa del suelo. Los cambios en la succión del suelo pueden deberse a un cambio en uno o ambos componentes de la succión del suelo. El papel de la succión osmótica se ha asociado más con suelos parcialmente saturados que con suelos saturados. Sin embargo, la succión osmótica está relacionada con el contenido de sal en los poros y el agua. Debe recordarse que las sales están presentes en el agua intersticial de suelos saturados e insaturados. El papel de succión osmótica es, por tanto, igualmente aplicable a ambos suelos insaturados y saturados. Los cambios en la succión osmótica pueden tener un efecto real sobre el comportamiento mecánico de un suelo, puede haber un cambio en el volumen general y la resistencia al corte del suelo si cambia el contenido de sal o existe contaminación química en el suelo estudiado.

La mayoría de los problemas de ingeniería que involucran suelos insaturados son comúnmente el resultado de cambios ambientales. La acumulación de agua debajo de una casa puede resultar en una reducción en la succión matricial y posterior levantamiento de la estructura. De manera similar, la estabilidad de un talud con suelo parcialmente saturado puede estar en peligro por lluvias excesivas que reducen la succión en el suelo. Estas condiciones impuestas por el clima afectan principalmente el componente de la succión matricial. Los cambios en la succión osmótica son generalmente menos significativos, sin embargo, hay situaciones en las que el contenido de sal de un suelo cambia o se rompe el equilibrio químico y, como resultado, puede haber un cambio importante en las propiedades físicas del suelo.

La Figura 9 muestra la importancia relativa de los cambios en la succión osmótica en comparación con los cambios en la succión matricial cuando se varía el contenido de agua. Las curvas de succión total y matricial son casi congruentes entre sí, particularmente en el rango de contenido de agua más alto. En otras palabras, un cambio en la succión total es esencialmente equivalente a un cambio en la succión matricial. Los cambios de succión matricial son casi los mismos que los cambios de succión total, y viceversa, para muchos problemas geotécnicos que involucran suelos insaturados, siempre que no se agreguen sales adicionales o contaminación química al suelo.

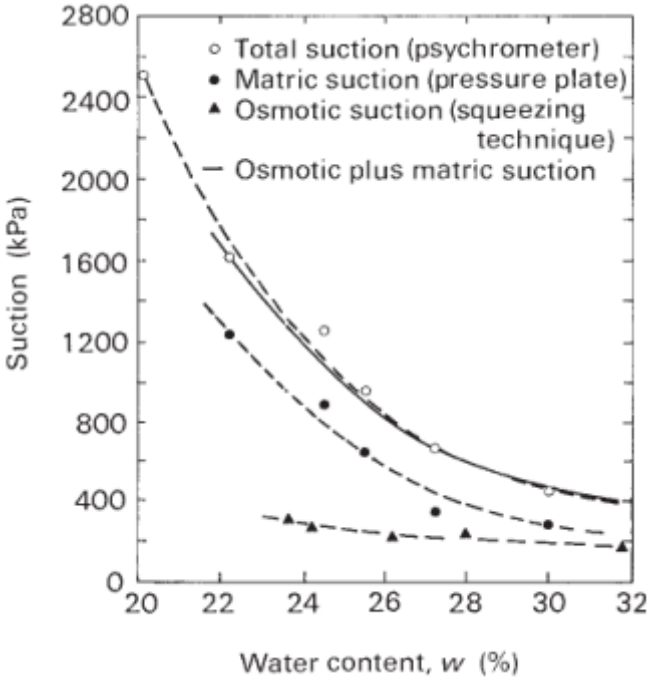

Figura 9. Succión total, matricial y osmótica medida en arcilla Regina compactada (Krahn y Fredlund, 1972)

Adicionalmente se puede categorizar la succión dependiendo del estado del suelo y su lugar de medición. Los rellenos y suelos compactados tienen una succión inherente al formarse, las pendientes naturales o construidas tienen succiones in situ y todas las muestras que se extraen del suelo poseen una succión del suelo en su estado no confinado (Ridley et al., 2003).

3.4.1 Succión matricial

La succión matricial es producida por la capilaridad y la adsorción superficial. El fenómeno de capilaridad se produce por la capacidad que tiene el líquido para ascender por las aberturas pequeñas o poros(meniscos) en oposición a fuerzas externas como la gravedad y está relacionado con la tensión superficial del agua.

El valor de la succión matricial está directamente influenciado por el tamaño y distribución de las partículas, tamaño de los poros y del grado de saturación (Dineen et al., 1999). Esta dependencia entre el tamaño de las partículas de suelo y la succión matricial posee relación inversamente proporcional (D. G. Fredlund & Rahardjo, 1993) como se muestra en la Figura 8 donde la succión matricial decrece linealmente con el aumento del tamaño del grano. Esta relación se representa mediante la siguiente expresión:

$$\psi = u_a - u_w = \frac{2T_s}{R_s} \tag{13}$$

Donde:

T_s Tensión superficial del agua, y

R_s Radio de curvatura asociado a las partículas de suelo.

3.4.2 Succión osmótica

La succión osmótica es una función de la cantidad de sales disueltas en el fluido, por lo que es el resultado de la fuerza ejercida sobre las moléculas de agua producto de la actividad química del suelo. Esto se puede explicar al estudiar el comportamiento de agua con una solución en contacto con una membrana semipermeable, debido a que la membrana permite el paso de agua a través de ella y al mismo tiempo limita el flujo de la solución, creando una diferencia de concentración entre solubles lo que genera un potencial para que el agua fluya desde la membrana a la solución. Si la membrana restringiese de alguna forma el flujo, por consecuencia se ejercería una presión sobre esta, denominada succión osmótica.

Debido a estudios efectuados por (D. G. Fredlund & Rahardjo, 1993) se concluye que en la practica el valor de la succión osmótica es despreciable en comparación con el valor de la succión matricial, ya que generalmente los problemas son causados por cambios climáticos, los cuales alteran la succión matricial principalmente.

Ya definido todos los términos anteriores, tenemos nociones claras para afrontar el siguiente capítulo de este estudio, que es el tema principal de esta investigación: la curva de retención de agua.

3.5 Curva de retención de agua del suelo

Ya con los términos consolidados anteriormente se puede definir la curva de retención de agua del suelo, también conocida por sus siglas en ingles SWRC (Soil Water Retention Curve). Esta curva refleja gráficamente la relación entre el contenido volumétrico o gravimétrico de agua y la succión del suelo. Aunque parezca simple esta curva es la llave de entrada para la comprensión de los suelos parcialmente saturados ya que a partir de esta se pueden obtener varias propiedades fundamentales para entender el comportamiento de estos suelos como las variaciones volumétricas(gravimétricas), la resistencia al corte del suelo y la conductividad hidráulica (Delwyn G. Fredlund, 2000).

Debido a la importancia de esta curva diversos autores comenzaron a realizar series de métodos experimentales para obtener la SWRC, pero debido a la cantidad de los ensayos de laboratorio que se requieren realizar la curva y la implementación necesaria se torna muy costosa de obtener. Por lo que investigadores han dedicado su tiempo en el desarrollo de métodos empíricos o ajustes para resultados experimentales para determinar la curva que mejor represente las propiedades de los suelos parcialmente saturados.

3.5.1 Caracterización de la SWRC

La curva de retención de agua del suelo (SWRC) facilita el entendimiento conceptual entre la masa y/o el volumen de agua en un suelo parcialmente saturado y el estado energético de la fase de agua (Delwyn G. Fredlund et al., 2012). Esto significa que La curva de retención de agua del suelo es una relación entre la cantidad de agua en el suelo y la succión del suelo. Esto debido a que la succión constituye una parte fundamental de la curva, ubicándose en el eje de las abscisas y por la otra parte se encuentra el contenido de agua en el eje de las ordenadas. Esta curva se utiliza para determinar el comportamiento hidromecánico de los suelos parcialmente saturados

Antes de entrar en la forma de la curva de retención debemos dejar en claro las relaciones entre términos volumétricos que nos ayudaran a representar el contenido de agua en el suelo, partiremos por las relaciones masa volumen para el contenido de agua.

Primero es necesario definir el contenido volumétrico de agua, θ, como la razón entre el volumen de agua con respecto al volumen total de suelo, este se puede expresar de la misma manera en términos de grado de saturación, S, y la humedad gravimétrica, ω.

De esta manera (Vanapalli et al., 1996), sugirieron una relación entre el grado de saturación y el contenido volumétrico de agua:

$$\theta = \frac{V_W}{V_T} = \frac{S_e}{1+e} = S_\eta \tag{14}$$

Donde θ = Contenido volumétrico de agua en m3/m3,

V_W = Volumen de agua en m3,

V_T = Volumen total comprendido por la suma del volumen del suelo y el volumen de vacíos, en m3,

S = Grado de saturación,

$e =$ Índice de vacíos, y

$\eta =$ Porosidad.

Sus valores varían desde cero, cuando el suelo se encuentra completamente seco, hasta igualar el valor de la porosidad, cuando se encuentra en estado saturado. Para comprender esta última afirmación es necesario recordar la definición de porosidad (η), la cual corresponde a la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total. De esta forma, cuando un suelo se encuentra en estado saturado, el volumen de vacíos es exactamente el volumen de agua ya que todos los poros se encuentran ocupados por agua, por lo que el valor de la porosidad se iguala con el del contenido volumétrico de agua saturado (θs).

$$\eta = \frac{v_v}{v_T} = \frac{v_w}{v_T} = \theta_s \tag{15}$$

Por su parte, el contenido gravimétrico de agua (ω) se define como la relación entre la masa de agua (Mw) y la masa de suelo (Ms), tal como se plantea en la siguiente ecuación>

$$\omega = \frac{Mw}{M_S} * 100 \tag{16}$$

Además, es posible expresar el contenido volumétrico de agua en términos de la humedad gravimétrica:

$$\theta = \omega \frac{\rho_d}{\rho_w} \tag{17}$$

Donde ω = Humedad gravimétrica,

ρ_d= Densidad seca del suelo [kg/m^3],

ρ_w= Densidad del agua [kg/m^3].

Las relaciones masa-volumen de los suelos parcialmente saturados son consideradas sustancialmente más complejas que las de los suelos saturados, debido a que los suelos saturados están compuestos por un sistema de dos fases, por lo que requiere un único tensor de esfuerzos correspondiente al tensor de esfuerzos efectivos para definir el estado del suelo (Terzaghi, 1943). Sin embargo, los suelos parcialmente saturados requieren dos tensores de esfuerzos independientes para poder definir el estado del suelo ((Delwyn G. Fredlund & Morgenstern, 1977);(Delwyn G. Fredlund & Pham, 2006), el primero determinado por tensor normal neto y el segundo determinado por la succión matricial. Adicionalmente, un sin número de autores han planteado que las propiedades masa-volumen deben ser relacionadas con las variables de estados de esfuerzo a continuación la Tabla 1 que resume las ecuaciones de tensiones efectivas.

Tabla 1. Ecuaciones de tensiones efectivas en suelos parcialmente saturados (Modificado de Alfaro, 2008)

Ecuación	***Componentes***	***Referencia***
$\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{p}''$	$p'' =$ presión de agua debajo de la atmosférica	Donald (1956)
$\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\mu_a} + \boldsymbol{\chi}(\boldsymbol{\mu_a} - \boldsymbol{\mu_w})$	$\chi =$ parámetro relacionado con el grado de saturación del suelo	Bishop (1959)
$\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\beta}'\boldsymbol{\mu_w}$	$\beta' =$ factor de unión	Croney et. al (1958)
$\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\Phi p}''$	$\Phi =$ parámetro entre 0 y 1	Aitchison (1961)
$\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\beta p}''$	$\beta =$ factor estadístico para medir el área de contacto	Jennings (1961)
$\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\mu_a} + \boldsymbol{\chi_m}(\boldsymbol{h_m} + \boldsymbol{\mu_a}) + \boldsymbol{\chi_s}(\boldsymbol{h_s} + \boldsymbol{\mu_a})$	$\chi_m, \chi_s =$ parámetros de tensión efectiva para succión matricial y de soluto respectivamente $h_m, h_s =$ succión matricial y de soluto respectivamente	Richards (1966)
$\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\mu_a} + \boldsymbol{\chi_m}\boldsymbol{P}''_m + \boldsymbol{\chi_s}\boldsymbol{P}''_s$	$P''_m, P''_s =$ succión matricial y de soluto respectivamente	Aitchison (1973)
$\boldsymbol{\sigma}^1 = \boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\mu_w}\boldsymbol{S_r} - (\boldsymbol{1} - \boldsymbol{S_r})\boldsymbol{\mu_a}$	$S_r =$ grado de saturación	Öberg y Sällfors (1997)

(Delwyn G. Fredlund & Morgenstern, 1977) introducen el concepto de que el comportamiento de los suelos parcialmente saturados se encuentra definido por dos tensores de esfuerzo independientes, dentro de un grupo de tres variables. Este concepto se basa en el análisis teórico tridimensional del diagrama de cuerpo libre de un elemento diferencial de volumen en un suelo parcialmente saturado, tal como se aprecia en la Figura 10.

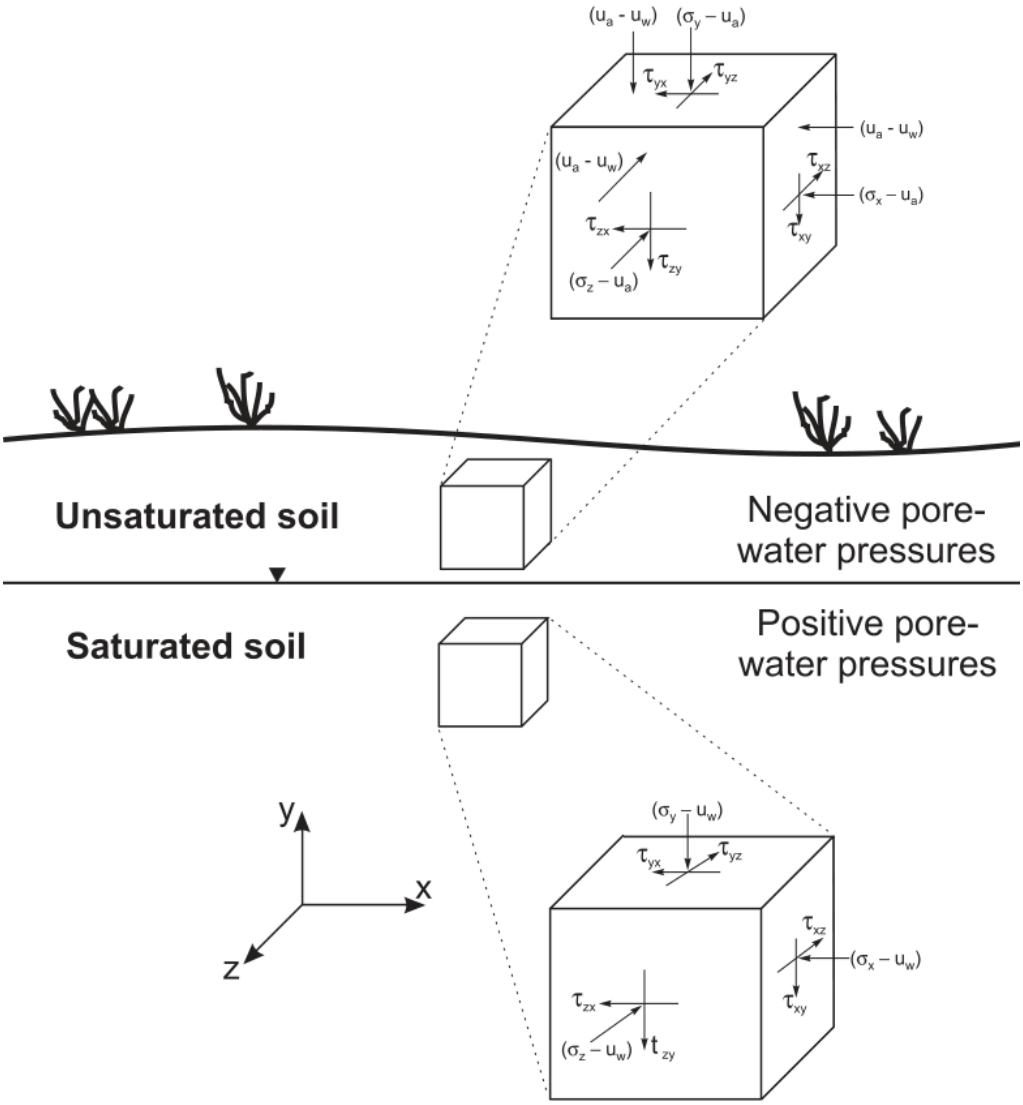

Figura 10. Elementos mostrando el estado de esfuerzo en suelos saturados y parcialmente saturados (D.G. Fredlund 2000).

De este análisis se definen las siguientes matrices de tensiones de esfuerzos:

Matriz 1 $$\begin{bmatrix} \sigma_x - u_w & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - u_w & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - u_w \end{bmatrix}$$

Matriz 2 $$\begin{bmatrix} \sigma_x - u_a & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - u_a & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - u_a \end{bmatrix}$$

Matriz 3 $$\begin{bmatrix} u_a - u_w & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y - u_a & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z - u_a \end{bmatrix}$$

De esta forma, las tensiones asociadas a cargas mecánicas o geo estáticas pueden ser representadas por las variables $(\sigma - u_w)$ o $(\sigma - u_a)$. Las tensiones asociadas a las presiones de poros son representadas a través de la succión matricial $(u_a - u_w)$, y las variaciones de volumen del suelo se asocian a los dos estados de tensiones independientes a través del índice de vacíos (Alfaro Soto, 2008).

Los estados de tensiones definidos por la Matriz 2 y la Matriz 3, corresponden a la combinación más utilizada en la práctica ingenieril, de acuerdo a diversos autores ((Alfaro Soto, 2008);(Meza, 2005)). Debido a que la tensión total y la variación de la presión de poros son tensiones que pueden ser físicamente medibles por separado.

3.5.2 Forma de la SWRC

La SWRC no es única para un suelo, su forma y posición no son las mismas, para trayectorias de humedecimiento del suelo que, para trayectorias de secado del suelo, lo que es llamado como "histéresis".

La curva de retención de agua fue caracterizada por (White et al., 1970) citado por (Delwyn G. Fredlund, 2000). En la SWRC en términos del grado de saturación existen tres zonas claramente identificables, como se muestra en la Figura 11, la zona de efecto de borde, zona de transición y zona de saturación residual, y existen dos puntos característicos que marcan el límite entre cada etapa, el valor de entrada de aire y el grado de saturación residual.

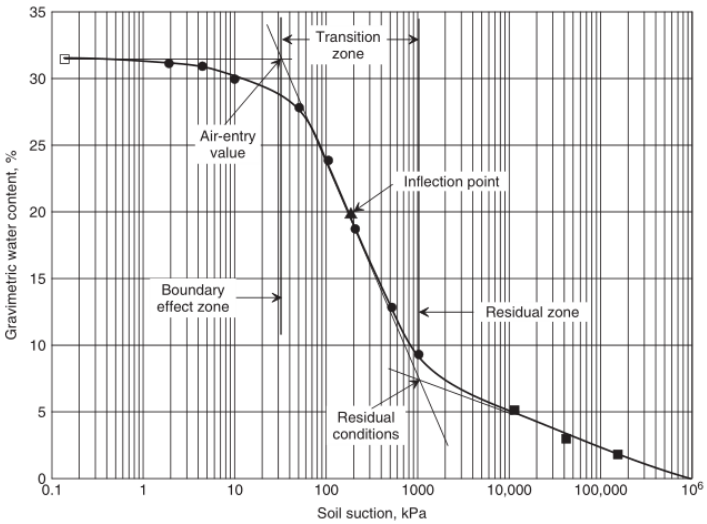

Figura 11. Zonas de la SWRC (Fredlund 2000).

En la zona de efecto de borde, la gráfica es inicialmente horizontal, es decir, el suelo permanece saturado. El valor de entrada de aire, es la succión requerida para que el aire entre a los poros más grandes del suelo y se inicia la desaturación o pérdida de la saturación. En este punto se inicia la zona de transición, en la cual existe una interfase aire-agua, pero el agua se encuentra de manera continua.

Finalmente, al seguir disminuyendo el contenido de agua dentro de los poros, se llega al grado de saturación residual, donde se inicia la zona desaturación residual. El grado de saturación residual corresponde al contenido de agua para el cual, la fase líquida deja de ser continua y los poros se encuentran ocupados principalmente por aire.

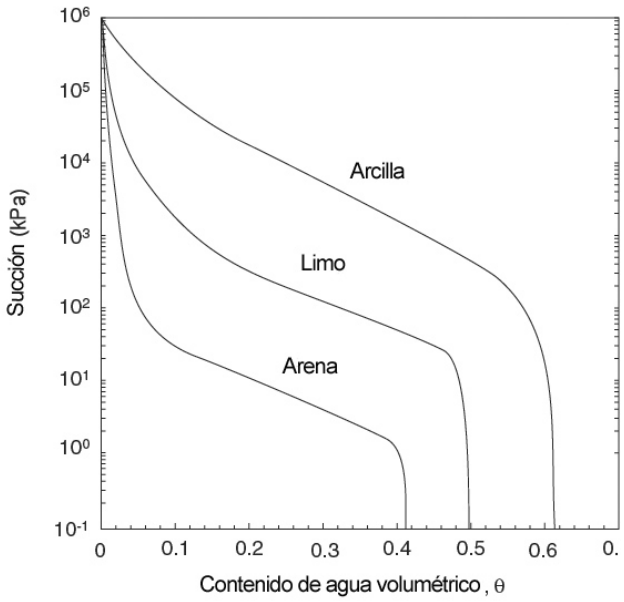

Figura 12. Curvas características de succión representativas para arenas, limos y arcillas (Lu Ning y Likos W.J. 2004).

La relación contenido de agua-succión, la forma de la SWCC, se ve influenciada por la distribución de los tamaños de poros, la distribución de tamaños de partículas, la densidad, el contenido de arcilla y la mineralogía del suelo (Likos & Lu, 2004). La Figura 12, muestra las curvas de retención, representativas de arenas, limos y arcillas, donde se observa la forma de la curva, asociada al tipo de suelo, que indirectamente indica la influencia del tamaño de partículas y el tamaño de poros. El valor de entrada de aire de los suelos gruesos es menor que para los suelos finos, debido a la presencia de poros de mayor tamaño, predominio de la capilaridad en la succión matricial y menor requerimiento de succión para iniciar la desaturación del suelo.

3.6 Modelos de estimación y ajuste de la SWRC

Se presentan los modelos matemáticos más utilizados en la literatura, propuestos para describir o estimar de forma alternativa la curva de retención de agua de los suelos parcialmente saturados.

3.6.1 Buckingham

Las primeras curvas de retención de agua fueron establecidas por Buckingham en 1907 como muestra la Figura 13. En ellas relacionó el potencial de capilaridad con el contenido de humedad. En esos años no se contaba con un método para medir de forma directa el potencial de capilaridad, por lo que Buckingham observó que el potencial de capilaridad y la elevación de la columna de agua sobre el nivel freático se encontraban relacionados por un constante multiplicador (A) (Narasimhan, 2007).

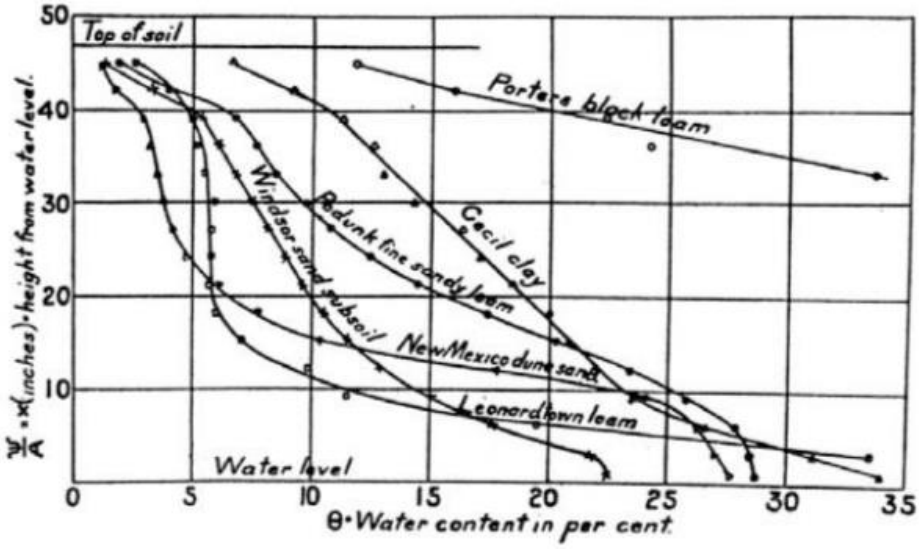

Figura 13. SWRC establecidas por Buckingham 1907 (Narasimhan 2007)

3.6.2 Brooks & Corey

Siguiendo el enfoque de (Burdine, 1953), (Brooks & Corey, 1964) presentan una teoría que desarrolla las relaciones funcionales entre la saturación, la diferencia de presión y las permeabilidades del aire y líquido en términos de propiedades hidráulicas de medios porosos parcialmente saturados. Se describen los procedimientos para determinar estas propiedades hidráulicas a partir de las curvas de presión-desaturación capilar. Las permeabilidades al aire y al líquido en función de la saturación y la presión capilar son propiedades hidráulicas determinadas experimentalmente.

La ecuación de (Brooks & Corey, 1964) para dibujar la curva se presenta a continuación:

$$w(\psi) = w_s \qquad \psi < w_a$$
$$w(\psi) = w_s * \left(\frac{\psi}{a}\right)^{-n} \qquad \psi \geq w_a \tag{18}$$

donde: a = punto donde la recta $w(\psi) = 0$

n = índice de distribución del tamaño de poros

3.6.3 Brutsaert

Luego (Brutsaert, 1966) derivando la curva de la suma de la distribución del tamaño de los poros obtuvo la curva de frecuencia de la distribución de tamaño de poro. La ventaja de esta curva es que se puede expresar fácilmente mediante funciones de densidad probabilística, entre las funciones más utilizadas para describir estas curvas se encuentran la distribución gamma incompleta, la distribución log normal y la primera distribución asintótica.

Brutsaert ocupo la distribución gamma incompleta, desarrollando la siguiente ecuación para la curva:

$$w(\psi) = \frac{w_s}{1 + \left(\frac{\psi}{A}\right)^n} \tag{19}$$

donde: A = Valor de la succión para el cual el suelo se encuentra al 50% del grado de saturación,

n = Variable relacionada con la distribución de tamaño de poros.

3.6.4 Campbell

Un método simple para cuantificar el SWRC es la función de retención de agua del suelo de Campbell, que predice la matriz de agua del suelo potencial (ψ) a un contenido volumétrico de agua dado (θ) asociado a el contenido volumétrico saturado de agua (θ_s).

El modelo de retención de agua del suelo (Campbell, 1974) se expresa con la siguiente ecuación:

$$\psi = \psi_e \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^{-b} \tag{20}$$

donde:

b = parámetro de ajuste,

θ = Contenido volumétrico de agua,

θ_s= Contenido volumétrico de agua con suelo saturado,

ψ_e= Valor de entrada de aire.

3.6.5 Van Genuchten

El modelo de (Van Genuchten, 1980) es uno de los más utilizados para el ajuste de curvas de retención de agua debido a sus resultados acertados y simpleza al ejecutar como muestra la Figura 14. Este modelo descriptivo se basa en parámetros definidos mediante el método estadístico de mínimos cuadrados y su rango de uso está limitado entre el punto de la entrada de aire y la succión residual. Adicionalmente esta ecuación puede ser utilizada para estimar la permeabilidad:

$$w(\psi) = w_r + \frac{w_s - w_r}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m} \tag{21}$$

Donde:

α, n, m = parámetros de ajuste,

w_s = Humedad gravimétrica de saturación,

w_r= Humedad gravimétrica residual, y

ψ = Succión del suelo.

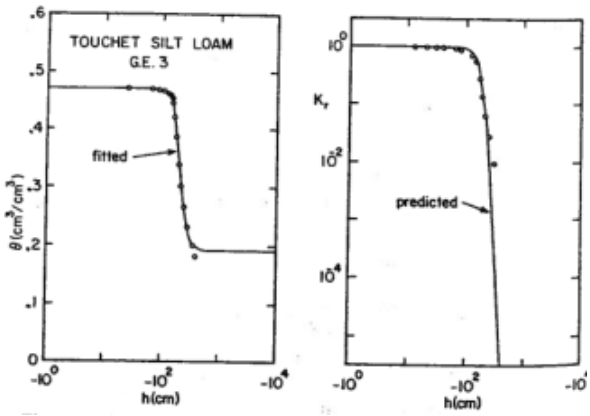

Figura 14. Curva observada y calculada de las propiedad hidráulicas del suelo "Touchet slit loam"(Van Genutchen 1980)

3.6.6 Bumb & McKee

(Bumb & McKee, 1984) sugirieron una función exponencial para la relación entre el contenido de agua normalizado y la succión. Esto se ha denominado distribución de Boltzmann. En relación a la curva de retención de agua del suelo esta función es válida para valores de succión mayores a la entrada de aire. La ecuación es la siguiente:

$$w(\psi) = w_s * e^{\frac{\alpha-\psi}{n}} \tag{22}$$

Donde: α, n = parámetros de ajuste,

w_s = Contenido volumétrico de agua cuando el suelo está saturado.

Como esta ecuación no es válida cerca de la desaturación total o en la saturación completa, (McKee & Bumb, 1987) sugirieron la siguiente relación:

$$w(\psi) = \frac{w_s}{1 + e^{\frac{\psi-\alpha}{n}}} \tag{23}$$

Donde: α, n = parámetros de ajuste,

w_s = Contenido volumétrico de agua cuando el suelo está saturado.

Esta ecuación da una mejor aproximación en rango de baja succión. La ecuación tampoco es apropiada en rango de alta succión, desde que la curva cae exponencialmente a cero en los valores de succión alto.

3.6.7 Vereecken et al.

(Vereecken et al., 1989) realizaron un estudio de regresión del modelo de van Genuchten en el cual realiza cinco modelos a partir del modelo inicial de van Genuchten, para el cual determina un modelo de dos parámetros, con lo que obtiene el siguiente modelo simplificado de van Genuchten:

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m} \tag{24}$$

Donde:

α, n, m = parámetros de ajuste,

θ_s= Contenido volumétrico de agua en suelo saturado,

θ_r= Contenido volumétrico de agua residual, y

ψ = Succión del suelo.

3.6.8 D.G. Fredlund & Xing

La función matemática de (D.G. Fredlund & Xing, 1994) se aplica en toda la gama de succiones de suelo desde 0 a 1 000 000 [kPa] como se observa en la Figura 15. La relación es esencialmente empírica y similar a los modelos anteriores, se basa en el supuesto de que el suelo consiste en un conjunto de poros interconectados que son distribuidos aleatoriamente.

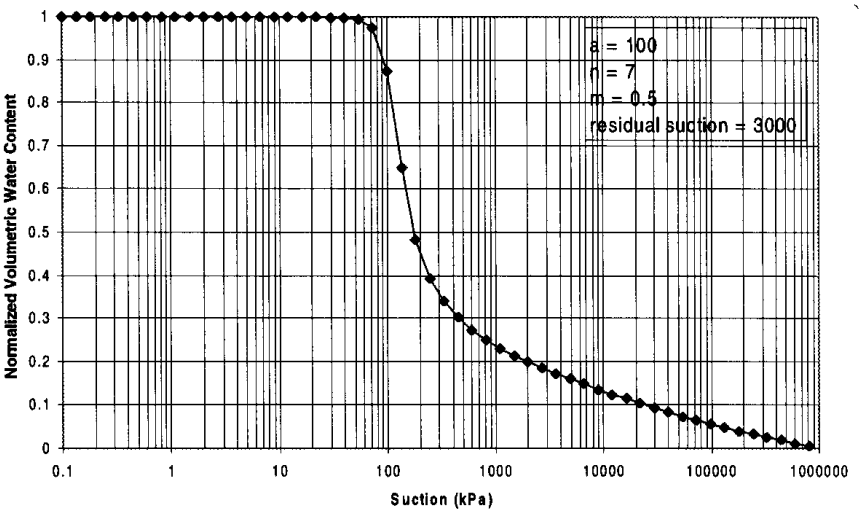

Figura 15. La SWRC normalizada para todo rango de valores de la succión. (Fredlund y Xing 1994)

La ecuación de (D.G. Fredlund & Xing, 1994), escrita en términos del contenido gravimétrico de agua, es la siguiente:

$$\theta(\psi, a, n, m) = \frac{C(\psi) * \theta_s}{\left(ln\left[e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right]\right)^m} \tag{25}$$

Donde:

α, n, m = parámetros de ajuste,

θ_s= Contenido volumétrico de agua en suelo saturado,

θ_i= Contenido volumétrico de agua en el punto de inflexión,

ψ_i = Succión del contenido de agua donde ocurre el punto de inflexión en la curva,

ψ_r = Succión residual del contenido del agua,

$s =$ Pendiente de la línea tangente a la función que cruza el punto de inflexión.

Los parametros de ajuste se pueden determinar mediante el procedimiento de regresiones no lineales, estas procedimientos fueron entregados por (D.G. Fredlund & Xing, 1994). Por lo que a,n, m y s se determinan mediante las siguientes expresiones:

$$a = \psi_i$$

$$m = 3.67 * ln\left(\frac{\theta_s}{\theta_i}\right)$$

$$n = \frac{1.31^{m+1}}{m * \theta_s} 3.72 * s * \psi_i$$

$$s = \frac{\theta_i}{ln\left(\frac{\psi_\rho}{\psi_i}\right)}$$

En la ecuación se utiliza un factor de corrección que fuerza la condición seca del suelo con un valor de succión de 1.000.000 [kPa], el factor de corrección queda definido por:

$$C(\psi) = 1 - \frac{ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{ln\left(1 + \frac{1.000.000}{\psi_r}\right)}$$

Donde ψ_r puede estimarse cercano a los 1500[kPa] para la mayoría de los suelos a menos que el valor sea conocido.

3.6.9 Pereira & Fredlund

(Pereira & Fredlund, 2000) presenta un modelo numérico que se puede utilizar para analizar el comportamiento de hinchamiento de un suelo expansivo bajo un proceso de saturación transitoria. Se analiza un problema de ejemplo que involucra el comportamiento de una masa de suelo en expansión que sufre una infiltración transitoria de agua. El comportamiento de hinchamiento del suelo se predice utilizando un procedimiento acoplado que involucra el equilibrio de la estructura del suelo y la fase del agua de poro se formula utilizando un modelo elástico incrementalmente no lineal. El enfoque del modelo fenomenológico se basa en el concepto de superficies de estado que se obtienen de un programa de pruebas de laboratorio. La conductividad hidráulica del suelo en expansión se estima a partir de la conductividad hidráulica saturada y la curva de retención de agua del suelo.

$$\mathrm{w}(\psi) = w_r + \frac{w_s - w_r}{\left(1 + \left(\frac{\psi}{c}\right)^b\right)^\alpha} \tag{26}$$

Donde:

α, b, c = parámetros de ajuste,

w_s= Contenido volumétrico de agua cuando el suelo está saturado,

w_r= Contenido volumétrico de agua residual.

3.6.10 M.D. Fredlund et al.

(M. D. Fredlund et al., 2002) continuaron con el estudio de Fredlund & Xing (1994) mediante un estudio de regresión del modelo anterior. Para llevar a cabo esto desarrollaron su estudio con las Pedo-Transfer Functions (PTF), más que nada son funciones que utilizan parámetros básicos de los suelos como la granulometría y porosidad, con fin de obtener otra propiedad del suelo (Bouma, 1989). La función de pedo-transferencia de (M. D. Fredlund et al., 2002) mostró una alta precisión en la

estimación de la pendiente máxima del SWCC según su comparación con el resto de las PTF, presentada por seis distintos autores (Figura 16). En el estudio se plantea que el valor de la entrada de aire de la curva de retención de agua (AEV), está directamente asociado al parámetro α en el modelo de Fredlund et al. (1994), y es posible obtenerlo a partir de la siguiente expresión:

$$\psi = 2T_S \frac{\cos\alpha}{\rho_w g r} \tag{27}$$

Donde:

α= ángulo de contacto,

T_s= tensión superficial del agua $[mL/T^2]$,

ρ_w= densidad del agua $[m/L^3]$,

$\psi =$ Succión del suelo $[m/LT^2]$,

$r =$ radio de poro $[L]$, y

$g =$ Aceleración de gravedad $[mL/T^2]$.

También los parámetros del modelo de Fredlund et al. (1993) n y m, tienen una PTF asociada a cada parámetro en particular con distintos valores de los mismos parámetros de regresión. Para obtener los valores de las PTF se presentan los valores de los parámetros de calibración para cada parámetro respectivamente. La PTF se presenta a continuación:

$$p(\emptyset) = p_1 \left[\frac{1}{\ln\left[e^1 + \left[\frac{10^{-\log(d_e)-1}}{p_2} \right]^{p_3} \right]} \right]^{p_4} + p_5 \tag{28}$$

Donde:

$p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 =$ parámetros de regresión de M.D. Fredlund et al. (2002),

$d_e =$ diámetro efectivo de las partículas, y

$p(\emptyset)$= Valor de n o m según los valores de parámetros de regresión.

Parámetro del modelo (SWRC)	$\boldsymbol{p_1}$	$\boldsymbol{p_2}$	$\boldsymbol{p_3}$	$\boldsymbol{p_4}$	$\boldsymbol{p_5}$
n	19	50	30	1	1
m	1.5	100	10	1	0.5

Además, el modelo utiliza una variable dependiente de la granulometría del material analizado, definida como diámetro efectivo y calculada mediante la siguiente expresión.

$$\frac{1}{d_e} = \frac{3\Delta g_1}{2d_1} \sum_{i=1}^{n} \frac{\Delta g_i}{d_i} \tag{29}$$

Donde:

d_e =diámetro efectivo,

d_1 = mayor diámetro de la sección más gruesa del material, y

Δg_1 = El peso del material de la última fracción en términos de peso total.

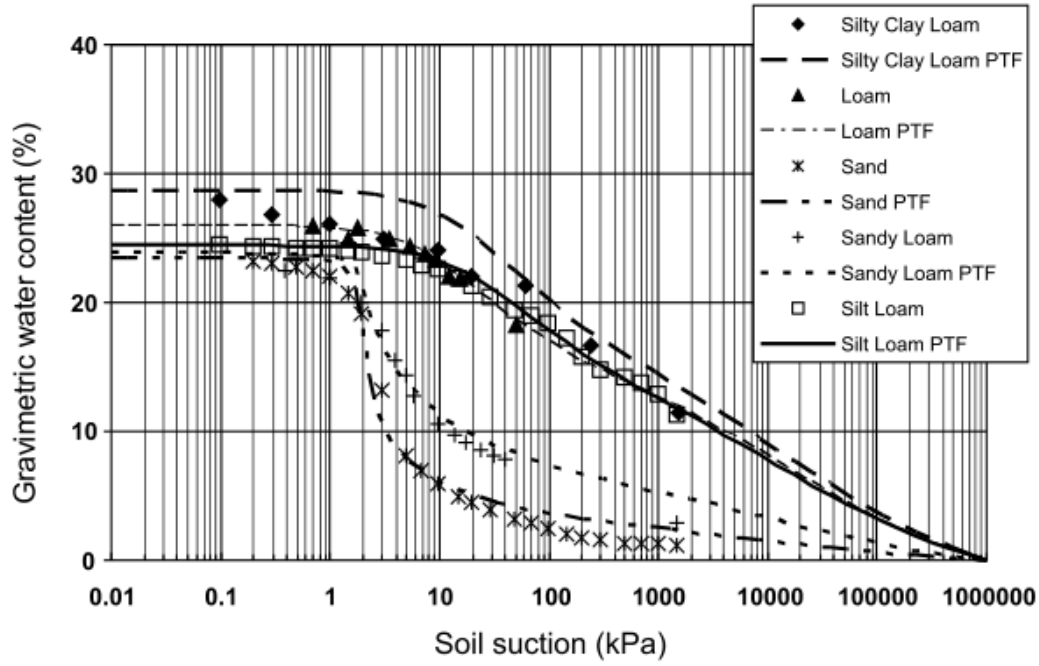

Figura 16. Mejor estimación para cada una de las cinco SWRC usando las PTF propuestas: silty clay loam R^2= 0.80; loam R^2 = 0.98; sand R^2=0.99; Sandy loam R^2=0.97; silt loam R^2=0.99. (M.D. Fredlund et al. 2002)

3.6.11 Aubertin et al. (Kovacs modificado)

En el 2003, (Aubertin et al., 2003) presentan un conjunto general de ecuaciones desarrolladas para predecir la relación entre el contenido volumétrico de agua θ (o el grado correspondiente de saturación S_r) y la succión ψ. El modelo WRC propuesto es una versión modificada del modelo de (Kovacs, 1981), que distingue entre retención de agua debido a fuerzas capilares y retención por adhesión. El conjunto completo de ecuaciones se proporciona junto con relaciones complementarias desarrolladas para aplicaciones específicas en materiales granulares y en suelos plásticos/cohesivos (arcillosos). Se muestra que el modelo proporciona un medio simple y práctico para estimar la curva de retención de agua a partir de propiedades geotécnicas básicas. A continuación, se analiza las capacidades y limitaciones del modelo y las herramientas adicionales desarrolladas para complementar su uso.

El modelo MK propuesto conserva los mismos conceptos físicos a partir de los cuales se construyó el modelo original de (Kovacs, 1981). Las modificaciones introducidas sirven para generalizar la función estadística utilizada para describir la distribución del tamaño de poro del medio que aparece en el componente capilar. Algunos parámetros constitutivos también se expresan más específicamente en función de las propiedades básicas del suelo, como se describirá a continuación.

El modelo MK hace uso de un parámetro definido como la elevación capilar equivalente h_{co}[L] en el medio poroso, queda definido por:

$$h_{co} = \frac{b}{e * D_{10}} \tag{30}$$

Con:

$$b = \frac{0.75}{1.117 * \log(C_u) + 1}$$

Donde:

$C_u =$ coeficiente de uniformidad, $C_u = {D_{60}}/{D_{10}}$

$\mathrm{D}_{60} =$ tamaño de abertura del tamiza correspondiente al 60% del material que pasa,

$\mathrm{D}_{10} =$ tamaño de abertura del tamiza correspondiente al 10% del material que pasa,

$e =$ índice de vacíos inicial.

En el modelo original de (Kovacs, 1981) y el modelo MK consideran que el agua es retenida por fuerzas capilares, responsables de la saturación capilar S_c , y por fuerzas adhesivas, que provocan saturación por adhesión S_a. En estos modelos, ambos componentes actúan simultáneamente, por lo que se incluyen en las mediciones realizadas para determinar la relación $\theta - \psi$.

La ecuación del componente S_c se obtiene a partir de una función de distribución del tamaño de poro acumulativo, mientras que la ecuación de S_a viene dada por una ley de interacción con la atracción de tipo van der Waals entre la superficie del grano y los dipolos de agua. El componente S_c es más importante a valores de succión relativamente bajos, mientras que el componente S_a se vuelve dominante en una succión más alta cuando se ha extraído la mayor parte del agua capilar. El conjunto de ecuaciones propuesto para el modelo MK se escribe de la siguiente manera para el grado de saturación:

$$S_r = \frac{\theta}{n} = S_c + S_a^*(1 - S_c) \tag{31}$$

Con:

$$S_a^* = 1 - \langle 1 - S_a \rangle$$

Donde:

$\langle - \rangle =$ representa los paréntesis de Macauley, $\langle y \rangle = 0.5 \ * \ (y + |y|)$.

$\theta =$ humedad volumétrica,

$n =$ porosidad.

Luego para obtener S_c y S_a respectivamente:

$$S_c = 1 - \left[\left(\frac{h_{co}}{\psi}\right)^2 + 1\right]^m * e^{\left[-m*\left(\frac{h_{co}}{\psi}\right)^2\right]}$$

$$S_a = a_C C_\psi * \frac{\left(\frac{h_c}{\psi_n}\right)^{\frac{2}{3}}}{e^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{\psi}{\psi_n}\right)^{\frac{1}{6}}}$$

Con:

$$C_\psi = 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{\psi_0}{\psi_r}\right)}$$

Donde: ψ_0 =diámetro efectivo,

ψ_n = mayor diámetro de la sección más gruesa del material.

Para aplicar el modelo, se deben definir explícitamente tres parámetros en las ecuaciones constitutivas: parámetro $m, a_c\ y\ \psi_r$. Con base en investigaciones realizadas por los autores en una diversidad de suelos y medios particulados, se ha encontrado que los valores de $m, a_c\ y\ \psi_r$ pueden predeterminarse a partir de propiedades geotécnicas básicas. Así quedan definidos como:

$$\psi_r = \frac{0.42}{(e * D_h)^{1.26}} \tag{32}$$

Con:

$$D_h = [1 + 1.17 * \log(C_u)] * D_{10}$$

En la aplicación predictiva del modelo MK, los valores se asignan previamente al coeficiente de adhesión. Se sugiere un valor de a_c igual a 0.01 en el caso de materiales granulares (para LL por debajo del 30% al 40%), y de 0.0007 en el caso de materiales plásticos/cohesivos. También asigna un valor fijo al parámetro de distribución del tamaño de poro m =0.00003 en el caso de materiales plásticos/cohesivos, mientras que m se ha relacionado con el coeficiente de uniformidad $m = {}^{1}/_{C_u}$ para materiales granulares.

Finalmente, con todos los parámetros anteriormente expuestos se logra obtener la curva de retención de agua como se presenta en la Figura 17.

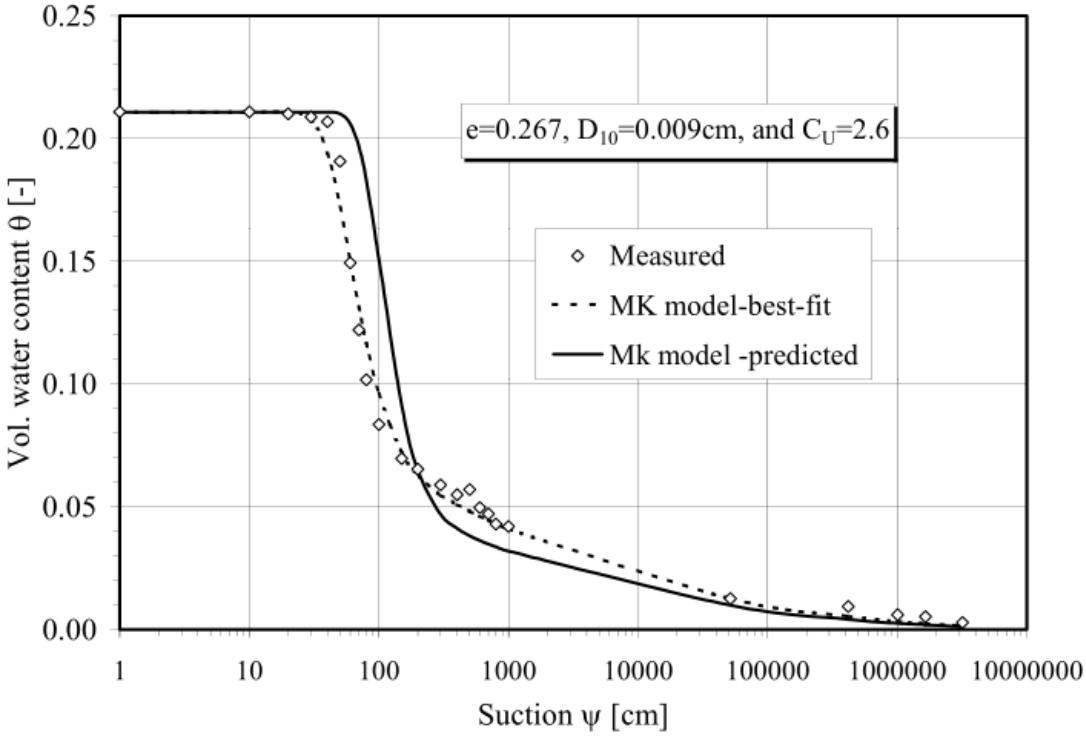

Figura 17. Curva de retención de agua obtenida mediante método MK para una arena firme, uniforme y densa (Aubertin et al 2003).

3.6.12 Pham et al.

(Pham et al., 2005) presentaron un modelo que requiere datos relativamente simples para la calibración. Los cambios de volumen y contenido de agua se pueden calcular de forma independiente utilizando el modelo. También es capaz de tener en cuenta: i) histéresis en la curva característica suelo-agua, SWCC; y ii) deformaciones elásticas y plásticas en el suelo. Este modelo conjuga numerosos estudios anteriores para obtener una buena aproximación de la SWRC.

Se adoptaron seis supuestos basados en los resultados de estudios previos para el modelo constitutivo propuesto.

• Supuesto 1: Un poro particular tomado en consideración en el suelo tiene solo dos estados; i) el poro está lleno de agua, o ii) el poro está seco.

• Supuesto 2: Cada poro lleno de agua en el suelo también tiene dos índices: i) índice de compresión virgen, C_c^p y ii) índice de compresión de descarga-recarga, C_s^p .

• Supuesto 3: Hay dos tipos de poros: i) poros compresibles y ii) poros no compresibles. Los poros compresibles son poros relativamente grandes y los poros no compresibles son poros interconectados relativamente pequeños.

• Supuesto 4: Los índices de compresión virgen y de descarga-recarga para un poro en el suelo son proporcionales al volumen del poro en el estado de tensión de referencia.

• Supuesto 5: los poros se deforman y el agua se absorbe y se drena de forma independiente.

• Supuesto 6: Los poros llenos de aire son incompresibles.

Por lo que la formulación matemática para encontrar la SWRC queda definida de esta manera:

$$w(\psi) = \left\{\left[w_{sat} - \frac{C_c}{G_s}\log(\psi) - w_r\right] * \frac{a}{\psi^b + a} + w_r\right\}\left\{1 - \frac{\ln\left[1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right]}{\ln\left[1 + \frac{10^6}{\psi_r}\right]}\right\} \tag{33}$$

Donde: $\alpha, b =$ parámetros de regresión,

$\mathrm{C}_c =$ índice de compresión virgen,

$\mathrm{G}_s =$ gravedad especifica de las partículas de suelo,

$w_r =$ contenido gravimétrico de humedad residual,

$w_{sat} =$ contenido gravimétrico de humedad de saturación,

$\psi_r =$ succión residual. [kPa].

El modelo consta de sólo de 2 parámetros de regresión a diferencia de modelos más antiguos, sin embargo, logra predecir de forma consistente el comportamiento observado y ratificado en estudios posteriores ((Pham & Fredlund, 2008);(Pham & Fredlund, 2011)) como muestra la Figura 18.

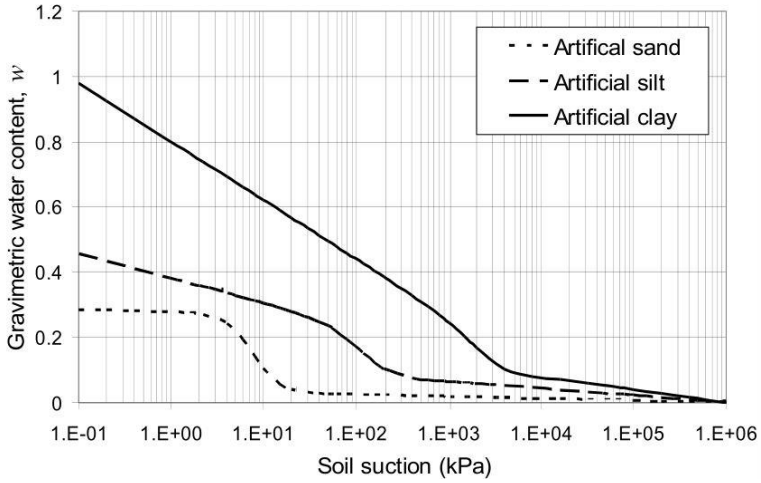

Figura 18. SWRC para arena artificial, limo y arcilla (Q. Pham y Fredlund 2005).

3.6.13 Pham & Fredlund

Para el año 2008 (Pham & Fredlund, 2008), propusieron ecuaciones para 3 distintas zonas de la curva de retención de agua. Una SWRC se puede representar mediante tres líneas rectas con pendientes de $S_1, S_2\ y\ S_3$. Se supone que el contenido de agua a una succión del suelo de $10^6\ [kPa]$es igual a cero (D.G. Fredlund & Xing, 1994). Los parámetros t1 y t2 controlan las transiciones entre diferentes porciones de la curva SWRC. Tres ecuaciones correspondientes a las tres líneas inclinadas en un gráfico semilogarítmico (es decir,$w_1(\psi),\ w_2(\psi)\ y\ w_3(\psi)$) se pueden escribir de la siguiente manera:

$$w_1(\psi) = w_u - S_1 * \log(\psi) \qquad 1 \leq \psi \leq \psi_a$$

$$w_2(\psi) = w_{ae} - S_2 * \log\left(\frac{\psi}{\psi_{ae}}\right) \qquad \psi_a \leq \psi \leq \psi_r$$

$$w_3(\psi) = S_3 * \log\left(\frac{10^6}{\psi}\right) \qquad \psi_r \leq \psi \leq 10^6$$

Cada subíndice asociado a la succión de las ecuaciones anteriores, está relacionado con un punto de entrada de aire, por lo que la succión para cada zona de la curva queda definida por:

$$\psi = 10^{(w_u - w)/S_1} \qquad 1 \leq \psi \leq \psi_a$$

$$\psi = \psi_{ae} 10^{(w_{ae} - w)/S_2} \qquad \psi_a \leq \psi \leq \psi_r$$

$$\psi = 10^{(6-w)/S_3} \qquad \psi_r \leq \psi \leq 10^6$$

Las que se muestran definidas en la Figura 19 a continuación:

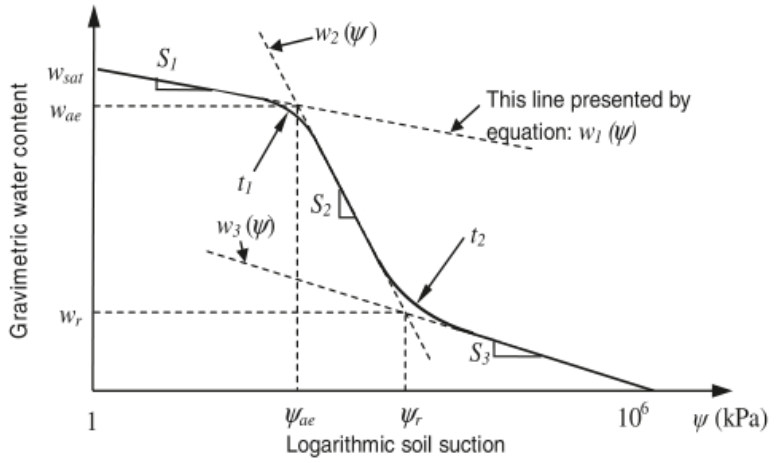

Figura 19. Típica SWRC para un suelo que cambia de volumen con la indicación de la significancia de las variables involucradas (Q. Pham y Fredlund 2008).

Estas tres ecuaciones propuestas por (Delwyn G. Fredlund & Pham, 2006), cubren el rango para succiones bajas hasta succiones de 1.000.000 [kPa], es decir, succiones bajo el valor de la entrada de aire y succiones sobre el valor de la succión residual (Pham et al., 2005). Para este método, tanto los parámetros, como así también, las pendientes se determinan en base a datos obtenidos en laboratorio, por lo que el ajuste queda supeditado en su totalidad a los datos experimentales, conllevando los errores que éstos puedan poseer.

Cabe destacar que siguen desarrollando modelos matemáticos para la curva en relación a estudios anteriores o estudios contemporáneos, pero lo que se mostró en esta sección del estudio son los más relevantes a través de la historia de los suelos parcialmente saturados. Por lo que en el capítulo a seguir se detallaran las generalidades de los modelos matemáticos, pasando por todos los parámetros necesarios para ejecutar los modelos y las limitaciones de esta curva.

3.7 Parámetros de los modelos matemáticos de estimación y ajuste

La desaturación del suelo se divide en tres zonas: zona de saturación, zona de desaturación y etapa residual (Figura 20). Estas zonas se dividen por dos puntos a lo largo de la SWCC, por el valor de entrada de aire del suelo o AEV (Air Entry Value) y las condiciones residuales. La zona de saturación se limita por el valor de entrada de aire, se puede representar utilizando los principios de la mecánica de suelos saturados. La zona de desaturación se encuentra entre el valor de la entrada de aire y las condiciones residuales, en esta zona se requieren las teorías de la mecánica de suelos parcialmente saturados. Las propiedades del suelo parcialmente saturado en la zona de desaturación se vuelven no lineales. Al ingresar en la etapa residual hay diferencias en el comportamiento del suelo (Delwyn G. Fredlund et al., 2012). El punto de desaturación se define como la succión a la cual el aire empieza a entrar en el suelo, por lo general desde el límite de aire el cual tiene un alto grado de saturación.

3.7.1 Entrada de Aire (AEV)

Al reducirse el grado de saturación, se aproxima el valor de entrada de aire (AEV) de un suelo, punto en el cual el aire se encuentra en forma de burbujas ocluidas dentro de la fase de agua. “El valor de entrada de aire depende del tamaño de los poros, esto significa que mientras los poros sean más pequeños el valor de entrada de aire es mayor” (Al Haj, 2013). El AEV se produce en altos grados de saturación (90% al 100%). Gráficamente, el AEV se puede determinar a partir de la intersección de la línea de pendiente recta y la línea de la saturación inicial ($S_r = 100\%$).

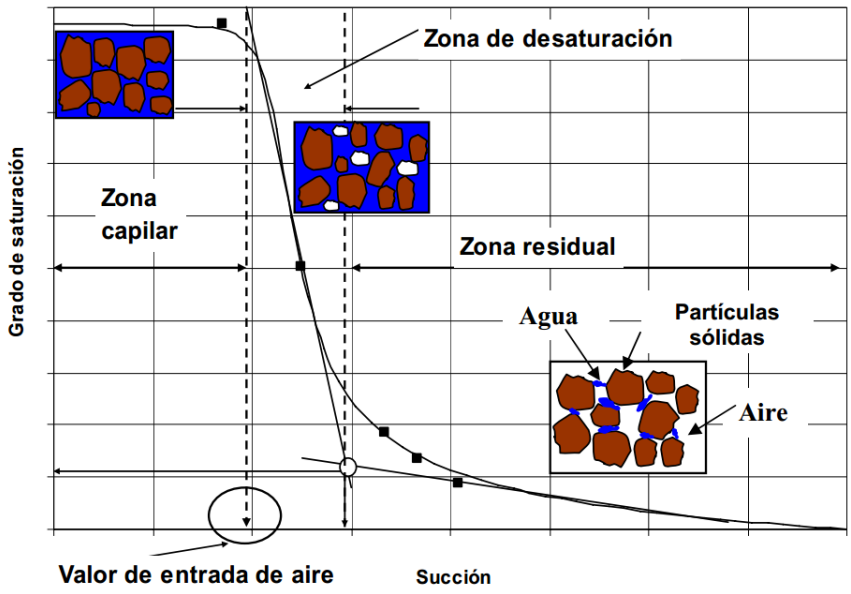

Figura 20. Regiones típicas de la curva de retención de agua (Pérez 2008)

Este es el parámetro más importante que se puede obtener de la curva de retención de agua, valor de la entrada de aire o Air Entry Value (AEV), que representa la succión matricial en la que los poros más grandes del material comienzan a drenar (Aubertin et al., 1998). En la actualidad existen varios enfoques para la determinación del valor del AEV a partir de la relación de la curva de retención de agua.

Probablemente el método más común utilizado para la determinación del AEV, es el método propuesto por (Brooks & Corey, 1964). Este método se basa en la suposición de una simplificación idealizada de la curva de retención de agua en una gráfica semilogarítmica en dos líneas rectas, una horizontal y otra inclinada. La intersección de estas dos líneas da como resultado el valor de la succión para el AEV, que da el inicio a la desaturación (Musso & Suazo, 2019)(Figura 21).

Otro método, se basa en el hecho de que en las cercanías del AEV, se crean algunos canales de aire continuo dentro del material (Kovacs, 1981). Esto usualmente ocurre para una relación del grado de saturación aproximado del 90% (Corey & Laliberte, 1967). Por ello distintos autores han definido arbitrariamente el valor del AEV como la succión correspondiente a un contenido de humedad cercano al 90 % de la humedad de saturación (0.9*θs).

El tercer método se basa en ajustar los datos experimentales ($\alpha_{VG}, n_{VG}, m_{VG}$) de la ecuación de van Genuchten (1980), utilizando el método RETC (Williams, 1991). Este método lo plantea por medio de la siguiente ecuación:

$$\theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = [1 + |\alpha_{VG}\psi|^{n_{VG}}]^{m_{VG}} \tag{34}$$

Donde:

$\alpha_{VG}, n_{VG}, m_{VG}$ = parámetros de ajuste de van Genuchten,

θ_e = contenido volumétrico de agua efectivo,

θ_s = contenido volumétrico de agua saturado (considerado igual a la porosidad),

Luego, al ajustar los parámetros del modelo a los datos experimentales, el código TETC calcula un valor para el parámetro α, que se toma como el inverso aditivo del AEV (i.e. $\alpha = \psi a - 1$)

Los tres métodos presentados anteriormente difieren en sus resultados, siendo el valor entregado por el método de (Williams, 1991), un método que sobreestima su magnitud. Los valores entregados por el método de (Brooks & Corey, 1964), usualmente son los menores, sin embargo, para obtener su magnitud se pueden requerir algunos ajustes para el valor de θr para garantizar que los resultados obedezcan a esta representación idealizada de la curva de retención de agua. Finalmente, el segundo método presentado (90%), proporciona un valor intermedio que por lo general se acerca más al valor proporcionado por (Brooks & Corey, 1964). Este método posee la ventaja de que es un método simple, ya que no requiere ningún cálculo o ajuste de los resultados (Aubertin et al., 1998).

A modo complementario, se puede mencionar que en general, se espera que el valor del AEV se encuentre en el rango de 0,2 a 1[kPa] para arenas gruesas, 1 a 3,5[kPa] para arenas medianas, 3,5 a 7 [kPa] para arenas finas, 7 a 25[kPa] para limos y más de 25[kPa] para arcillas (Kovács, 1981).

3.7.2 Succión Residual

El segundo parámetro principal de la SWRC es el punto de succión residual. Este punto de la curva corresponde al contenido de agua para el cual, la fase líquida deja de ser continua y los poros se encuentran casi totalmente llenos por aire. En la práctica, este valor representa la succión o el contenido de agua asociado presente en la matriz de suelo donde un aumento adicional de presión negativa o succión no produce cambios significativos en el contenido de agua (Musso & Suazo, 2019).

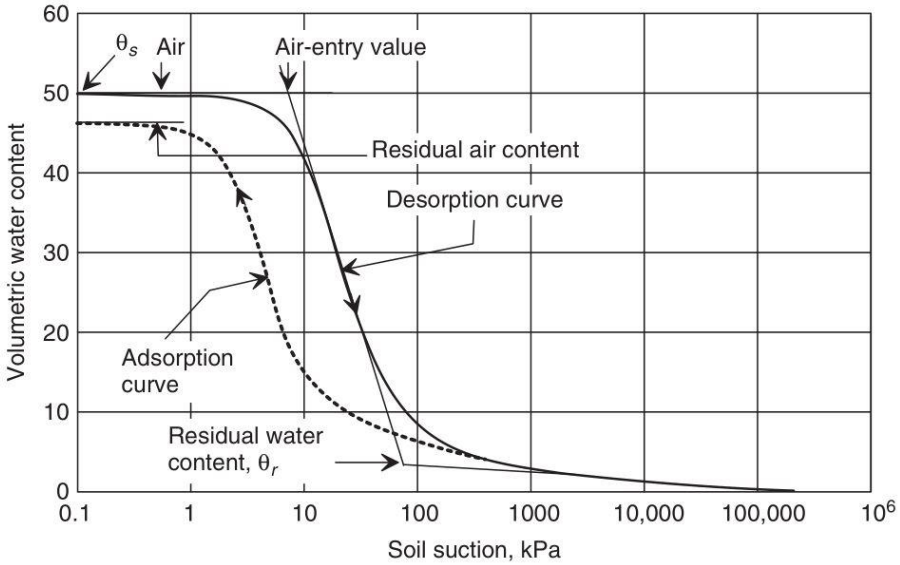

Figura 21. Curva de retención de agua con puntos típicos (Fredlund y rahardjo 1993)

El inicio de la etapa residual ocurre cuando la succión está en el rango de 500 a 1500[kPa] para arcillas con baja plasticidad y es menor para arenas y limos. Para arcillas de plasticidad media a alta, el inicio de la etapa residual se produce en succiones superiores a 1500[kPa] (Al Haj, 2013). En general, se espera que el valor de la humedad residual se encuentre cercano al 5% para arenas limosas, cercano al 10% para limos y un 15% para arcillas.

Muchos investigadores han propuesto obtener la succión residual mediante un parámetro más de regresión (e.g. modelo de (Van Genuchten, 1980); (Vereecken et al., 1989). La propuesta por (Kovacs, 1981), es la más simple y efectiva, se presenta a continuación:

$$\psi_r = \frac{0.42}{(e * D_h)^{1.26}} \tag{35}$$

Con:

$$D_h = [1 + 1.17 * \log(C_u)] * D_{10}$$

Donde: C_u = coeficiente de uniformidad, $C_u = {}^{D_{60}}/_{D_{10}}$

D_h = diámetro efectivo de la partícula de Kozeny,

D_{10} = tamaño de abertura del tamiza correspondiente al 10% del material que pasa.

3.7.3 Resistencia al Corte

La resistencia de corte del suelo saturado es la resistencia mínima del suelo saturado, o sea la condición más desfavorable del suelo con la saturación completa. Teniendo en cuenta los amplios grados de saturación a que el suelo puede estar sometido en la naturaleza, el conocimiento de la variación de la resistencia asociado a los cambios del contenido de agua (o grado de saturación) conducirán al conocimiento más completo de su comportamiento. Los principales factores que afectan la resistencia al corte son la densidad seca (o el índice de poros), el contenido de humedad y el tipo de estructura ((Lambe et al., 1972); (Seed & Chan, 1961).

Diferentes autores comprueban que la resistencia al corte aumenta con la succión partiendo del estado saturado. (Brüll et al., 1980) encontró una relación lineal entre el módulo dinámico a pequeñas deformaciones y la succión en ensayos en limos y arenas, en los que midió succiones de hasta 800 [kPa]. El módulo de corte aumenta al incrementar la succión, pero su incremento no es ilimitado ya que, si el suelo se seca por completo, la succión desaparece. Esta conclusión ha sido corroborada por los resultados de los ensayos realizados sobre limos y arenas en columna resonante por (Wu et al., 1984). (Delage et al., 1987) realizó ensayos triaxiales con succiones superiores a los 800[kPa] y observó también mayor rigidez al corte al aumentar la succión.

Otra importante contribución para el desarrollo de un modelo constitutivo para el comportamiento de suelos parcialmente saturados fue hecha por (D. G. Fredlund et al., 1978), quienes sugirieron una relación entre la resistencia al corte (τ) de suelos parcialmente saturados y las dos variables de estado de esfuerzo $\sigma - u_a$ y $u_a - u_w$, como una extensión del criterio de Morh – Coulomb, la cual queda representada por:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a)\, tan\, \phi' + (u_a - u_w\,)\, tan\, \phi^b \qquad (36)$$

Donde c'y ϕ' son la cohesión y el ángulo de fricción (con respecto al esfuerzo efectivo) a una condición saturada y ϕ^b es el ángulo de fricción interna con respecto a la succión, indica la tasa de crecimiento de la tensión de corte producto de la matriz de succión $u_a - u_w$. (D. G. Fredlund et al., 1978), demostraron experimentalmente que el valor de ϕ' fuese igual para condiciones saturadas y no saturadas en ensayos triaxiales sobre muestras compactadas a contenidos de agua constante. Donde, todos los puntos de falla fueron graficados en el espacio τ , $u_a - u_w$, $((\sigma_1 + \sigma_2)/2) - u_a$(Figura 22). Los puntos de falla fueron generados en la superficie plana. Valores de ϕ', ϕ^by c' fueron calculados de los resultados y estos fueron usados para definir la ecuación (36).

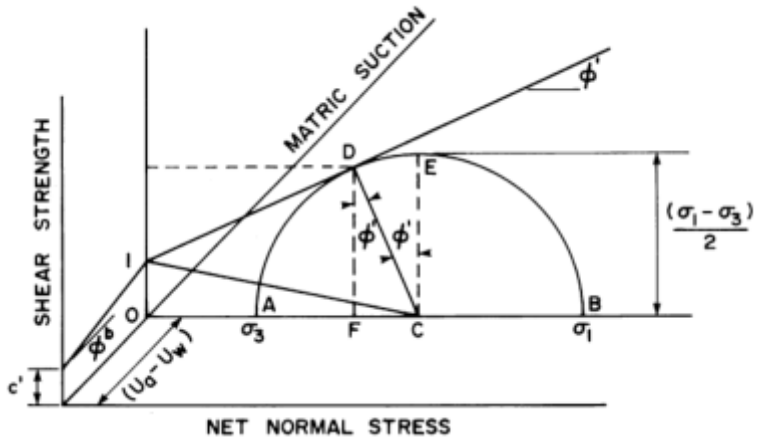

Figura 22. Representación tridimensional del esfuerzo de compresión expresado en términos de variables de estado de esfuerzo (Vanapalli et al. 1999)

(Gulhati & Satija, 1981) examinaron la resistencia al corte de suelos parcialmente saturados llevados a cabo en ensayos triaxiales bajo condiciones drenadas y contenidos de agua constante. Correlacionaron la resistencia de falla con el esfuerzo neto y la succión, introduciendo dos factores de fricción. Ellos graficaron los puntos de falla en la superficie definida por q , $\sigma - u_a$ y $u_a - u_w$, concluyendo que la resistencia de suelos parcialmente saturados puede ser definido en términos de dos variables de estado de esfuerzos, $\sigma - u_a$ y $u_a - u_w$.

(Escario & Sáez, 1986) presentaron resultados que sugieren la necesidad de modificar la ecuación (36). Escario y Sáez realizaron ensayos de corte directo en condiciones drenadas sobre arcillas a diferentes valores de succión controlada, en la Figura 23 se muestran los resultados de unos de los suelos usados. Los resultados indicaron que ϕ^b en la ecuación (36) no fue constante para un tipo de suelo dado.

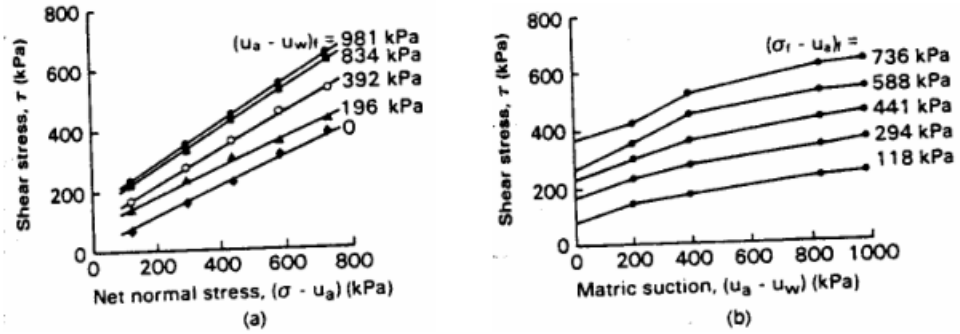

Figura 23. Resistencia a la falla vs succión y esfuerzo normal neto para arena arcillosa de Madrid (Escario y Sáez 1986)

(Gan et al., 1988), también observaron la no linealidad de la resistencia al corte con el incremento de la succión en ensayos triaxiales. Cada ensayo de corte se realizó a valores de succión controlada. A bajos valores de succión el valor de ϕ^b fue aproximadamente igual a ϕ' y entonces ϕ^b comenzó a caer conforme la succión incrementaba (Figura 24).

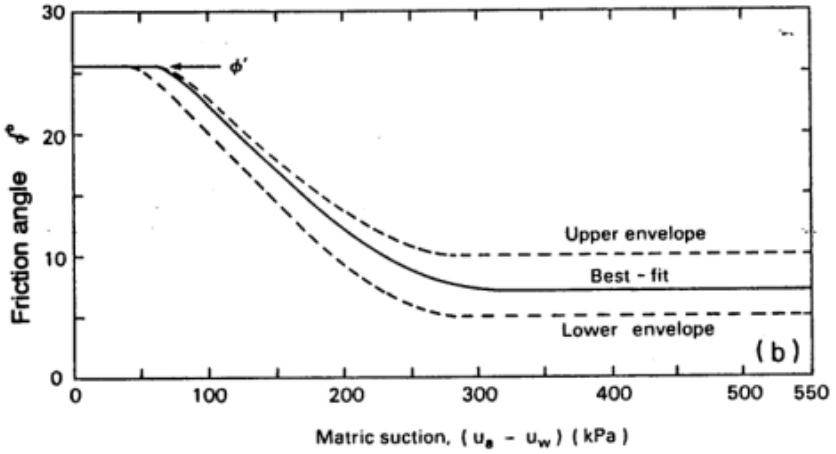

Figura 24. Valor de ϕ^b contra succión (Gan, Fredlund y Rahardjo,1988)

La ecuación 36 presenta una superficie de falla lineal, sin embargo, resultados experimentales han demostrado la no linealidad de la envoltura de falla, lo cual es admitido por (Khanzode et al., 2002). Sin prejuicio de lo anterior, la ecuación 36 se considera válida en los tramos iniciales de las tensiones efectivas, en las cuales el ángulo ϕ^b se iguala al ángulo de fricción interna drenado. Una vez que se supera la presión de entrada de aire se considera una relación no lineal con la succión, la cual tiende a un valor asintótico como se aprecia en la Figura 25 (Alfaro Soto, 2008).

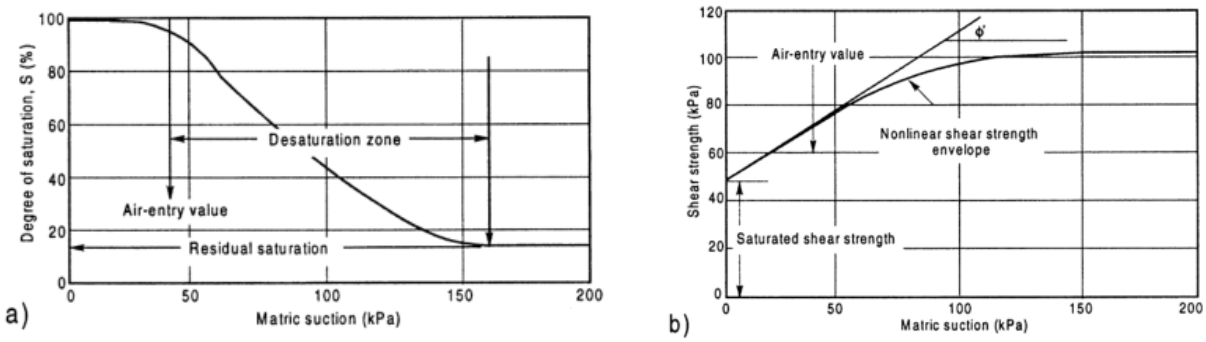

Figura 25. a) Una SWRC típica. b) Comportamiento de la resistencia al corte del suelo y como se relaciona con la SWRC.(S.K.Vanapalli et al. 1996)

3.7.4 Coeficiente de permeabilidad

El coeficiente de permeabilidad es una función del estado de tensión en el suelo. En particular, el coeficiente de permeabilidad es una función primaria de la succión matricial. La función de permeabilidad se puede calcular empíricamente a partir del conocimiento del coeficiente de permeabilidad saturado y la curva característica del agua del suelo como se muestra en Figura 26. Los cálculos se basan en el supuesto de que el agua solo puede fluir a través de la porción de agua del suelo. Por lo tanto, una integración a lo largo de la curva característica de agua del suelo proporciona una medida de la cantidad de agua en el suelo. Para la mayoría de los problemas geotécnicos, esta forma de caracterización de la función de permeabilidad es satisfactoria. También se han propuesto varias otras funciones, pero en la actualidad, la ecuación de Gardner (1958) parece tener una aceptación bastante amplia.

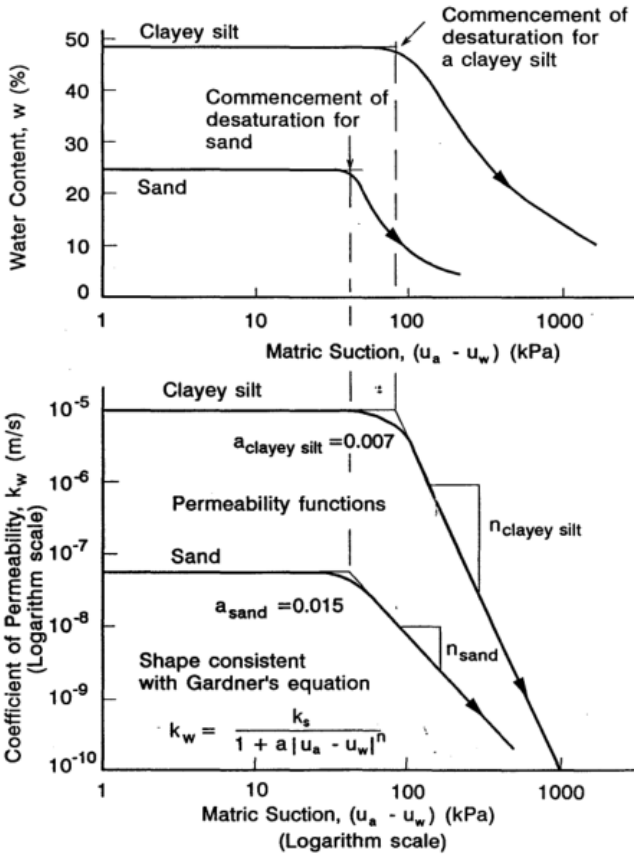

Figura 26. Las funciones de permeabilidad empíricas de Gardner se muestran para una arena y un limo arcilloso.

En cuanto a la estimación de la permeabilidad no saturada de los suelos, van Genuchten establece una relación en base a los parámetros de ajuste del modelo, asociándolos con la permeabilidad saturada.

$$\frac{K_\psi}{K_s} = \frac{\{1-(\alpha\psi)^{n-1}[1+(\alpha\psi)^n]^{-m}\}^2}{[1+(\alpha\psi)^n]^{m/2}} \tag{37}$$

Donde: K_ψ: Coef. Permeabilidad para una succión matricial ψ ; K_s: Coef. Permeabilidad saturado; y a, n, m: parámetros de ajuste de van Genuchten.

3.8 Restricciones de la SWRC

3.8.1 Tipo de muestra

Se debe tener cuidado a la hora de ensayar muestras para obtener parámetros de la SWRC ya que la mayoría de las muestras provienen perturbadas en relación a la condición in situ que presentaban al momento de la extracción. Es certero señalar que muchas de las teorías de la mecánica del suelo utilizadas en la ingeniería geotécnica se basan en el supuesto de que es posible obtener muestras de suelo inalterado que se pueden probar para medir las propiedades físicas del suelo in situ. Los datos de la SWRC son recolectados de una variedad de fuentes que generalmente habrán utilizado varios procedimientos de preparación de muestras diferentes. Los estados de preparación inicial para una muestra de suelo se pueden clasificar de la siguiente manera: (i) muestras no perturbadas que retienen la estructura del suelo in situ, (ii) muestras completamente remodeladas donde el suelo se mezcla con agua para formar una pasta semilíquida (“slurry”), y (iii) remodeladas y muestras compactadas donde

el contenido de agua inicial está cerca del límite plástico. Independientemente de cuál de los procedimientos anteriores se utilice, las muestras de suelo se cubren con agua y se dejan saturar. Por lo tanto, la succión del suelo se reduce a cero antes de comenzar la prueba formal.

La diferencia entre los diversos procedimientos de preparación de muestras puede no ser de gran importancia para un suelo arenoso, pero ocurre lo contrario para un suelo arcilloso. La estructura del suelo y la macroestructura secundaria se vuelven de creciente preocupación para los suelos ricos en arcilla. La Figura 27 muestra el efecto que los estados iniciales anteriores pueden tener sobre las curvas de desorción para un suelo arcilloso. Es bien sabido que no existe una SWRC única para un suelo en particular.

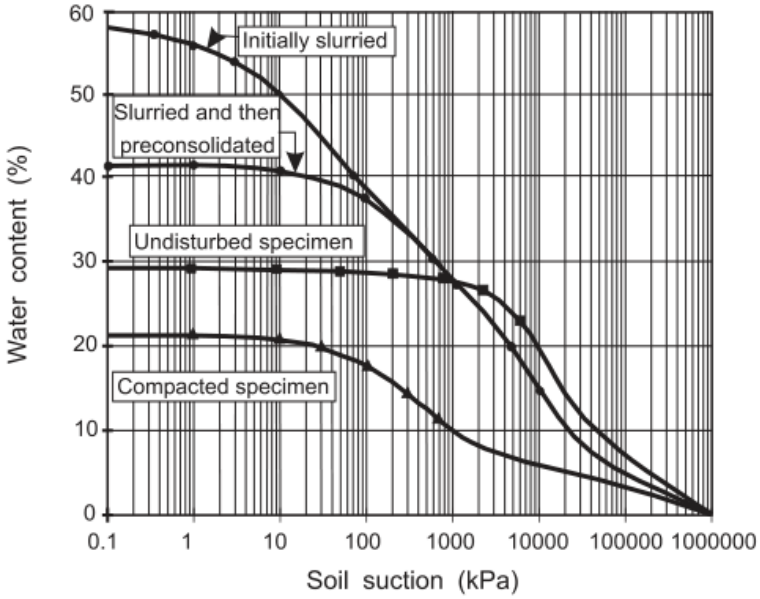

Figura 27. Ilustracion de la influencia del estado incial de la muestra en la curva de retencion (Fredlund 2002)

Cabe destacar que muestras no perturbadas encapsuladas en diámetros pertinentes a normativas ASTM provenientes desde el sitio en análisis, son la muestra ideal para llevar a cabo los ensayos de laboratorio para que la teoría se asemeje de manera adecuada a la práctica y no se desvirtué el interés del análisis tras los ensayos.

3.8.2 Histéresis de la SWRC

En la investigación de la SWRC diversos autores destacaron un fenómeno de especial relevancia, la histéresis. El contenido de agua y la energía potencial del agua del suelo no están relacionados de forma única, porque la cantidad de agua que se relaciona a una succión matricial depende de la distribución del tamaño de los poros y de las propiedades de las interfaces aire-agua-suelo. Se puede obtener una curva característica mediante una muestra totalmente saturada y aplicando succión o presión se desatura (secado) o mediante un humedecimiento gradual de un suelo inicialmente seco o con bajo contenido de agua. Las dos vías anteriores producen curvas que en la mayoría de los casos no son idénticas; El contenido de agua en la curva de "secado" es más alto para una succión matricial dada que el de la curva de "humectación".

Debido a que la curva experimenta variaciones en su conformación dependiendo del proceso en que se encuentre (Figura 28), ya sea humectado o secado, esto significa que dependiendo del proceso en el suelo pueden existir distintos valores de contenido de agua para la misma succión. Las curvas características de secado y humectación son significativamente diferentes y, en muchos casos, se hace necesario diferenciar las propiedades del suelo asociadas con la curva de secado de las asociadas con la curva de humectación. Esto significa que se debe tomar una decisión con respecto al proceso que se simulara (es decir, el proceso de secado o humectación) y luego usar la función de propiedad del suelo insaturado estimada apropiada. Despreciar los efectos de histéresis en los cálculos puede resultar en discrepancias significativas entre los resultados medidos y pronosticados.

La histéresis asociada al proceso de secado o humectación del suelo confirma que no existe una única curva característica para un mismo tipo de suelo. Los bordes exteriores tanto el superior como inferior del área donde se desarrolla la histéresis, están demarcados por las curvas iniciales de humectación y secado respectivamente. Adicionalmente existen un sin número de curvas de exploración intermediaras (curvas de barrido) entre los límites de humectación y secado como se muestra en la Figura 28. Las curvas de barrido se tornan asintóticas a las curvas iniciales. Una muestra no perturbada proveniente del lugar donde se lleva el análisis, encontrará su succión del suelo entre el área que generan las curvas iniciales de humectación y secado.

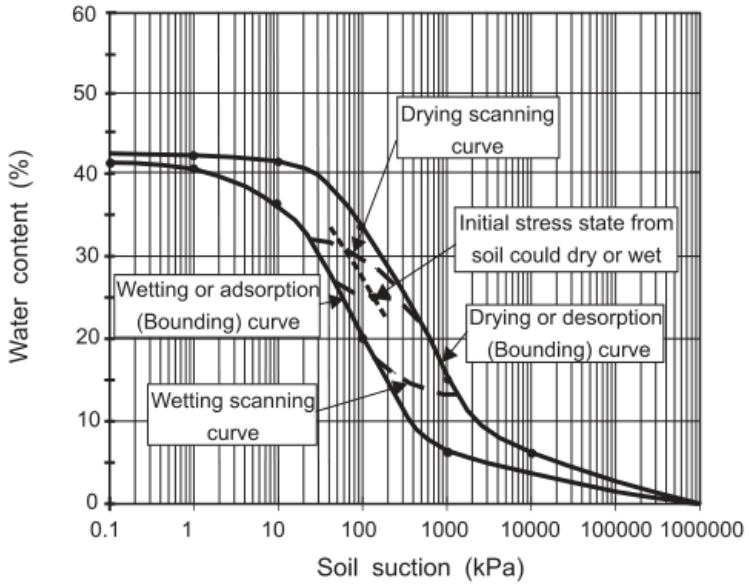

Figura 28. Descripcion grafica de las curvas intermediarias entre la humectacion(wetting) y secado(drying), tambien las curvas inciaiales (D.G.Fredlund 2000)

Puede haber varias razones para el efecto de histéresis. Estos incluyen: (1) el efecto "ink bottle" (botella de tinta) causado por la falta de homogeneidad de las diferentes formas y tamaños de los

poros interconectados. El progreso del secado está controlado por el radio de poro más pequeño, r, pero la humectación se basa en el radio de poro más grande R (Figura 29c); (2) varios ángulos de contacto líquido-sólido para avanzar (humedecer) y retroceder (secar) el menisco de agua (Figura 29b); (3) aire atrapado en el suelo recién mojado; y (4) la contracción y expansión del suelo bajo humectación y secado provoca diversas alteraciones en la estructura del suelo. Al reorganizar los agregados y los gránulos, el cambio de volumen altera la distribución del tamaño de los poros y la SWRC depende de la distribución del tamaño de los poros del suelo. Esto, a su vez, tiene relación con la porosidad y la distribución del tamaño de grano.

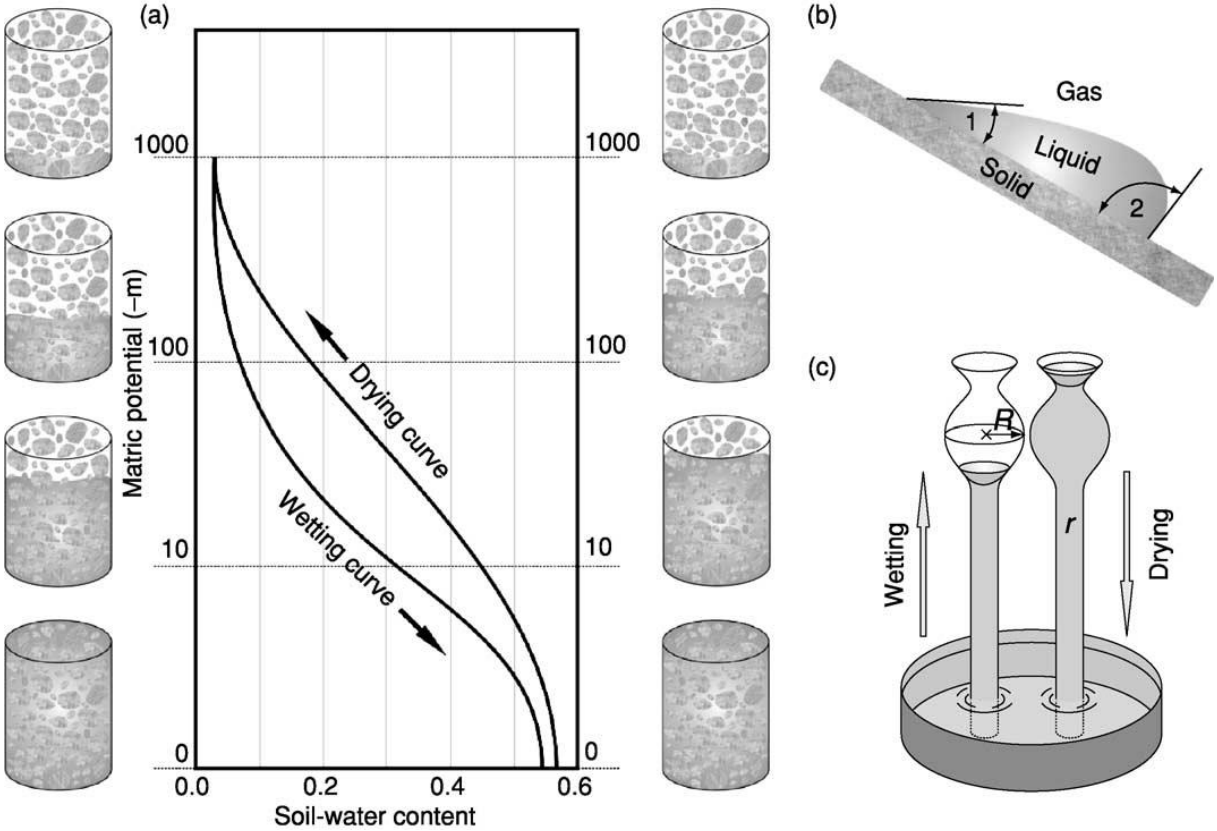

Figura 29. (a)Histeresis de la curva caracteristica del suelo. (b) Efecto del angulo de contacto y (c) el efecto "ink bottle" como potencial mecanismo de histeresis (M Tuller, 2005)

En el proceso de humectación, el efecto de botella de tinta conduce a un retraso que se produce en el estado residual. Teniendo en cuenta que gráficamente la parte media de la curva es la parte más significativa de SWRC, y debido a que el efecto de botella de tinta ocurre principalmente con una alta succión matricial, este factor a menudo se considera insignificante. Los efectos de expansión y contracción son importantes para los suelos arcillosos, pero puede ser desestimados por los suelos granulares típicos con baja plasticidad. El efecto de aire atrapado en el proceso de humectación también puede despreciarse. El efecto del ángulo de contacto es el factor de histéresis más significativo para muchos tipos de suelos, particularmente para suelos con una textura relativamente gruesa.

3.8.3 Preparación de la probeta

La densidad de la probeta de suelo tiene un efecto significativo en la SWRC, ya a qué medida que varía la densidad inicial de esta, se generan distintas entradas de aire para una misma muestra de suelo, debido al tamaño de los macroporos y microporos. (Chen, 2018) escribió el artículo "soil water retention curves derived as a function of soil dry density" donde demuestra experimentalmente que al comenzar desde succión cero en la SWRC, el contenido volumétrico de agua inicial de las muestras de suelo con alta densidad fue bajo. La disminución del contenido volumétrico de agua inicial puede

deberse a la reducción del volumen de vacíos en el aumento de la densidad seca inicial. El contenido volumétrico de agua de todos los suelos disminuyo a medida que aumento la succión, pero disminuyo a diferentes velocidades. El aumento de la densidad seca de la muestra produjo una menor tasa de reducción del contenido volumétrico de agua.

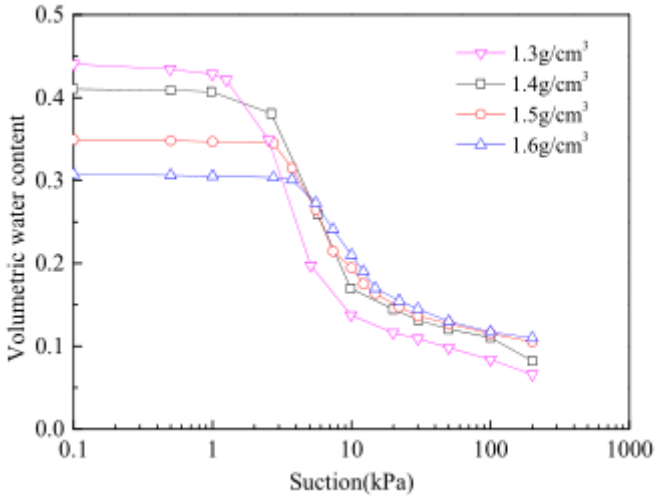

Figura 30. Influencia de la densidad seca de la muestra en la SWRC durante el secado(Yulong chen 2018)

Los suelos están sujetos a secado y humectación. En la etapa de secado, cuando el aire desplaza el agua en los poros o cuando la presión del agua de los poros disminuye, aumentará la resistencia del suelo a medida que aumenta la succión matricial. Cuando el suelo está en una etapa de humectación, a medida que el agua se infiltra en la estructura del suelo y desplaza el aire de los poros, la presión del agua de los poros aumentará gradualmente. Esto disminuye la succión matricial del suelo y separa las partículas del suelo. Al aumentar la densidad seca de la muestra de suelo, se reduce el tamaño y el número de poros en la matriz del suelo. Por tanto, el radio de curvatura del menisco se reduce y la succión correlativa es mayor. Como resultado, aumenta la succión matricial (AEV) requerida para que el aire entre en la matriz del suelo. Los suelos con poros pequeños se drenan lentamente. Por lo tanto, el contenido de agua en el suelo con poros pequeños es mayor que en el suelo con poros grandes en la succión matricial que excede el valor de entrada de aire. Para el mismo contenido volumétrico de agua, el suelo con mayor densidad seca tiene un mayor valor de succión matricial. Esto se debe a que el aumento de la densidad seca de una muestra de suelo da como resultado una disminución de la permeabilidad del suelo que conduce a un proceso de desaturación más lento y también a un aumento del AEV y la succión residual. La reducción de la histéresis con el aumento de la densidad seca puede resultar de la reducción del volumen de poros y un mayor potencial capilar causado por la mayor densidad seca del suelo.

Bajo el mismo contexto el valor de entrada de aire (AEV) parámetro fundamental para dar forma a la SWRC también varia al cambiar la densidad seca inicial, este varia de manera lineal a medida que la densidad de la muestra seca aumenta, esto se traduce en que el aire tiene que hacer una mayor presión para poder entrar a los vacíos que se ven disminuidos a medida que se densifica la muestra. También al comparar una muestra de baja densidad con una de alta densidad, demuestra que la muestra con mayor densidad pierde agua de manera más rápida. Esto queda demostrado en la Figura 30, a mayor es la densidad seca inicial, menor será la pendiente de la SWRC. Por lo tanto, el contenido de agua del suelo de alta densidad es mayor que el suelo de baja densidad en una succión matricial más allá de los valores de entrada del aire.

4 RELAVES MINEROS

La extracción de minerales como el cobre es un proceso muy común en Chile, todo parte con la exploración en búsqueda de yacimientos y su viabilidad de explotación, luego de eso comienza la extracción del mineral donde se fractura el macizo rocoso mediante explosivos para extraer los minerales que contiene. Posteriormente los fragmentos del macizo rocoso se chancan obteniendo disminuir el tamaño de las rocas, con lo que se pude diferenciar los minerales entre sulfuros y óxidos debido a que el tratamiento cambia dependiendo el tipo de mineral. En el caso de los sulfuros se necesita reducir aún más el tamaño de la roca, por lo que pasan por la molienda para que sea más fácil separar minerales de otras sustancias; Luego para obtener mayor pureza del mineral pasamos al proceso de flotación, sumergiendo el mineral en enormes piscinas que gracias a la acción de reactivos se logra extraer el mineral. A diferencia de los sulfuros, después del chancado el mineral oxidado pasa directamente a el riego con agua y ácido sulfúrico, conocido como lixiviación, en este proceso se recuperan los metales presentes en la roca mineralizada y se descarta el ripio. Todo el material que se descarta de las operaciones mineras anteriormente nombradas es considerado como relave.

El relave es un conjunto de desechos de procesos mineros de la concentración de minerales, usualmente constituido por una mezcla de rocas molidas, agua y minerales de ganga. La minería de sulfuros de cobre extrae grandes cantidades de material (roca) del yacimiento que se explota. Sólo una pequeña fracción corresponde al elemento de interés económico que se desea recuperar (algo menos de 1%). El resto es relave y se debe depositar de forma segura y ambientalmente responsable.

Los relaves contienen elementos extraídos del medio ambiente que son transportados y almacenados en tranques o depósitos de relaves, donde los elementos van decantando lentamente en el fondo y el agua es recuperada mayoritariamente, y otra parte se evapora. El material queda dispuesto como un depósito estratificado de materiales sólidos finos. El manejo de relaves es una operación clave en la recuperación de agua para evitar filtraciones hacia el suelo y napas subterráneas, ya que su almacenamiento es la única opción. Los elementos químicos predominantes en los suelos de relaves son silicatos, como el 90% de todos los suelos de la tierra, y son intrínsecamente inertes e inocuos. Los elementos en solución, como metales, reactivos y aditivos orgánicos, constituyen una fracción mínima de los relaves de cobre y no son productos tóxicos.

Por lo tanto, en la siguiente sección abordaremos los depósitos de relaves.

4.1 Depósitos de relaves

Los depósitos de relaves se forman para acopiar los residuos mineros finos dentro de un sitio seleccionado y para mantenerlos estables y sin causar efectos negativos al ambiente.

El diseño, la construcción, la operación y el cierre de un depósito se ejecutan para asegurar su estabilidad en todos los aspectos estructurales, hidráulicos, químicos y ambientales, durante toda su existencia, y en todos los escenarios previsibles de cargas y solicitaciones.

Actualmente, existen varios tipos de depósitos de relaves, que varían según la cantidad de agua que acompaña al relave (es decir, la densidad del relave), y según la forma de contener el depósito de relaves. También es adecuado constatar que el decreto supremo 248 “Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de depósitos de relaves” del 2007 es la normativa vigente que regulariza esta materia. Dependiendo de factores como las cercanías al concentrador, capacidad de almacenamiento de relaves, topografía del lugar, producción del yacimiento se deberá seleccionar la forma más apropiada para disponer los relaves.

La opción más utilizada en Chile es los tranques de relaves (Figura 31), es una estructura que dispone muros de contención perimetrales construidos compactando la fracción gruesa del relave proveniente de un hidrociclón (operación que utiliza impulsión de agua para separar solidos gruesos de finos) y se deposita en la cubeta (interior del muro) la fracción más fina del relave, denominada Lama, la cual

tiene un contenido de solidos entre el 40-50% y al ser depositada sobre el talud interno del muro ayuda a su impermeabilización.

Figura 31. Tranque de relaves minera Spence Growth Option (CONPAX)

Otra forma común de acopiar relaves, es mediante a un embalse (Figura 32). El embalse de relaves es aquel deposito donde el muro de contención está construido con material de empréstito (rocas y tierra del lugar) e impermeabilizado en su talud interno y coronamiento, también entran en esta categoría los depósitos ubicado en alguna depresión del terreno que no necesite construcción de muro.

Figura 32. Embalse de relaves "La Brea" Caserones (SERNAGEOMIN)

Una categoría especial corresponde a los relaves espesados (Figura 33), donde debido a su alta densidad cercana al 65-75% de contenido de sólidos, puede ser depositado de forma cónica sin necesidad de muros de contención teniendo en cuenta que el drenaje no fluya a otras áreas del emplazamiento.

Figura 33. Relaves de alto espesamiento (Minería chilena w3.mch.cl)

Otra categoría especial son los relaves filtrados (Figura 34), cuyo alto contenido de solidos cercano al 80% permite que se puedan transportar como movimiento de tierras, por lo que es posible apilarla sin complicaciones.

Figura 34. Relaves filtrados en Cerro Lindo, Ica, Perú (NEXA)

También existen más tipos de depósitos para condiciones más específicas como lo son los depósitos: en minas subterráneas en explotación y abandonadas, minas explotadas a rajo abierto, costeros, submarinos y por último de relaves radiactivos.

Figura 35. Embancamiento de relaves en la bahía Chañaral (Google Maps)

Cabe destacar de la Figura 35, que el origen de este desastre ambiental se remonta a 1938, cuando los embalses terrestres que almacenaban los relaves de Potrerillos se colmaron, por lo que se procedió brutalmente a vaciar ese caudal al mar mediante el cauce del rio Salado, así en 52 años fueron arrojados al mar más de 320 millones de toneladas de solidos residuales y unos 850 millones de toneladas de aguas servidas del proceso industrial del cobre. La situación en la Bahía de Chañaral ha sido citada en foros internacionales como "el más brutal ejemplo de lo que nunca debiese hacerse". Lo que existe hoy es una desolada playa artificial, con arenas blancas que no son otra cosa que residuo mineral y químico, que tienen sin vida de ningún tipo una extensión de 6 kilómetros en la costa.

4.2 Tranques de relaves

Los tranques de relaves o presas de relaves son terraplenes de tierra que se utilizan para almacenar materiales de desecho, los anteriormente definidos relaves, de las operaciones mineras (Figura 36). Pueden tener más de 100 metros de altura y en algunos casos, varios kilómetros de largo (Kossoff et al., 2014). Los tranques de relaves se construyen con la fracción gruesa de los relaves y a lo largo de su vida útil, se van redimensionando a medida que aumenta la cantidad de relave almacenado.

En esta obra de ingeniería se pueden distinguir los siguiente elementos que la componen:

a. Muro: Estructura ingenieril que contiene los relaves que en ella se depositan, se localiza de tal manera que delimita la cubeta
b. Cubeta: corresponde al volumen físico que se dispone para la descarga de relaves finos (lamas), junto con gran parte del volumen liquido de los relaves. En su superficie se localiza la laguna de aguas claras
c. Lagunas de aguas claras: Corresponde a la laguna clarificada que se forma en la cubeta debido a la sedimentación o decantación de las partículas sólidas en las capas inferiores de la cubeta.
d. Playa activa: Zona donde se descargan los relaves hacia la cubeta, forma parte de las lamas, pero usualmente se encuentra seca en la superficie y se ubica en las cercanías de la línea de vaciado
e. Coronamiento: Parte superior del muro de contención, muy cercano a la horizontal.

f. Revancha: es la diferencia menor en cota, entre la línea de coronamiento del muro y la superficie inmediatamente próxima de las lamas o la superficie del agua, que se produce en tranques y embalses de relaves.
g. Canal de contorno: Canal de desvió de las aguas de la cuenca que captan y desvían las escorrentías superficiales, impidiendo el escurrimiento de estas hacia la cubeta del depósito de relaves.
h. Sistema de drenaje: Sistema utilizado para retirar la cantidad adecuada de agua del interior del muro con el objetivo de deprimir al máximo el nivel freático en el interior del cuerpo del muro.

Figura 36. Componentes de un tranque de relaves (SERNAGEOMIN)

Los tranques de relaves son una infraestructura de larga duración que a menudo requiere que estén instaladas a perpetuidad, por lo tanto, debido a su extensa vida útil, la tasa de falla en estas estructuras es relativamente alta, debido a regulaciones de diseño inadecuadas, supervisión menos rigurosa que para represas de agua normales y los métodos de construcción actualmente utilizados.

Se construyen de relaves, en lugar del hormigón, por ejemplo, utilizado en represas de retención de agua. Los relaves normalmente se bombean desde el molino al tranque en forma de lechada. En el tranque, los métodos de dispersión comunes incluyen el ciclado o la dispersión mediante espigas para lograr la diferenciación de tamaño del material. La dispersión diferenciada por tamaño no solo ayuda a preservar la integridad de la presa al colocar el material más grueso y poroso en la estructura misma, sino que también da como resultado que la fracción más fina forme una barrera impermeable, que a su vez reduce el piping o filtraciones a través la estructura. El piping a través de un depósito de relaves es un proceso de erosión que da como resultado que se establezca un canal o tubería de líquido patente a través de la estructura. Por lo tanto, el piping puede describirse como un proceso de filtración a gran escala. Una causa común del piping es la deposición de capas delgadas de relaves finos entre capas más gruesas de relaves gruesos a medida que se levanta el muro

Después de que se ha construido el dique principal, los terraplenes pueden extenderse rio arriba (upstream), verticalmente (centreline) o rio abajo (downstream) como muestra la Figura 37. El levantamiento vertical o línea central se logra apilando material directamente sobre el terraplén existente, mientras que la construcción rio abajo se logra colocando nuevo material por el talud exterior del dique. La elevación rio arriba es la más barata y comúnmente utilizada ya que una menor cantidad de material se requiere para la construcción, debido a esto también es la estructura más susceptible a fallas, por lo que en la actualidad en Chile este método de construcción no es aprobado por la legislación vigente(SERNAGEOMIN, 2018). Por otro lado, el método más seguro frente a movimientos externos como son los sismos, es el método aguas abajo debido al drenaje natural y a la

compactación, la construcción con las arenas cicloneadas se va apoyando sobre arenas depositadas previamente que tienen menor contenido de agua, lo que entrega mayor resistencia al muro.

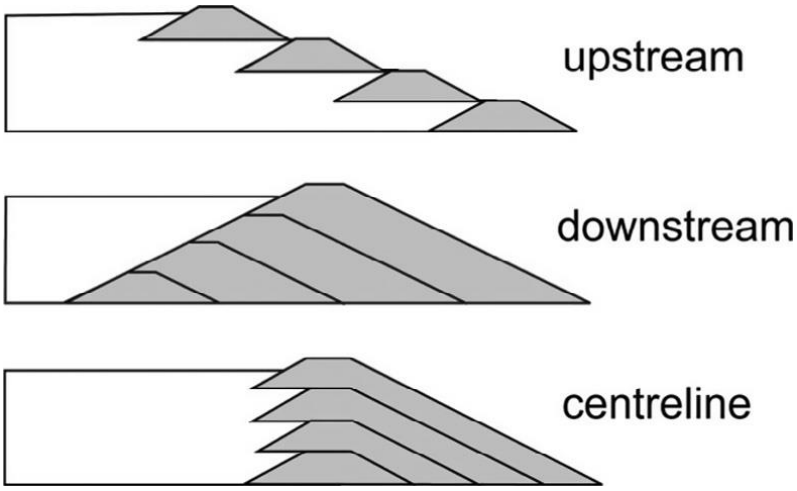

Figura 37. Esquemas ilustrativos de tranques construidos aguas arribas, aguas abajo y verticalmente (Modificado de Vick 1983)

Para preservar la integridad estructural de sucesivos aumentos en el muro de contención, idealmente se debiese utilizar una capa competente del tamaño de arena en lugar de una capa de arcilla suelta y potencialmente incompetente. Con ese fin, la tasa de elevación de la estructura de la presa normalmente se restringe para garantizar que cada nueva capa esté bien compactada. También es una buena práctica asegurarse de que la base esté bien drenada, lo que sirve para mantener una superficie freática baja (Figura 38). Con ese fin, es apropiado permitir un buen drenaje de la presa proporcionando una amplia playa activa, que diferencia el material de relaves por tamaño, asegurando que el tamaño de partícula de arena que forma el muro sea mayor (más permeable), mientras que las partículas de tamaño de arcilla o más finas (menos permeables) están más dispersas. La integridad del revestimiento, que generalmente está hecho de arcilla, es un factor clave en el desempeño a largo plazo de una presa de relaves (Bamberg & Van Zyl, 1986). Si se predice que los relaves generarán drenaje ácido de mina (AMD), los revestimientos a menudo se prueban con fluido AMD modelado o real antes de la instalación final.

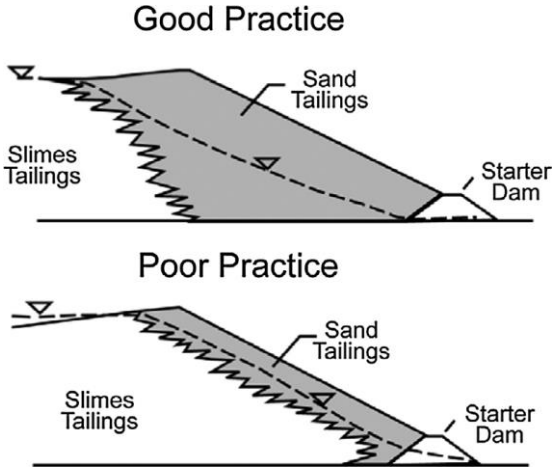

Figura 38. Buena y mala práctica en construcción aguas arriba. La napa freática debe cruzar por debajo de la presa para reducir la susceptibilidad a licuefacción (Kossoff et. al., 2014)

4.3 Depósitos de relaves en Chile

En la actualidad más de 757 depósitos de relaves se encuentran en Chile la gran mayoría se encuentran en la IV región del país, seguido de la III y V región respectivamente (Figura 39). Corresponde destacar la cantidad de relaves inactivos y abandonados que se despliegan por el territorio nacional, la suma de ambos asciende a 640 en comparación a los 112 depósitos de relaves que se encuentran inactivos al momento (Figura 40) .

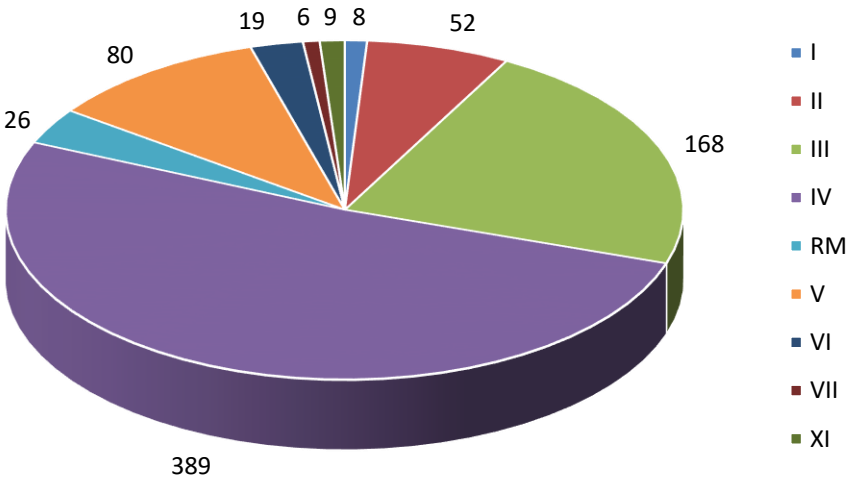

Figura 39. Cantidad de depósitos de relaves por región (modificado de "análisis de catastro de depósito de relaves en chile y guía de estructura de datos" 2020)

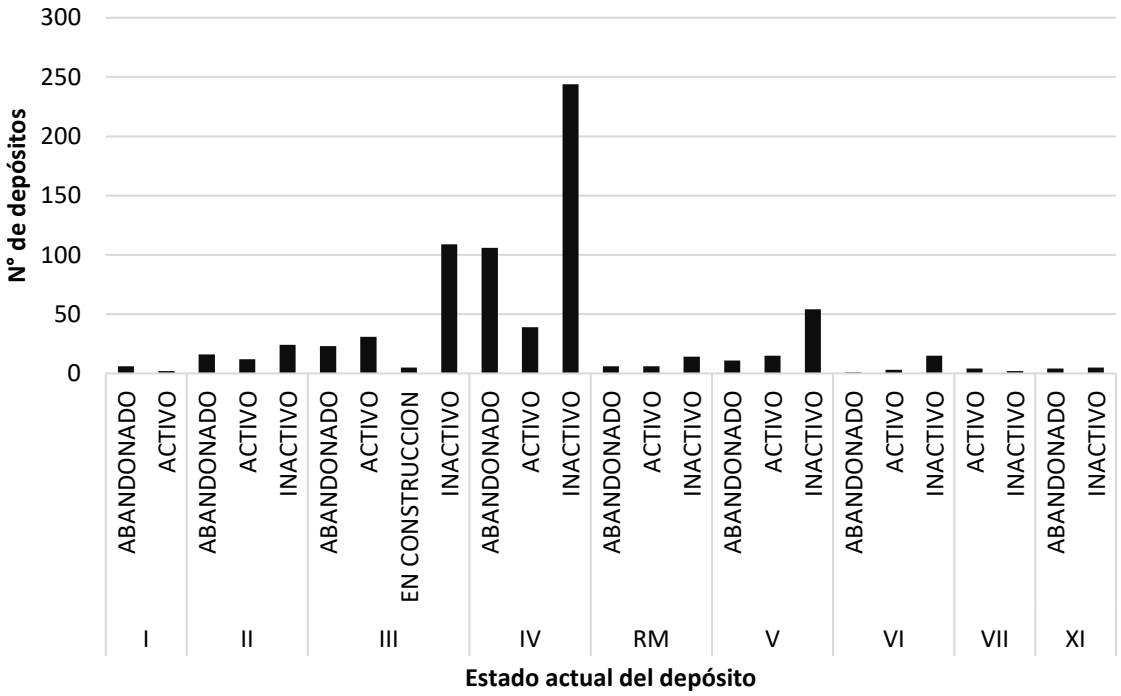

Figura 40. Estado de los depósitos por región (modificado de "análisis de catastro de depósito de relaves en chile y guía de estructura de datos" 2020)

Con respecto al tipo de depósito se nota la amplia tendencia de los tranques de relaves y embalses (Figura 41), lo que desde el punto de vista medio ambiental es una terrible noticia, ya que el futuro del almacenamiento de relaves debe tener una proyección a espesar su composición, esto quiere decir que el contenido de solido en comparación a la humedad debiese ser ampliamente superior, lo que solucionaría problemas como el drenaje ácido el cual abordaremos más adelante.

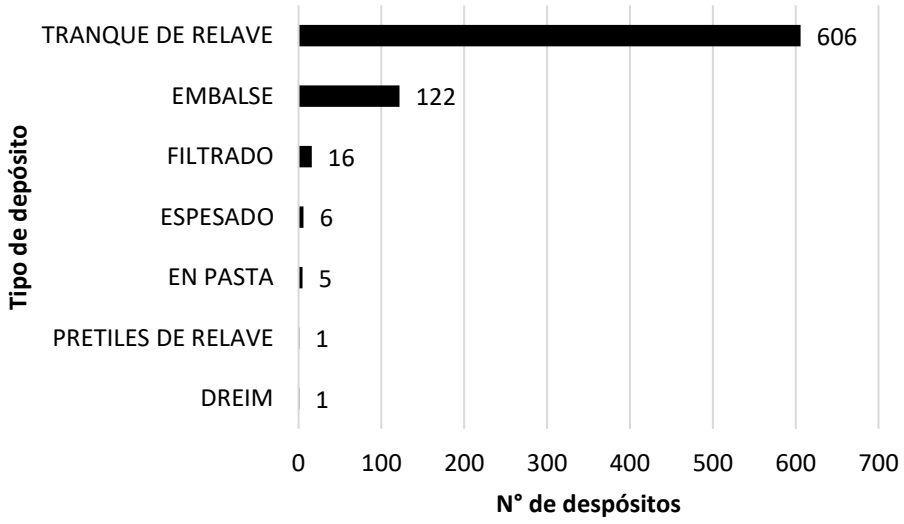

Figura 41. Tipos de depósitos de relaves (modificado de "análisis de catastro de depósito de relaves en chile y guía de estructura de datos" 2020)

También el Sernageomin entrega la cantidad de tipos de tranque de relaves existentes donde el método de construcción aguas arriba arrasa en número a los otros métodos constructivos (Figura 42), esto desde el punto de vista de estabilidad sísmica es un peligro latente para todos ya que es el método con menor resistencia a solicitaciones externas.

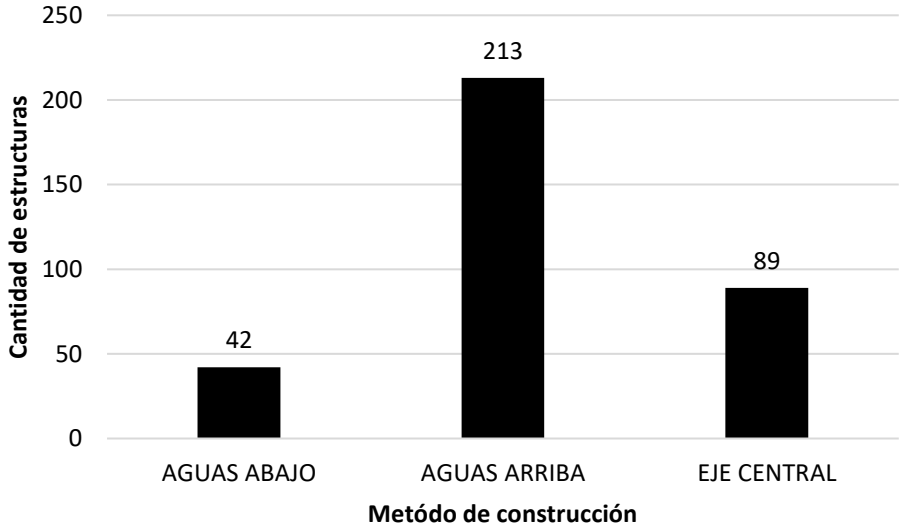

Figura 42. Métodos de construcción de tranques de relaves (modificado de "análisis de catastro de depósito de relaves en chile y guía de estructura de datos" 2020)

4.4 Comportamiento parcialmente saturado de los relaves

Los relaves mineros se almacenan con una cantidad inicial de humedad que depende principalmente de la tecnología de procesamiento utilizada, es decir, lechada convencional, pasta o relaves filtrados. La mayor parte de los depósitos de relaves existentes en la actualidad se han construido mediante el sistema de relleno hidráulico. Los residuos del proceso de extracción, en esencia roca finamente molida mezclada con agua, con la consistencia de un lodo, son bombeados a través de tuberías hacia el depósito. Típicamente, la proporción de agua en relación a los sólidos es mayor de 3:1 en volumen. El método de deposición, las técnicas de construcción del depósito y el clima son factores determinantes para la evolución de la humedad del relave en el tiempo y su distribución dentro del depósito. Dado que los relaves son materiales de grano muy fino, los fenómenos insaturados juegan un papel importante en el comportamiento hidráulico y mecánico del depósito.

Los fenómenos capilares, asociados a una condición de saturación parcial, tienen una particular relevancia en este tipo de depósitos. Esto se debe a la muy fina granulometría de los residuos almacenados, que determina que los poros del material sean lo suficientemente pequeños como para que los fenómenos derivados de la tensión superficial sean significativos.

4.4.1 Influencia del agua capilar

Parte del volumen de un depósito de relaves (todo lo que está por encima de la superficie freática) se encuentra en una condición permanente de saturación parcial, esto quiere decir que los poros del materia están llenos de aire y agua al mismo tiempo. Teóricamente se asume que un material granular está compuesto por partículas idealmente esféricas de tamaño uniforme, en los puntos de contacto entre partículas se forman meniscos de agua. En estos meniscos la presión del agua es menor que la del aire (presión atmosférica) por lo tanto, los meniscos generan una fuerza adicional entre contactos de partículas la “fuerza capilar”. Se ve que, para el rango de tamaños común en los relaves, la magnitud de la fuerza capilar en relación al peso de la partícula es muy importante, para tamos de arena no es tan notorio y para gravas es casi despreciable.

Los efectos de las fuerzas capilares sobre el comportamiento de los relaves se manifiestan de distintas maneras. Cuando el material se encuentra parcialmente saturado adquiere cohesión y resistencia a la tracción, sin embargo, cuando se satura de agua el material pierde por completo estas resistencias. Las tensiones generadas por fuerzas capilares durante el secado del relave pueden hacer que el volumen decrezca, este fenómeno es conocido como retracción. La retracción puede ser muy importante ya que genera grietas en el material, que se inician en la superficie y se propagan en profundidad a medida que el secado progresa en el material. Si el vertido de material se realiza de forma intermitente, con tiempo suficiente entre vertidos sucesivos en un mismo punto como para que la capa superficial se agriete, entonces el material resultante es fuertemente heterogéneo y las propiedades físico-mecánicas del material considerado a una macro escala pueden diferir fuertemente de las propiedades que se miden sobre probetas homogéneas. Este tipo de agrietamiento puede hacer que la permeabilidad vertical del material sea varios órdenes de magnitud mayor que la del material homogéneo.

La proporción de solidos: agua del material que se vierte en un tranque de relaves tradicional suele ser cercano a 1:1 en peso. Puesto que el peso específico de las partículas sólidas que forman los relaves es relativamente alto, el agua puede llegar a representar entre el 65 al 80% del caudal de lodo vertido. A partir del vertido el material fluye a lo largo de la playa, sedimentando las fracciones gruesas del relave cerca del punto de vertido y clasificándose casi espontáneamente por tamaño a medida que recorre distancia. La fracción más fina va a parar a la laguna de aguas claras donde sedimenta bajo agua. Como varia la humedad dentro de los relaves luego del vertido depende en gran medida de su granulometría y por lo tanto por la posición dentro del depósito.

Otro fenómeno que ocurre en las colas no saturadas es el del ascenso capilar. El "valor de entrada de aire" tiene una estrecha vinculación con la altura de ascenso capilar que ocurre en el depósito en el que la superficie freática se encuentra a una cierta distancia bajo la superficie de los relaves. El agua puede ascender por capilaridad, siempre y cuando exista continuidad de la fase líquida desde el punto considerado hasta el agua freática. Cómo el valor de entrada de aire coincide con la desaturación de los poros, esta succión marca la pérdida de continuidad de la fase líquida y por lo tanto la interrupción del ascenso capilar.

Para la capa superficial, la succión depende de la humedad relativa impuesta por las condiciones atmosféricas en la superficie. Si el clima determina condiciones favorables para el secado, el agua se evaporará de los poros haciendo que la succión aumente en la superficie, estableciéndose un flujo capilar desde le nivel freático hace la capa superficial. Al contrario, si el clima determina condiciones como lluvia o inundación, la succión se hace nula y la capa superficial absorbe agua, lo que establece un frente de mojado que avanza hacia las profundidades.

El agua almacenada en la zona no saturada (agua capilar) de un tranque de relaves, puede ser uno de los factores determinantes en la respuesta hidráulica del depósito ante aportes de agua exteriores, como lluvias, deshielo o crecidas y en definitiva el factor determinantes para su estabilidad. Es interesante ver cómo se comporta el depósito en casos de lluvia, se muestra un rápido ascenso en el nivel de la superficie freática durante la tormenta. Esto se debe a que el agua infiltrada satura rápidamente los poros parcialmente llenos con agua capilar. La aproximación del agua freática al talud exterior de la presa tiene un fuerte efecto desestabilizante, por una parte, por efecto de las fuerzas de filtración que genera el flujo de agua, pero a su vez también por la pérdida de la cohesión aparente, que depende del agua capilar al ocurrir saturación.

También hay que tomar en cuenta el comportamiento del depósito una vez que se detuvo el aporte externo de agua, ya que el proceso de descenso de la superficie freática se desarrolla en un periodo mucho más largo que el de ascenso, esto se debe al efecto "ink bottle" debido a la falta de uniformidad en el tamaño de los poros y la distribución de la forma. Terminada la tormenta, la superficie freática aún se encuentra en una posición significativamente más elevada que la inicial, esta característica lleva a pensar en los efectos acumulativos que tendrían eventos repetidos de lluvia en un tiempo corto. Es más, aproximadamente un tercio de los casos de fallas de depósitos de relaves, por sobrepaso o deslizamiento, fueron precedidos por periodos más o menos prolongados de lluvias repetidas (L. Oldecop et al., 2008).

En esta zona no saturada se producen fenómenos como la evaporación, infiltración, retracción, agrietamiento, ascenso capilar, etc. Los relaves comunes están compuestos de granulometría fina lo que les da una capacidad enorme de producir ascenso capilar, esto conduce a que el material por sobre la superficie freática mantenga un grado de saturación cercano al 100% a este sector del relave, esto puede constituir un factor peligroso (inminente de falla), ya que al menor aporte de agua puede producir un ascenso rápido del nivel freático. Adicionalmente la presencia de esta agua capilar no es detectada por piezómetros y no puede ser drenada gravitacionalmente.

4.4.2 Efectos razón sólido/agua

Un relave con bajo contenido de agua en su composición se comportará como un lodo espeso y eventualmente, como suelo húmedo viscoso como es el caso de los relaves espesados y filtrados, al contrario, a medida que aumenta el contenido de agua en relación al contenido de sólido, el relave se comporta como una suspensión acuosa, como la que se obtiene del proceso de flotación en la minería tradicional.

Mediante experimentos (Ramírez Morandé, 2007) logro concluir la variación de la pendiente limite dependiendo de la concentración de solidos en una pulpa de relaves. Si la razón S:A es menor que 50%,

la pulpa de relaves se comporta como suspensión acuosa y escurrirá con pendientes incluso menores al 2%, esto se traduce en segregación del tamaño de partículas desde el punto de vertido. Si la razón S:A es mayor al 55% la pulpa empieza a comportarse como un lodo viscoso y disminuye la segregación de las partículas, necesitando una pendiente mayor al 2% para escurrir.

Todo esto queda plasmado en la tabla a continuación presentada, donde es posible diferenciar que a medida que aumenta el porcentaje de solidos en la pulpa de relave aumenta la pendiente límite, y para valores de pendiente mayores a la pendiente limite existirá escurrimiento de la pulpa de relaves.

Tabla 2. Variación de la pendiente límite con la concentración de sólidos en una pulpa de relaves (Modificado Ramírez 2007).

Pendiente límite	**Porcentaje de sólido**
[%]	**en peso [%]**
< 2	< 50
2-3	55-66
3-5	60-63
4-6	63-65
> 6	> 65

4.4.3 Permeabilidad e Infiltración

La permeabilidad se define como la capacidad de un material de permitir que un fluido pase a través de él, sin alterar su estructura interna. En el caso de los suelos, el agua fluye a través de los espacios vacíos en el esqueleto del suelo, que deben estar interconectados entre sí. Esto ha sido verificado incluso en los suelos menos permeables, como las arcillas, donde se ha observado que la gran mayoría de los poros están interconectados. Al movimiento del agua a través del material se le denomina "infiltración" y a su medida "permeabilidad". El flujo de agua a través de un suelo se debe principalmente debido a la diferencia de presiones entre dos puntos, sin embargo, también puede verse afectado por flujos capilares producto de la succión del suelo.

Darcy determinó a través de ensayos experimentales que la relación entre la velocidad de flujo v y el gradiente hidráulico i, para casos donde el suelo se encuentra saturado, viene dada por:

$$v = k * i \tag{38}$$

Donde: $v =$ velocidad de descarga [cm/s],

$k =$ Conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad [cm/s], y

$i =$ Gradiente hidráulico [cm/cm].

Determinando el coeficiente de permeabilidad se puede determinar el volumen de las filtraciones, el que depende del tamaño y granulometría de las partículas gruesas, de la cantidad de finos y de la densidad de la muestra. El coeficiente de permeabilidad varía en un amplio margen para los distintos suelos naturales, desde $10^2[cm/s]$ (permeable) hasta $10^{-9}[cm/s]$ (impermeable).

En los tranques de relaves la permeabilidad normalmente disminuye hacia el centro del estanque, dependiendo de los tamaños de partícula a lo largo de la playa y del volumen de poros (volumen de vacío). Sin embargo, cuando las capas de partículas con finos, la permeabilidad puede variar mucho.

La permeabilidad se ve afectada por diversos factores inherentes tanto del suelo como a características del fluido circulante (Silvia, 2006), entre ellos se pueden encontrar: La porosidad del suelo, la relación

de vacíos (grado de compactación), la estructura y estratificación del suelo, el tamaño de partículas, la temperatura, viscosidad además del grado de humedad (succión para ese grado de saturación).

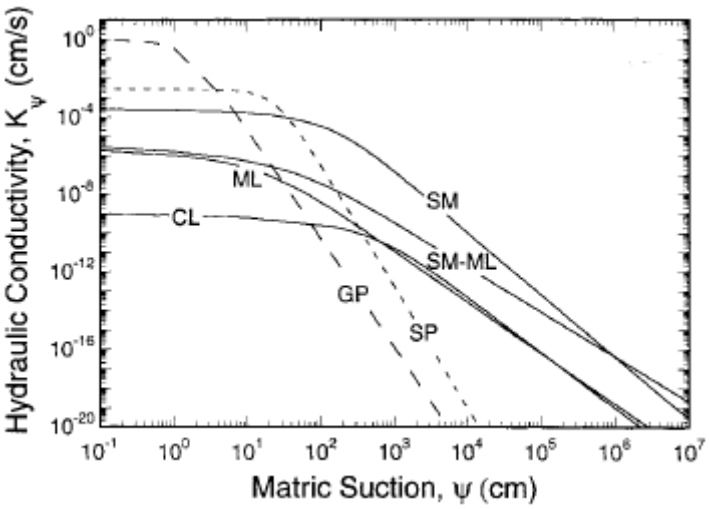

Figura 43. Conductividad hidráulica para suelos parcialmente saturados (Khire et al. 2000)

Como se muestra en la Figura 43 (Khire et al., 2000), los suelos de granos más finos como arenas limosas (SM), limos arenosos no plásticos (SM-ML), limos de baja plasticidad (ML) y arcillas inorgánicas de baja plasticidad (CL) son menos permeables cuando existen succiones bajas (< 10 [cm]) y más permeables cuando las succiones aumentan. A diferencia de lo que sucede con los suelos de granos más gruesos como las arenas mal graduadas o gravosas (SP) y las mezclas de gravas y arenas (GP), que a succiones altas (>1000 [cm]) son mucho menos permeables que a succiones bajas donde son muy permeables.

4.4.4 Estabilidad física y química de los tranques de relaves

4.4.4.1 Estabilidad Física

La estabilidad física de instalaciones mineras remanentes corresponderá a la respuesta esfuerzo de deformación a largo plazo de la estructura, frente a solicitaciones desestabilizadoras estáticas o dinámicas, que no requiere la implementación de obras, medidas ni actividades adicionales a las consideradas en los proyectos de explotación, de deposición de residuos masivos mineros y planes de cierre aprobados por el servicio, para el resguardo de la vida, salud y seguridad de las personas y del medio ambiente (SERNAGEOMIN, 2018). La exigencia de estabilidad física, consiste en conseguir que el depósito de relaves no se desmorone ni se desborde, es decir, que contenga los sólidos depositados sin sufrir fallas.

Un tranque de relaves define su estabilidad física mediante su funcionamiento hidráulico, esto quiere decir que tanto factores externos (clima, manejo de relaves) e internos (propiedades físicas) pueden influir directamente tanto a corto como largo plazo en el desempeño de la estructura frente a solicitaciones estáticas como dinámicas. El funcionamiento hidráulico se ve condicionado a lluvias, deshielos, altas temperaturas, radiación solar, etc. (Figura 44). Lo que provoca extracciones por bombeo de agua al tener excedentes en la cubeta y utilizar sistemas de drenajes para mantener la altura deseada del nivel freático, ya que este último es la clave en un buen manejo de los relaves y por consiguiente su estabilidad física. Por lo general se busca tener una napa freática baja en relación a la altura del muro y lo más alejado de los taludes, ya que puede generar un aumento significativo en la saturación del medio a través del ascenso capilar. Los fenómenos relacionados a propiedades físicas de los materiales que conforman los relaves son relevantes debido a que contribuyen a la resistencia como, por ejemplo, consolidación, asentamiento, infiltración, ascenso capilar, agrietamiento y cohesión, son parte de la granulometría fina utilizada.

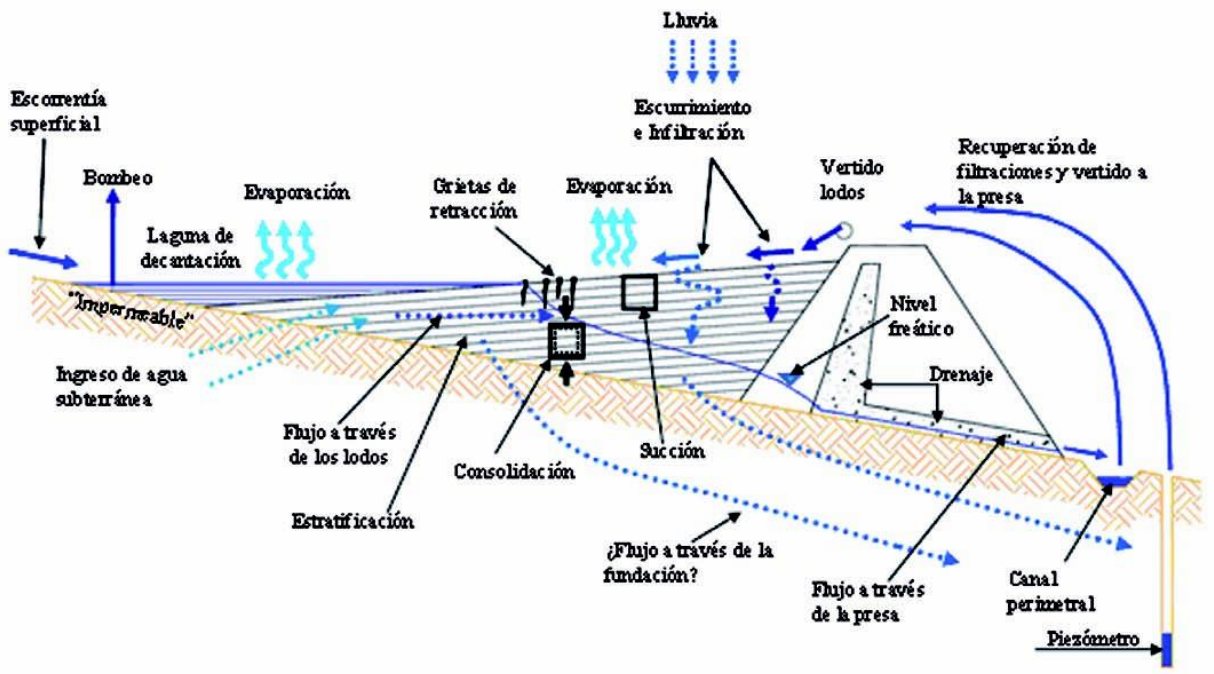

Figura 44. Modelo conceptual de una presa de residuos mineros indicando los factores que afectan su funcionamiento (Modificado de Zandarín et al., 2009)

La disminución de la resistencia producto del aumento de humedad es crítica cerca del 75-80% de contenido líquido, por lo que mantener el nivel freático controlado es primordial. Una mejora en la estabilidad de la presa se consigue alejando la laguna de decantación de los bordes y manteniendo ocupada una extensión razonablemente pequeña en el interior del tranque de relaves. Mientras más alejada esté la laguna de decantación del borde mayor será la estabilidad física del tranque de relaves, una herramienta para lograr esta finalidad es variar el punto de vertido de los relaves en el contorno del tranque para controlar la ubicación y tamaño de la laguna, mediante algún dispositivo de rebalse como chimenea de decantación o sistema de drenaje. Otro método es extraer bombeando agua desde una plataforma flotante localizada en la laguna de decantación, lo que puede ayudar en caso de aportes extraordinarios externos si se cuenta con una buena capacidad de bombeo.

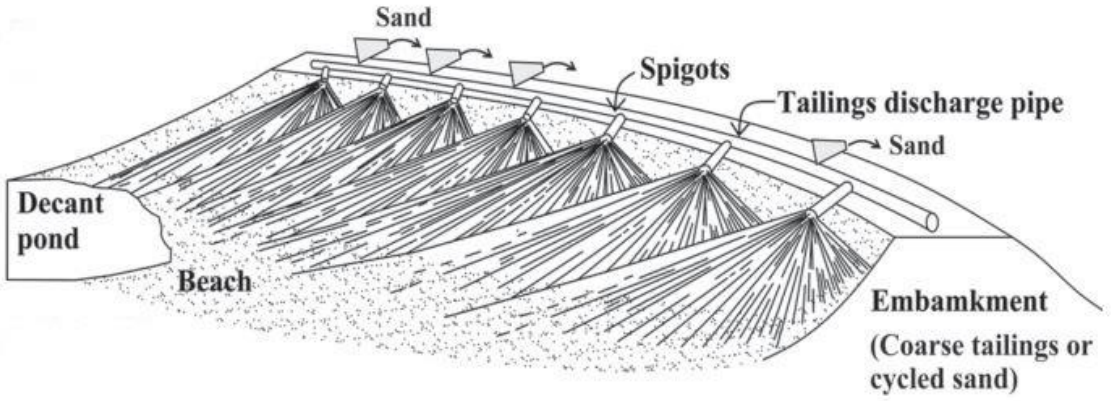

Figura 45. Vertido de lamas en cubeta y arena en talud desde la cresta del tranque (modificado Valenzuela 2016)

Casi siempre la falla de una presa de relave está relacionada a un mal funcionamiento hidráulico, ya sea por error de operación, por falta de atención adecuada o por haber adoptado hipótesis de diseño equivocadas. En todos los casos, el resultado de esos fallos es una rápida transferencia de la carga hidráulica a zonas inmediatamente vecinas a alguno de los taludes exteriores, con la consecuente pérdida de estabilidad, desarrollo de tubificación o directamente el sobrepaso.

Es importante considerar que el propio vertido de relaves constituye un ingreso continuo de agua, de volumen muy significativo, puesto que la proporción líquido:sólido de un relave típico suele ser mayor a 3:1 en volumen (L. Oldecop & Rodríguez, 2007). Los relaves vertidos segregan separándose parte del agua que escurre por la superficie hace la laguna y la otra fracción fluye más lentamente clasificándose por tamaño (de grueso a fino) en su recorrido hacia el centro de la laguna (Figura 45), esto hace que la permeabilidad sea mayor cerca del borde que del centro. Cuando se interrumpe el vertido o se mueve el punto de descarga, se induce el secado por evaporación desde la superficie, por consecuencia existe ascenso capilar. Esto da oportunidad a los relaves de secarse y eventualmente agrietarse y cuando se produce el nuevo vertido las grietas existentes son rellenadas con nuevos relaves, pero de todas maneras se generan discontinuidades y heterogeneidades que permanecen en la estructura del material generalmente estratificado, formando alternancia de finas capas con características muy diferentes. Por otra parte, el proceso de secado hace que entre capas de vertidos sucesivos se genere una superficie de discontinuidad que conduce finalmente a que presente una estratificación sub-horizontal (L. A. Oldecop et al., 2011). La morfología de esta estratificación es compleja, debido a los cambios de los puntos de vertido que generan variaciones en la inclinación, espesor y granulometría entre capas.

Bajo el peso de las capas superiores, los relaves siguen un proceso de consolidación primaria, durante el cual expulsan agua de sus poros. También, con el paso del tiempo, puede ocurrir consolidación secundaria (fluencia). El agua expulsada debe drenar o bien ser eliminada por evaporación. Los procesos de consolidación tienen como consecuencia cambios en la porosidad de los relaves, que a su vez implican cambios en la permeabilidad, la curva de retención y en las propiedades mecánicas. Los relaves parcialmente saturados tienen un comportamiento mecánico modificado por la succión, que se manifiesta como una disminución de la compresibilidad y un aumento de la resistencia al corte para grados de saturación decrecientes.

El “esfuerzo de fluencia” (“yield stress” o “tensión de rendimiento”), es un parámetro de diseño clave, porque entre otras cosas, tiene control en transporte y en la pendiente final en el depósito. El esfuerzo de fluencia se define como el esfuerzo mínimo requerido para hacer que el fluido fluya como un material viscoso con viscosidad finita. Cuando el esfuerzo aplicado al fluido es menor que el esfuerzo de fluencia, el fluido no fluye, sino que se deforma plásticamente como un sólido, con una recuperación de deformación definitiva al eliminar el esfuerzo aplicado.

(Landriault et al., 2005) presentan un gráfico esquemático típico del esfuerzo de fluencia en función de la concentración de sólidos de la mezcla sólido-líquido, en donde se observan distintos estados de consistencia posibles: pulpa, pulpa de alta densidad, pasta y torta (Figura 46). También indica equipamientos utilizados en bombeo y filtración de esas mezclas de sólido-líquido, los regímenes y velocidades de flujo posibles y las características de segregación de las partículas sólidas.

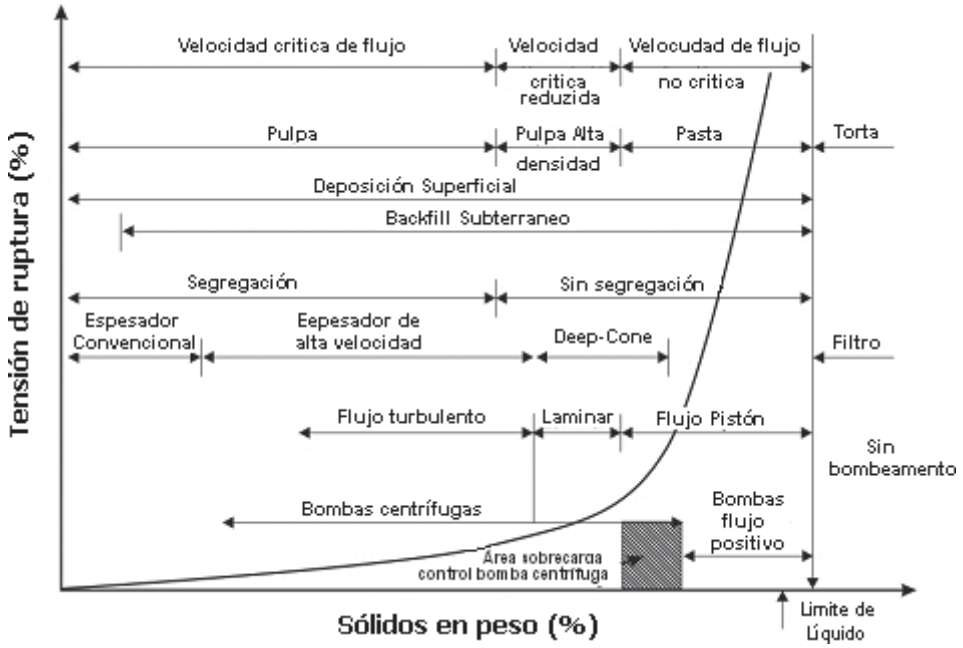

Figura 46. Mezclas sólido/líquido: pulpa, pulpa de alta densidad, pasta y torta, con respectivos equipamientos de obtención y transporte asociado al esfuerzo de fluencia. (Modificado Landriault, 2002)

La tensión de fluencia a través del comportamiento esfuerzo-deformación, permite estimar el comportamiento que tendrá el relave según su contenido de sólidos. Donde es posible encontrar distintas clasificaciones como el tipo de relave y su grado de espesamiento, o si el relave es segregable o no. En caso de depósitos de relaves no segregables, el vertido de relave está restringido hasta que la desaturación de cada capa alcance el límite de contracción, es decir luego de la entrada de aire al suelo, solidificando el relave y reduciendo así la infiltración a suelos basales.

Además, se debe tener presente que materiales finos, como los relaves mineros, tienen una gran capacidad de retener agua en condición no saturada. Por ello, aun cuando se prevean sistemas de drenaje inferior, la cantidad de agua almacenada puede permanecer elevada por largo tiempo, pues los relaves no drenan.

4.4.4.2 Estabilidad Química

La ley 20.551 establece entre sus principales exigencias el alcanzar la estabilidad física y química de los sitios en los que se desarrolla la actividad minera de manera de “otorgar el debido resguardo a la vida, salud, seguridad de las personas y medio ambiente”.

La estabilidad química es la situación de control en agua, aire y suelo de las características químicas que presentan los materiales contenidos en las obras o depósitos de una faena minera, cuyo fin es evitar, prevenir o eliminar, si fuere necesario, la reacción química que causa acidez, evitando el contacto del agua u oxigeno con los residuos generadores de ácidos que se encuentren en obras y depósitos masivos mineros, tales como depósitos de relaves, botaderos, depósitos de estériles y ripios de lixiviación (Art.N° 3; Ley 20.551)

La gestión para lograr estabilidad química se debe desarrollar a lo largo de toda la vida útil de las instalaciones que componen una faena minera, con el fin de llegar a la condición de estabilidad en el momento del cierre, donde la labor principal está centrada en limitar la generación de drenaje ácido minero (AMD) en donde el agua que tenga contacto con el material de desecho podría eventualmente acidificarse y causar daños ambientales diversos afectando la calidad del aire, suelo y agua.

Se define drenaje minero al efluente generado producto de la interacción entre fuentes potencialmente generadoras y los factores ambientales, dentro de las fuentes potencialmente generadoras están todas las instalaciones mineras constituidas por materiales que tras un proceso químico quedan expuestos a factores ambientales y tienen capacidad de reacción. En la Tabla 3 a continuación se presentan todas las instalaciones mineras que constituyen fuentes generadoras de drenaje minero.

Tabla 3. Fuentes potencialmente generadoras de ADM durante la operación y al cierre de una faena minera (modificado guía metodológica para la estabilidad química de faenas e instalaciones mineras 2015)

Residuos Mineros Masivos		
Botaderos	Depósitos de Relaves	Depósitos de Lixiviación
Estériles	Embalses de relaves	Ripios de lixiviación
Baja ley	Tranques de relaves	Pilas permanentes
Marinas	Relaves filtrados	Pilas Dinámicas
Desmontes	Relaves en pasta	Pilas ROM
Escorias	Relaves espesados	

El drenaje minero se puede clasificar en base a la acidez o alcalinidad (a través del pH) y mediante la carga de los elementos que componen el residuo (aniones o cationes), por lo que se distingue entre drenaje minero ácido, neutro, alcalino y salino. Todos estos tipos de drenajes pueden ser producidos por la oxidación de minerales sulfurados. El caso del drenaje minero ácido se da con rangos de pH menor a 6, el drenaje minero neutro y alcalino se da con rango de pH mayor a 6, donde el drenaje neutro tiene una elevada concentración de metales en solución en pH cercano a 7. El drenaje minero salino en cambio contiene elevados niveles de sulfatos sin una carga significativa de metales en solución, cercanos al pH neutro. Es importante advertir que una vez iniciado el drenaje minero es casi imposible detenerlo, ya que continuara hasta que uno o más de sus reactantes sean agotados o no estén disponibles para reaccionar. El proceso puede continuar por décadas incluso siglos, después de que la actividad minera haya cesado (INAP-GARD, 2014).

Los residuos mineros contienen cantidades variables de sulfuros, de todos ellos el que genera mayor cantidad de acides y la más abundante es la pirita (F_eS_2) encontrándose en formaciones hidrotermales, rocas ígneas y depósitos sedimentarios. Al momento de oxidarse los sulfuros se genera acidez. La oxidación de la pirita se divide en tres etapas en función del pH, el tiempo de cada etapa puede durar desde varios días a cientos de años, dependiendo de los factores involucrados (Figura 47).

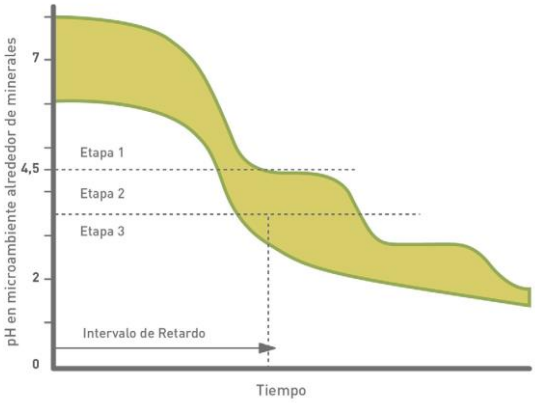

Figura 47. Etapas de oxidación de la pirita(F_eS_2) (Modificado Broughton y Robertson 1992)

La etapa 1 comprende la oxidación química, biótica o abióticamente, con el oxígeno como oxidante principal, se produce la liberación de protones H^+, hierro ferroso Fe^{2+} y sulfatos SO_4^{2-} al medio. El O_2 disuelto en el agua actúa de menor manera ya que su solubilidad en el agua es limitada, siendo el O_2 atmosférico el principal responsable de la oxidación. La velocidad de reacción es lenta y está controlada por el O_2 .En la etapa 2 el hierro ferroso Fe^{2+} se oxida a hierro férrico Fe^{3+} generando protones H^+lo que disminuye el pH y posteriormente precipita en forma de hidróxidos (ej. ferrihidrita $(Fe^{3+})_{4-5}(OH,O)_{12}$) y en forma de oxihidróxicos (Goetita $FeO(OH)$), de color anaranjado-rojizo, ubicado a menudo en faenas que se genera drenaje ácido.

Figura 48. Drenaje minero ácido (Guía metodológica para la estabilidad química de faenas e instalaciones mineras 2015)

En la etapa 3 y final, la oxidación catalizada biológicamente donde el hierro ferroso Fe^{2+} se oxida a hierro férrico Fe^{3+} bajo presencia de bacterias aeróbicas. A medida que se consume la alcalinidad disponible el hierro férrico Fe^{3+} se convierte en oxidante en pH menores a 3,5. Esto genera una reacción de mayor velocidad que en la etapa 1 y produce una alta cantidad de protones $16H^+$. La velocidad de oxidación bacteriana depende de factores tales como la temperatura, pH, disponibilidad de O_2 y de CO_2 para la reproducción de las células, cantidad de nutrientes (N, P) y área superficial del mineral sulfuroso.

Las etapas anteriores explican cómo se produce el ácido que puede ser esparcido a el ecosistema donde se encuentra inmersa la faena (Figura 48), por lo que medidas de control deben ser aplicadas, dentro de las medidas más utilizadas se encuentran: Inocular con bacterias sulfato reductoras, encapsular permanentemente los materiales ácidos, precipitar mediante el uso de una base geotextil, ácidos neutralizadores, minimizar el oxígeno y el agua infiltrada.

4.4.5 Comentarios y discusión

Chile se caracteriza por ser un país basado en la minería, lo que conlleva grandes consecuencias ecológicas a simple vista, entender cómo funcionan los depósitos de relaves es necesario para poder afrontar el desafío de mejorar el diseño y evitar desastres de gran envergadura.

Como se describió en el capítulo la gran mayoría de los residuos mineros se encuentra en constante saturación y secado, por lo que la mecánica de suelos parcialmente saturados es fundamental en la comprensión de la respuesta mecánica de estos materiales. Ya que se basa en el grado de humedad, se puede caracterizar de mejor manera el funcionamiento hidráulico de estos suelos, asegurando su estabilidad tanto física mediante la napa freática, como química ya que el oxígeno dentro los poros y agua de poros, es el principal reactivo que genera ácidos.

En el próximo capítulo abarcaremos otro tipo de residuo minero, los lixiviados, producto de reacciones químicas estos suelos cambian sus propiedades de manera abrupta, por lo que son una interesante área de estudio al ocupar la mecánica de suelos parcialmente saturado para su comprensión y la curva de retención para comparar su comportamiento.

5 Ripio de lixiviación, roca estéril, sobrecarga, escoria, desmonte y mineral de baja ley.

5.1 Introducción

Según el "Catastro de faenas abandonadas actualizado a 2019"(Sernageomin, 2019) por lo menos 1788 faenas que incluyen: desmontes, minerales de baja ley, estériles, escorias y ripios de lixiviación, se encuentran abandonados en la actualidad (Figura 49). Es un número alarmante ya que gran parte de este material acumulado podría causar algún desastre si las condiciones climáticas afectaran su estabilidad físico-química. También hay que tomar en cuenta la situación actual de cada una de las faenas, ya que la gran mayoría se encuentra inactiva o abandonada.

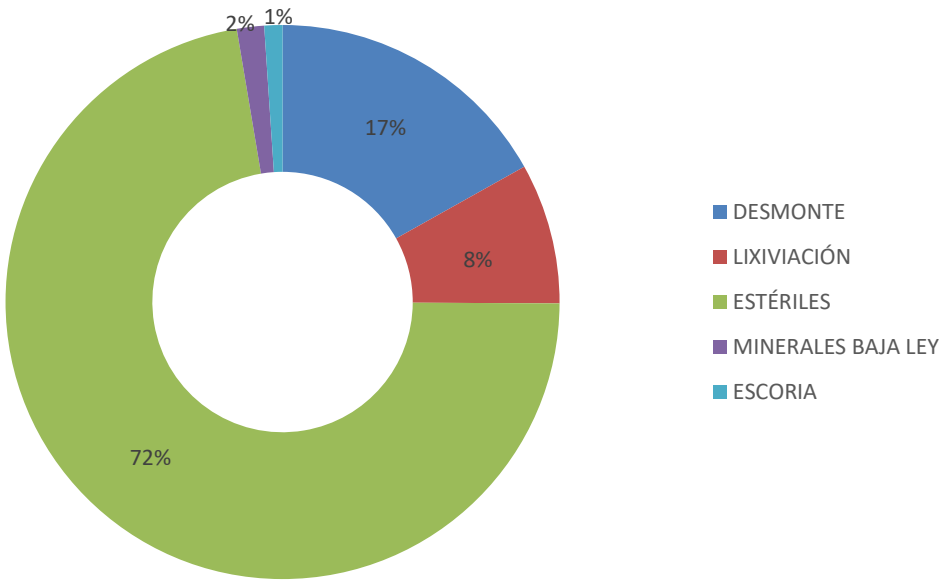

Figura 49. Catastro de faenas abandonadas actualizado al 2019

Dada la configuración geológica del territorio chileno, por su extenso y angosto territorio, el país cuenta con una importante variedad de recursos minerales dispuestos a variadas alturas respecto del

nivel de mar. Debido a que los cuerpos mineralizados se encuentran en gran mayoría bajo la superficie, se deben realizar grandes movimientos de suelos y de material rocoso para llegar a ellos.

En la explotación minera el material estéril o con muy baja ley (marina de rechazo) resulta traer consigo un gran problema respecto de su denostación final, ya que al no contar con un beneficio económico dentro de los procesos de extracción/producción, finalmente se transforman en residuos masivos mineros.

En casi todos los proyectos, se generan residuos debido a desmonte de la zona de extracción, a su vez escoria y minerales de baja ley, ya que los minerales metálicos se encuentran bajo una capa de suelo o roca ordinaria (llamada "sobrecarga (overburden)" o "roca estéril (waste rock)") que debe moverse o excavarse para permitir el acceso al depósito de mineral metálico. Para la mayoría de los proyectos mineros, la cantidad de sobrecarga generada por la minería es enorme. La relación entre la cantidad de sobrecarga y la cantidad de mineral, denominada "relación de extracción", suele ser mayor que uno y puede ser mucho mayor. Por ejemplo, si un proyecto minero propuesto implica la extracción de cien millones de toneladas métricas de mineral, entonces el proyecto minero propuesto podría generar 10 veces o aún más toneladas métricas de sobrecarga y desmonte. La razón principal de los altos volúmenes de residuos de la mina es la concentración muy baja de metales contenidos en los minerales. Por ejemplo, la minería de oro se realiza actualmente utilizando la tecnología de lixiviación en pilas para minerales que contienen tan solo 0,5 [g] por tonelada de oro. Por lo tanto, es claro que prácticamente todas las toneladas de roca que se extraen permanecen como desperdicio después de la extracción del oro. En la minería de pozo abierto, también hay un volumen considerable de sobrecarga y roca de desecho producida que no contiene mineralización o niveles de mineralización demasiado bajos para hacer la extracción económica. Las relaciones de extracción en el desmontaje con orden de dos a seis no son inusuales. Considerando el caso de una mina de cobre de rajo abierto donde se extrae 66.000 [ton] de cobre por día y el grado promedio del mineral es del 1,5% (es decir, una tonelada de mineral contiene 1,5[kg] de cobre) y la relación de extracción es 3. En este caso, se descartan 300.000 [ton] de roca de residuos diariamente, mientras que 100.000 [ton] de otros residuos (típicamente relaves) permanecen después de la extracción del cobre. En un año con 350 días de producción, se producen 105.000.000 [ton] de residuos de roca y 35.000.000 [ton] de relaves. La relación relave/estéril está en el orden 1:3 en promedio, en proyectos nuevos y en proyectos con mayor data de tiempo de ejecución, la proporción relave/estéril mayor aproximadamente en un rango de 1:4 – 1:7.

Estos desechos de gran volumen, que a veces contienen niveles significativos de sustancias tóxicas, generalmente se depositan en el sitio, ya sea en pilas en la superficie o como relleno en tajos abiertos o dentro de minas subterráneas. Es por ello es imprescindible en toda faena la existencia de un botadero, que corresponde a un lugar específico y adecuado para disponer el material estéril o marinas de rechazo.

La terminología utilizada para describir los botaderos de desechos mineros varía considerablemente de una mina a otra y de una jurisdicción a otra. En América del Norte, en las operaciones convencionales que utilizan camiones y palas, estas estructuras se denominan más comúnmente “waste rock dumps” (botaderos de roca estéril) o “waste rock storage facilities” (instalaciones de almacenamiento de roca estéril) para diferenciarlas de los “tailings deposits” (depósitos de relaves). En América Latina, se utiliza el genérico "botadero". En las minas de carbón en el centro y este de los Estados Unidos, las praderas canadienses y Australia, tradicionalmente se les llama "spoils"(despojos o remanentes). En el Reino Unido, los depósitos de roca estéril asociados con minas de carbón tanto a cielo abierto como subterráneas se conocen históricamente como "tips" (vertederos). El término "tip" también se ha utilizado en muchas jurisdicciones para describir los depósitos de desechos asociados con las minas subterráneas de roca dura. A menudo también se hace una distinción entre los botaderos de roca estéril (waste rock dumps), las reservas de minerales (mineral stockpiles) y el sobrante (overburden) o capa superficial de la pila (topsoil stockpiles).

5.2 Botaderos

Un botadero es el espacio geométrico en el cual se depositan los materiales rocosos estériles provenientes de una operación minería, bajo técnicas que aseguren un bajo costo de llenado y estabilidad de la masa en el tiempo, todo enmarcado en normas ambientales que eviten daños irreparables.

Un botadero es un lugar específico donde se deposita el material estéril extraído de la mina, el cual debe cumplir con las condiciones necesarias para ese fin. Elegir la ubicación para un botadero es crucial ya que tiene repercusión en todas las decisiones posteriores que se tomen con respecto al botadero. Un buen lugar para un botadero será el sector que cumpla de mejor manera con las exigencias técnicas y económicas que siguen a continuación:

- El botadero debe ser geológica y geomecánicamente apto para ello, ya que la gran cantidad de material a depositar puede generar siniestros geomecánicos o hundimiento en el sector.
- La distancia entre el punto de carga de los camiones en la mina y el botadero debe ser la mínima posible, ya que el costo en transporte depende de esta distancia.
- El uso del sector elegido no debe significar un daño ambiental real o potencial.
- El sector elegido debe carecer de recursos utilizables (por ejemplo, un yacimiento o una reserva de agua), ya que este sector podría tener importancia económica en el futuro si en el presente no la tiene ver Figura 50.

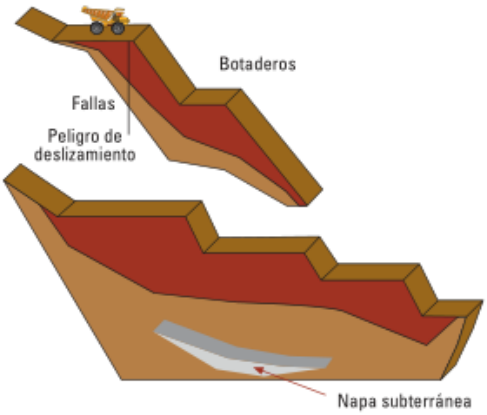

Figura 50. Representación de la ubicación del botadero.

De esta forma, un buen lugar para un botadero, lo constituirá el sector que cumpla de mejor manera todas las exigencias para su habilitación, tanto técnicas como económicas. Cabe destacar que el lugar escogido para el botadero debe considerar variables presentes y futuras. Por ejemplo, si se está pensando en la disposición de un material que en el futuro será lixiviado con ácido sulfúrico u otro, se debe buscar un lugar técnica y económicamente adecuado para poder implementar un sistema de lixiviación en el futuro, aunque no esté contemplado hacerlo.

El diseño de un botadero es una obra de ingeniería que debe ser realizada en la etapa de pre factibilidad de un proyecto minero considerando varios factores de constructibilidad, seguridad y ambientales en su diseño y que, de no ser abordados a tiempo, pueden provocar un impacto negativo en su evaluación técnico económica. También es importante entender el propósito del botadero, ya sea para contención permanente o almacenamiento temporal.

Los lugares más utilizados para la ubicación de un botaderos generalmente son las laderas y en pilas o tortas. También se utiliza las quebradas en casos que no conlleven un riesgo geomecánico real o potencial, teniendo precaución además con los cauces de aguas que pudiesen verse afectados.

5.2.1 Botaderos en laderas

Comúnmente se disponen los residuos (estériles y/o materiales con baja ley) en una ladera de cerro circundante al sector de construcción del yacimiento o explotación (dependiendo de la etapa del proyecto), esto debido a la facilidad que presenta descargar mediante el uso de medios mecánicos en una ladera que tiene una pendiente favorable, presentando ventaja porque se da una fácil mantención del mismo y ostenta una mayor estabilidad geomecánica en la compactación con equipos de alto tonelaje.

Figura 51. Esquema de botaderos en laderas.

Por otro lado, proporciona un mayor espacio para la actividad y esta se puede realizar de manera uniforme y secuenciada. Sin duda este tipo de diseño desde el punto de vista ambiental presenta complejidades e impactos ambientales que deben ser evaluados con antelación dando énfasis en manejo del talud del botadero y su impermeabilización con respecto a la ladera donde se emplaza.

5.2.2 Botaderos en pilas

Cuando no se dispone de laderas en que se puedan depositar los materiales estériles, se debe recurrir a la construcción de pilas o tortas de acopio. En este caso se debe considerar la construcción o habilitación permanente de accesos sobre la pila a medida que esta evoluciona en su tamaño. Como se vio en el capítulo anterior, estas pilas generalmente se utilizan cuando el material contiene algún remanente de interés para ser tratado con soluciones lixiviantes.

5.2.3 Tipos de botaderos

Luego de agrupar estas estructuras por medio de la ubicación donde se emplazan, los botaderos también se pueden clasificar mediante el proceso pirometalúrgico o hidrometalúrgico con la que cuenta la mina, como los siguientes casos:

- Botaderos de roca estéril.
- Botaderos de ripios.
- Botaderos de sulfuros con baja ley potencialmente lixiviables.
- Botaderos de sulfuros con alta ley potencialmente lixiviables.
- Botaderos de óxidos con alta ley, potencialmente lixiviables o comercializables.
- Botaderos de materiales como arcillas, gravas, arenas, etc., que de una u otra manera pueden tener interés económico.
- Botaderos de mineral tratable cuyo tratamiento se posterga por dar preferencias a los que aportan mayores beneficios.

5.2.4 Operaciones en botaderos

Todo el material sobrante del proceso de extracción minero, cualquiera sea, encuentra su ubicación final en los botaderos, por lo que es importante entender su funcionamiento, geometrías y volúmenes, costos, mantenimientos, peligros o problemas involucrados y, por último, pero no menos importante su relación e interacción con el ambiente que lo rodea.

Para comenzar, la descarga del mineral por parte de los camiones se realiza en el borde del botadero, para que en un acto seguido operen los bulldozers y/o wheeldozers acomodando el material para formar una berma o cuneta de seguridad, para que los camiones puedan descargar de forma segura al utilizarla como se muestra en la Figura 51. De la misma manera que acomodan el material la tarea de los bulldozers a su vez es compactar el material para evitar algún colapso zonal o total de la estructura.

El cálculo de volumen en los botaderos va de la mano con el costo de la operación, por lo cual es sensible a la hora de llevar a cabo la prefactibilidad del proyecto minero. El cálculo de volumen del botadero se utiliza para estimar el espacio físico necesario para la adecuada ubicación del mineral estéril, a su vez da restricciones e implicancias para determinar el lugar donde se depositará el material. Cada tonelada de mineral rechazado dentro de la explotación minera, tiene un costo extra a la extracción asociado al traslado y manejo fuera del sitio extractivo, por lo que se requerirá un cálculo o planificación específico para su disposición final.

Una aproximación para obtener el volumen necesario para depositar el excedente del mineral metálico, se ocupa esta simple formula:

$$V_b = \frac{T_m}{D_b}$$

Donde: V_b es el volumen en $[m^3]$ necesario para depositar el material; T_m es el tonelaje del material en la mina; y D_b es la densidad final compactada del material en el botadero [Ton/m^3].

Ya con un volumen aproximado se puede dirimir que sector sería el adecuado para acopiar el material, teniendo en cuenta la información relevante de cada sector, como su pendiente, ángulo de reposo del material, características del material que compone la superficie y cotas de nivel relevantes para el depósito.

Dicho esto, el costo asociado a una tonelada de material rocoso estéril en su extracción y traslado se puede dividir de la siguiente manera. Primero el costo de extracción de la mina y la distancia que tendrá que recorrer el transporte de este, lo que define la construcción de realces o la extensión de la plataforma del botadero. Segundo el costo de mantención del depósito y tercero pero el que podría ser mayor, el costo asociado a algún tipo de arreglo o restauración producido por algún desperfecto o imprevisto en la construcción y operación del botadero, como también por algún fenómeno de la naturaleza (e.g. sismos).

Para evitar el colapso en los botaderos se debe realizar una compactación adecuada para evitar el estado suelto en el que es depositado el material, la idea es llegar a un material compacto para conseguir mayor estabilidad física. Generalmente los bulldozers o wheeldozers se utilizan para la compactación, buscando compactar más de un 10% la densidad con la que llega el material suelto al depósito. Hay que tener en cuenta que la compactación en los niveles superiores del botadero nunca alcanzara la compactación de la base del botadero debido a la presión que ejerce el estrato superior del botadero. No obstante, la uniformidad en la que se lleva a cabo es más importante que lograr la compactación ideal, ya que mientras más heterogénea sea la densidad por niveles en la pila, más insegura se torna la operación en la superficie del botadero. En los lugares donde se encuentren discontinuidades o problemas de compactación, más propenso a colapsos se encontrará el botadero, sin importar si esto es la causa del problema, ya que generan zonas débiles dentro de la estructura.

Figura 52. Esquema de compactación del botadero y problemas de homogeneidad(modificado Portal Minero)

Otra arista importante de un botadero es su interacción con lo que lo rodea. En ese sentido uno de los efectos más notorios es la presión ejercida sobre el terreno por el peso del botadero. Debido a la presencia de un gran volumen de material en un lugar donde antes no existía, el terreno podría ser capaz como no de resistir la carga. Esto puede traer consecuencias severas cuando se dispone el botadero en el terreno circundante a una explotación de mina subterránea, donde se podría encontrar anomalías en la infraestructura (e.g. túneles) debido a la presión en la superficie.

Los impactos de la roca estéril, las instalaciones de lixiviación en pilas y las instalaciones de lixiviación en botaderos sobre la calidad del agua pueden ser graves. Estos impactos incluyen la contaminación del agua subterránea bajo de estas instalaciones y las aguas superficiales. Las sustancias tóxicas pueden filtrarse de estas instalaciones, a través del suelo y contaminar los acuíferos, especialmente si el fondo de estas instalaciones no está equipado con un revestimiento impermeable.

Para concluir el análisis sobre los botaderos, existe siempre en su estructura un posible colapso en los bordes del botadero debido a la menor compactación que esta zona sufre debido a la geometría del depósito como se muestra en la Figura 52. Para un material compacto, generalmente se puede estimar, prevenir y controlar, mediante manifestaciones en la superficie como grietas, pero en el caso de depósitos de material suelto, se puede apreciar inestabilidad presente en la superficie, pero no el posible volumen afectado debido a que la falla del material no es recta, sino curva como se muestra en la Figura 53. En algunas ocasiones se puede apreciar un en las caras abultamientos, lo que permite estimar la curva de deslizamiento e incluso evitarla con alguna intervención directa al talud.

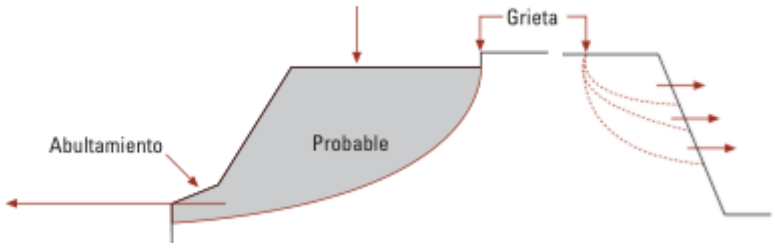

Figura 53. Fallas posibles debido a grietas en material suelto. (modificado Portal Minero)

Los botaderos pueden estar conformados por cualquier material de descarte minero ya sea roca estéril, sobrecarga, desmonte , minerales de baja ley o ripios de lixiviación. La mayoría de los botaderos de desechos mineros y las reservas de minerales se componen predominantemente de escoria; sin embargo, muchos botaderos también incorporan suelos de operaciones de desmonte. Además, se requieren muchas operaciones para almacenar materiales de sobrecarga para su uso en la recuperación de mineral. Las propiedades físicas de los diversos materiales de relleno y su distribución dentro del botadero o la pila influirán, y en algunos casos controlarán, la estabilidad general de la estructura. Por lo tanto, se requiere una caracterización cuidadosa de estos materiales para respaldar la selección del sitio, el análisis de estabilidad, el diseño y el cierre. Para los propósitos de la siguiente discusión, los materiales de relleno se han subdividido en roca estéril y/o sobrecarga y en ripios de lixiviación.

5.3 Roca estéril y/o sobrecarga

La roca estéril consiste en roca no mineralizada ósea nulo interés económico, así como roca que contiene mineralización que es demasiado baja para extraerla económicamente con las tecnologías existentes. Los materiales que recubren el yacimiento, denominados sobrecarga, también suelen incluirse en la categoría de roca estéril. La roca estéril puede contener algo de mineralización, por lo que los desechos de hoy pueden convertirse en el mineral de mañana. Este hecho ha sido probado recientemente con el desarrollo de procesos hidrometalúrgicos de bajo costo para la extracción de oro (como la lixiviación en pilas o biolixiviación). En la actualidad, muchos botaderos de estéril se están reutilizando como mineral lixiviable.

Las características de la roca estéril dependen de las características de la roca huésped, así como de la roca que rodea el cuerpo mineral (Figura 54). Es muy a menudo roca dura, perdurable y competente que consta de tamaños de partículas desde dos metros de diámetro hasta finos como limo y arcilla. Sin embargo, la roca estéril también puede consistir en materiales muy débiles, como sedimentos o rocas volcánicas erosionadas, que pueden producir considerables problemas de estabilidad.

Figura 54. Vista de un botadero de roca estéril en el noroeste de Australia(G. McPhail 2017)

Debido a la variabilidad en la conformación de las rocas estériles y la sobrecarga, el método de descarga del material ya sea mediante camiones o elevadores (depende de la mina) genera una cascada por la superficie del vertedero, que a medida que sucede producirá segregación de las partículas. Las partículas de mayor granulometría ruedan hacia el fondo del botadero y las partículas de menor tamaño como gravas, arenas y finos permanecen cerca de la parte superior. Cuanto más alta sea la cara del botadero, por consiguiente, la pendiente, más prominente será la segregación. Como resultado, el fondo de las instalaciones suele ser roca de drenaje libre, mientras que las elevaciones superiores y las superficies de trabajo son menos permeables.

Las pendientes del botadero se pueden blindar con roca dura competente y duradera. En este caso, normalmente se dejarán en su ángulo natural de reposo, que aproximadamente es de 35 grados. Las pendientes de los botaderos de roca estéril también se pueden suavizar con topadoras a ángulos de pendiente menos profundos que el ángulo de reposo, por ejemplo, 2H:1V. Existe una controversia considerable sobre la recuperación de tales pendientes mediante el establecimiento de vegetación. Una escuela de pensamiento es que la vegetación no puede establecerse en pendientes más empinadas que 3H:1V; sin embargo, existen ejemplos de revegetación exitosa de taludes a 2H:1V. Es importante controlar la longitud del talud para reducir la formación de erosión por barrancos (Figura 55).

Figura 55. Sobrecarga de la mina de cobre Chuquicamata (Edward Burtynsky 2017)

5.4 Ripios de lixiviación

Son los materiales que quedan como residuo del mineral una vez que todo el cobre ha sido lixiviado, el cual es desechado en botaderos de ripio, ósea es la cola del proceso de lixiviación. Luego de pasar por la lixiviación primaria en las pilas de ripio, el material ripiado estéril o de baja ley es apilado en botaderos de ripios donde se aplica la lixiviación secundaria, rescatando la mayor parte del material metálico de interés que contiene la roca. Por lo que grandes cantidades de este material luego de extraer la fracción de interés, pasan a situaciones de abandono o inactividad debido a su nulo interés económico. Cabe destacar que los botaderos de ripio se conforman luego de que se retire material de una pila de lixiviación dinámica, una vez extraído el mineral metálico. El traslado y posterior depósito del ripio a los botaderos, se produce mediante el uso de un apilador. Este equipo está conectado a la roto pala que opera en las pilas dinámicas cargando el material de desecho a una correa transportadora que llega al apilador (Figura 56), el cual deposita el ripio al botadero, descargándolo de manera gravitacional, por lo que el ripio no es compactado y permanece en el estado suelto luego de ser transportado por correas desde la pila dinámica de lixiviación. En las pilas de lixiviación y en estos botaderos es frecuente observar problemas de estabilidad, los que, en mayor o menor grado, pueden comprometer el funcionamiento de los equipos y a su vez la continuidad de la operación completa de la mina.

Figura 56. Apilador descargando ripio en el botadero (Carolina Vergara SRK 2019)

Los ripios de lixiviación son materiales de granulometría heterogénea, esto debido a que el material extraído del rajo mediante tronadura puede pulverizarse o disminuir su tamaño manteniendo su estructura original, por lo que la granulometría puede contener desde bolones a finos. A su vez, el ripio puede ser lixiviado inmediatamente luego de ser extraído de la mina o pasar por un proceso de chancado y posterior aglomeración, por lo que en cada una de estas operaciones el tamaño y la conformación de las partículas tiene un alto grado de variabilidad. Generalmente el mineral antes de ser lixiviado, se procesa para disminuir su tamaño y luego se aglomera para mejorar la permeabilidad al entrar en contacto con la solución lixiviante. Hay que tener en cuenta que durante el proceso de riego en las pilas este glómero (Figura 57), dependiendo de la calidad, se puede destruir por lo que el fino podría decantar con la solución lixiviante, nuevamente afectando la granulometría final en el botadero.

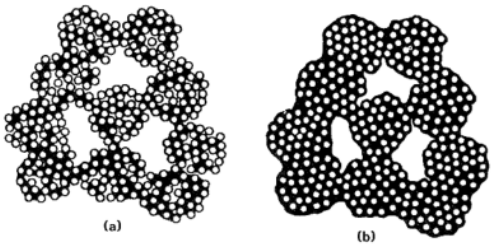

Figura 57. Representación de aglomerados (a) lixiviados (b) sin lixiviar (Modificado E.Domic 2001)

Al describir la caracterización geotécnica de los ripios, es fundamental tener en consideración la zona geográfica de la extracción desde donde se obtiene el material, ya que esto regirá sobre los elementos que componen el ripio, al mismo tiempo, también hay que tener en cuenta que la extracción de mineral durante la vida útil del yacimiento puede entregar minerales(óxidos y/o sulfuros) dependiendo de la fase de extracción en la que nos encontramos, y como se señaló en el capítulo anterior ambos minerales suelen tener composiciones de elementos y estructuras distintas. Esto queda en evidencia al obtener muestras que provienen de la misma zona de un botadero, ya que todo ripio lixiviado termina en estos depósitos.

En general, se tiene mineral chancado con tamaño máximo entre ¾" a 1". Estos se suelen clasificar como gravas con contenidos de finos variable, dependiendo de su origen. Normalmente el contenido de fino ronda por el 15-20% puesto que un porcentaje más alto de fino, impacta directamente a la permeabilidad lo que puede afectar en su estabilidad físico-química. Los ripios se encuentran en una densidad suelta a media, ya que son depositados mediante un equipo apilador o camiones cuando el brazo del apilador no alcanza el borde del botadero. Debido a que pasan por todo el proceso de lixiviación como describe el capítulo anterior, la estructura de estas partículas podría cambiar a través del tiempo y las condiciones de saturación serían las que detonarían estos cambios, debido a la presencia de oxígeno en el agua , ya que puede seguir reaccionando por meses o años dependiendo de los distintos minerales que componen la estructura del ripio.

Las características del material en los botaderos pueden ser estudiadas mucho antes de que estás sean descargadas al depósito, ya que con anterioridad se pueden obtener muestras al momento de ser extraído desde la mena, mientras es transportado a la pila y antes de ser depositado. Y como bien sabemos a medida que se avanza en la vida útil del rajo, se van obteniendo distintos tipos de minerales, por lo que en el botadero se pueden encontrar minerales de todas las etapas de extracción. Esto conlleva muchas variaciones en los parámetros importantes de la caracterización geotécnica, como es el ángulo de fricción interna del suelo en cuestión, el cual podría mantener por un tiempo prolongado un valor aproximado que resulte ser beneficioso para el depósito, esto debido a que el material extraído de la mina no varía, pero al variar el material extraído este podría presentar una disminución en su valor, generando problemas de estabilidad en las próximas capas que se construirán en el depósito. Por lo que, en las primeras etapas del proyecto, es necesario hacer los estudios y mediciones correspondientes para poder aproximar de buena manera el tipo de material que se encuentra en todas las zonas de la mina y así programar de manera eficaz donde y cuantos depósitos se requerirán para descargar de manera segura todos los descartes.

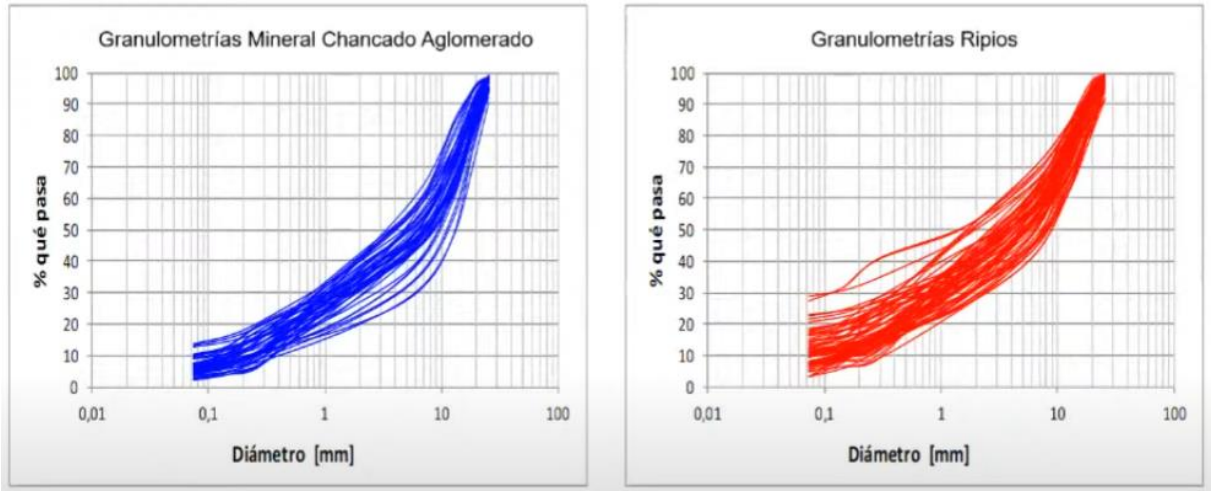

Figura 58. Comparación de las curvas granulométricas material chancado aglomerado y ripios de lixiviación (Carolina Vergara 2021)

La Figura 58 muestra la curva de distribución granulométrica del material chancado aglomerado antes de lixiviar recién ubicado en la pila y los ripios procedentes de la lixiviación, todo el material muestreado proviene del mismo modulo donde se trata. Como se evidencia en las curvas, en el ripio existe un aumento de finos, llegando casi hasta el 30% de material que pasa la malla #200 en comparación al 15% que contienen los aglomerados. Esto es efecto del riego en el depósito de ripios, el glómero a medida que se impregna de solución lixiviante desplaza los finos que escurren con la solución y podrían generar problemas en la permeabilidad tanto de la pila como los drenes que captan la solución.

Existen múltiples factores que pueden impactar en la estabilidad física de botaderos y pilas de lixiviación entre ellos los más importantes son:

- Tener en cuenta las características geotécnicas del mineral/ripios y su degradación en contacto con la solución en el tiempo, ósea los aspectos geoquímicos debido a la solución remanente en el material
- Las condiciones de la fundación donde se emplazará el depósito.
- El sistema de membrana basal, debido a que para proteger el suelo natural es necesario ubicar esta membrana la cual a su vez es una potencial superficie de falla.
- Las infiltraciones y deficiencias en el sistema de drenaje, ya que podrían generar un nivel de saturación dentro del depósito.
- La secuencia constructiva del depósito, ya que si se sobrecarga material en una zona que se encuentre saturada podría presentar una potencial falla.
- La sismicidad de la zona donde se emplazará el depósito.

Resulta necesario respaldar el diseño con un control operacional permanente, definiendo un plan de acción frente al arribo de materiales con mala calidad geotécnica (exceso de fino con alta plasticidad o material con exceso de humedad) para tomar decisiones de donde dejarlos o mezclarlos antes de depositarlos con otros materiales de mejor calidad. Esto se puede lograr llevando a cabo campañas de caracterización geotécnica periódicas, de manera de llevar un control efectivo de los materiales depositados en los botaderos y lograr anticipar situaciones de riesgo para la estabilidad física como la licuación estática producida por el aumento del grado de saturación cercano al 80%.

Los parámetros de control geotécnico relevantes para pilas de lixiviación y botaderos de ripios coinciden en varios aspectos como identificar las unidades geotécnicas de origen o geo metalúrgica de

origen para predecir que vamos a tener más adelante para las operaciones. También la granulometría para controlar el material bajo #200 y obtener su índice de plasticidad, idealmente los límites de Attenberg.

En el caso de las pilas es importante monitorear la permeabilidad y la densidad del dren debido a que el material se puede colmatar con finos o compacta por el paso de maquinaria. En el mismo aspecto es importante tener el balance de las soluciones que ingresan y salen de la pila, ya que al monitorear el caudal que sale por las colectoras se puede evidenciar el mal funcionamiento y por ende la posible zona de falla. Para los botaderos de ripio es importante revisar los taludes de frente de avance evidenciando donde se desarrolle mayor deslizamiento. Controlar la humedad con la que llegan los ripios al depósito, para evitar producir nivel freático. Idealmente realizar una exploración geofísica y geotécnica profunda y periódica (aplica para pilas permanentes) para identificar a que altura se encuentra, si es que existe, algún nivel freático y controlar el grado de saturación.

La humedad que contienen los ripios depende del riego que se le aplica a la pila de lixiviación, el material que llega al botadero tendrá un grado máximo de saturación igual o menor al de la humedad remanente de la pila dinámica. Por lo mismo no es usual encontrar un nivel freático en el botadero de ripios, pero tampoco se puede descartar ya que no siempre existe un monitoreo en el nivel freático de las pilas dinámicas. Hay que tener especial cuidado con las pilas de lixiviación permanentes, ya que debido al constante riego que están expuestas en su superficie, y alguna posible falla en el sistema de drenaje de la pila, eventualmente podría generar un nivel freático en la base del depósito. Por lo que es importante controlar el riego y el balance de las soluciones para prevenir fallas en los depósitos.

Para comprender los diversos factores que afectan la hidrología de la lixiviación en botaderos y pilas, se debe tener un entendimiento básico del sistema de lixiviación típico. En general, está compuesto por desechos mineralizados de roca, un sistema de aplicación de solución lixiviante adecuada para el tipo de roca/mineral y la construcción del depósito; y un sistema de recuperación capaz de capturar el máximo flujo de solución (PLS). Los diversos factores que afectan la hidrología de la lixiviación en botaderos se pueden dividir de la siguiente manera (Tabla 4) en tres categorías principales:

Tabla 4. Factores que afectan la hidrología de la lixiviación en botaderos

Físicos	Químicos	Otros
Estratificación Canalizaciones Segregación Sorción Fundación Permeabilidad Construcción	Control de pH Precipitación/Hidrolisis Temperatura Alteración Oxidación Tipo de Solución	Aplicación y colección de la solución Métodos de control de la contaminación

Los aspectos más importantes de la hidrología de la pila de lixiviación y por consiguiente botadero de ripios son los factores físicos y químicos que influencian el flujo de la solución. Cuando se determina el flujo del depósito, la permeabilidad de las partículas discretas de rocas no puede ser ignorada. Ya que, aunque no afecte de gran manera el flujo del botadero la permeabilidad de las rocas, si determina la penetración de la solución lixiviante en la roca, lo que afecta finalmente a la capacidad total de lixiviación de residuos.

Otro aspecto importante es la química en la lixiviación, por ejemplo, la hidrolisis y precipitación de las sales de hierro reduce la permeabilidad superficial de los vertederos, lo que provoca el encharcamiento de soluciones lixiviadas y conduce a la canalización, por lo que la solución no penetra

de manera adecuada el vertedero. Cuando la disponibilidad de pirita y oxigeno no es suficiente para producir cantidades adecuadas de ácido, entonces quizás sea necesario añadir ácido para evitar la precipitación de sales férricas.

6 Lixiviación

La lixiviación es un proceso en el cual un disolvente pasa a través de un sólido pulverizado para que se produzca la infusión de uno o más de los componentes solubles del sólido, esta técnica se utiliza en distintas áreas de estudio como la geología, agricultura y metalurgia. Algunos ejemplos de la utilización de esta técnica son: la obtención de azúcar (separa azúcar de la caña mediante agua caliente), los aceites vegetales (se obtienen de las semillas mediante lixiviación con disolventes orgánicos) y los colorantes (se extraen de materiales solidos con alcohol o soda).

En la minería la lixiviación es un proceso químico en el cual los minerales oxidados de cobre pueden ser tratados y transformados en sulfato de cobre (CuSO4) mediante la adición de ácido sulfúrico, provocando una reacción óxido-reducción y obteniendo como producto una solución con contenido de cobre disuelto. Existen distintos métodos de lixiviación empleados en minería (Figura 59), los principales son la lixiviación en botaderos, pilas, tanques y, menos empleada, la lixiviación in situ. La elección del método depende generalmente del beneficio a generar. Los minerales de mayor ley justifican económicamente ser sometidos a procesos previos como chancado y aglomeración. Estos procesos adicionales permiten aumentar la recuperación y disminuir los tiempos de lixiviación.

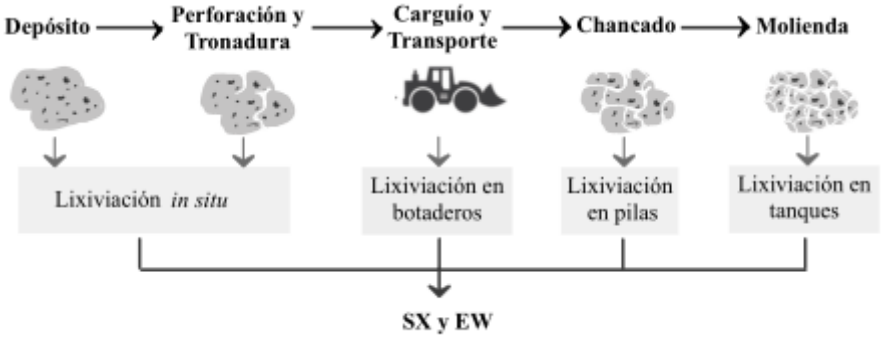

Figura 59. Técnicas de lixiviación aplicadas a la minería (Fundamentos para la implementación de minería in situ, C. Bahamóndez 2014)

La solución acuosa rica en el metal de interés corresponde a la solución preñada de lixiviación (PLS: Pregnant Leach Solution), y el sólido (residuo) insoluble sin valor se denomina comúnmente como ripio de lixiviación, correspondiente al material remanente post lixiviación. El principio de este proceso se basa en la sensibilidad de los minerales oxidados ante la interacción con soluciones ácidas.

Según los datos reportados en el "Anuario de la minería de Chile 2020" (SERNAGEOMIN, 2019), nuestro país cuenta con una capacidad instalada de lixiviación de aproximadamente 523 millones de toneladas métricas anuales, esto considera plantas de lixiviación, extracción por solventes (SX) y electro obtención (EW). En lixiviación química los agentes lixiviantes más comunes son sulfatos, cloruros, nítricos y amoniacales. La lixiviación de sulfuros en medio sulfato se ha estudiado principalmente con ácido sulfúrico y la adición de iones férricos como agente oxidante, debido a sus bajos costos, mínimos problemas de corrosión, y la posibilidad de regenerar el ácido sulfúrico durante la electro-obtención del cobre.

6.1 Tipos de lixiviación

Las técnicas convencionales de lixiviación consideran la extracción total del material previa a la irrigación con la solución lixiviante, esto corresponde a lixiviación en pilas, botaderos, tanques y agitadores.

6.1.1 Lixiviación en botaderos

Esta técnica también conocida como "dump leaching" consiste en lixiviar lastres, desmontes o sobrecarga de minas de tajo abierto, los que debido a sus bajas leyes no pueden ser tratados a través de métodos comunes. En ocasiones, se trata de ripios de lixiviación antiguos, cuyas leyes pasan a ser interesante transcurridos unos años. De igual manera, el material mineralizado marginal se carga con camiones y bulldozers en botaderos (nuevos o antiguos) formando capas de entre 5 y 10 metros. Luego de lixiviar una capa, esta normalmente se "ripea" (del inglés "Ripper", desgarrar) usando el escariador de un bulldozer, antes de colocar otra capa encima. Estos residuos se acumulan normalmente en quebradas cercanas a la mina y alcanzan altura de 100[m] o más (Figura 60). En la superficie del botadero se aplica una solución lixiviante que percola por gravedad a través del material, para así recolectarlo a través de piscinas, una solución enriquecida en cobre. Se caracteriza por tener ciclos largos de por lo menos un año o más y tiene bajos costos de operación e inversión. Las recuperaciones oscilan entre 20 al 60%

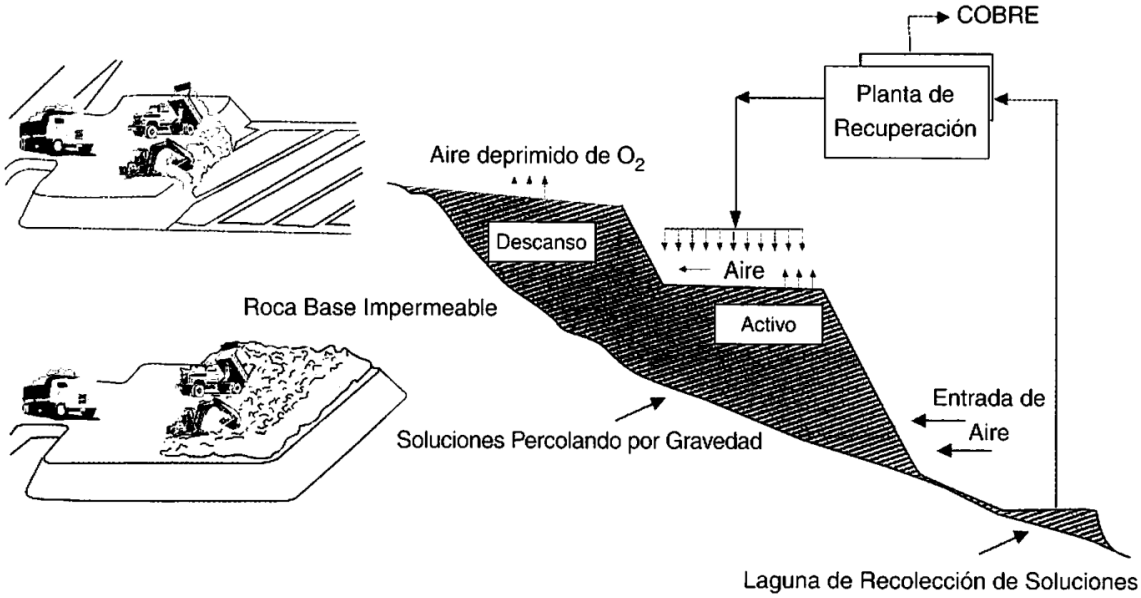

Figura 60. Sistemas de formación y operación de botaderos para lixiviación. A la izquierda dos formas de operación de camiones y bulldozer. A la derecha corte transversal de una operación de lixiviación en botadero. (E. Domic 2001)

Las soluciones que se irrigan en la superficie utilizan sistemas de distribución mediante goteros o aspersores, dependiendo de la cantidad de agua de la que se dispone y la condiciones para la evaporación en el lugar que se implementa. La zona de botaderos se selecciona para asegurar la impermeabilidad y poder utilizar la pendiente natura de los taludes y quebradas de la zona, para recuperar las soluciones de fácil manera. Si el terreno es permeable se preparan áreas especiales con distintos materiales de construcción que deben ser resistentes a la corrosión del ácido sulfúrico, ya sean plásticos como el PVC, HDPE y polipropileno, o se puede sellar el suelo mediante capas compactadas de escoria, asfalto y material fino del mismo material o de la planta de flotación.

6.1.2 Lixiviación en pilas

A diferencia de los botaderos, en este caso el material tiene una mayor ley, por lo tanto, económicamente conlleva un tratamiento más complejo a través de un chancado secundario y hasta terciario. Adicionalmente ya que queda un material bastante fino (3/8”-1/4”) es recomendable aglomerar los finos para restituir la permeabilidad al lecho de mineral que se va a lixiviar. El material chancado es transportado (generalmente mediante correas transportadoras) hacia el lugar donde se formará la pila. En este trayecto el material es sometido a una primera irrigación con una solución de agua y ácido sulfúrico, conocido como proceso de curado, de manera de iniciar ya en el camino el proceso de sulfatación del cobre contenido en los minerales oxidados, con este método también se logra inhibir la disolución de algunas especies indeseables como sílice (SiO_2) y aluminio. Aun con el curado en la correa transportadora no se logra una buena mezcla y efectivamente aglomerar homogéneamente las partículas finas en torno a las gruesas, lo que permite a las fuerzas cohesivas de tensión superficial mantener las partículas unidas entre sí, facilitando su transporte y apilamiento, y a su vez mejorando la permeabilidad liquida y gaseosa. Por lo que el mejor equipo para lograr estos efectos es el tambor aglomerador.

Figura 61. Irrigadores en pilas de lixiviación. (NETAFIM)

En su destino final, el mineral es descargado mediante un equipo esparcidor gigantesco, que lo va depositando ordenadamente formando un terraplén continuo de 3 a 8 metros de altura: la pila de lixiviación. Estas son acumuladas cerca de la mina y se construyen losas impermeables, con pendiente no mayor al 10% para favorecer el escurrimiento y recolección de la solución. Sobre esta pila se instala un sistema de riego por goteo y aspersores que van cubriendo toda el área expuesta. Bajo las pilas de material a lixiviar se instala previamente una membrana impermeable sobre la cual se dispone un sistema de drenes (tuberías ranuradas) que permiten recoger las soluciones que se infiltran a través del material (Figura 61).

A través del sistema de riego por goteo y de los aspersores, se vierte lentamente una solución ácida de agua con ácido sulfúrico en la superficie de las pilas. Esta solución se infiltra en la pila hasta su base, actuando rápidamente. La solución disuelve el cobre contenido en los minerales oxidados, formando una solución de sulfato de cobre, la que es recogida por el sistema de drenaje, y llevada fuera del sector de las pilas en canaletas impermeabilizadas. El riego de las pilas, es decir, la lixiviación se mantiene por 45 a 60 días, después de lo cual se supone que se ha agotado casi completamente la cantidad de cobre lixiviable. Las pilas alcanzan una recuperación baja entre el 50% y 70%. El material restante o ripio es

transportado mediante correas a botaderos donde se podría reiniciar un segundo proceso de lixiviación para extraer el resto de cobre.

Las pilas pueden ser dinámicas en la que el mineral se remueve, se envía a botadero luego de la lixiviación y la base de la pila es reutilizada. O bien pueden ser permanentes o estáticas, en que el nuevo material para apilar se carga sobre las anteriores, solo cuando haya concluido la lixiviación de la capa que se debe cubrir. La geometría de las pilas permanentes o dinámicas normalmente es un rectángulo alargado, dependiendo de las restricciones topográficas. Con respecto al tamaño de la faena se utilizan distintos sistemas de transporte para el material. En faenas pequeñas (0-10.000 [ton/día]) se usan sistemas de camiones y apiladores de correa autopropulsados. En faenas mayores (10.000-50.000[ton/día]) se usar correas modulares articuladas conocidas como "grasshoppers" (saltamontes) que terminan en un apilador de correa (Figura 62). Sin embargo, para faenas aún mayores (75.000-150.000[ton/día]) como Radomiro Tomic, se utilizan las pilas dinámicas por el excesivo tonelaje de mineral, que obligaría un complicado movimiento permanente de las correas alimentadoras. Se utiliza sistemas apiladores sobre orugas, alimentados con correas transportadoras estacionarias y móviles para la descarga, cuando se requiere remover el material se utilizan las rotopalas.

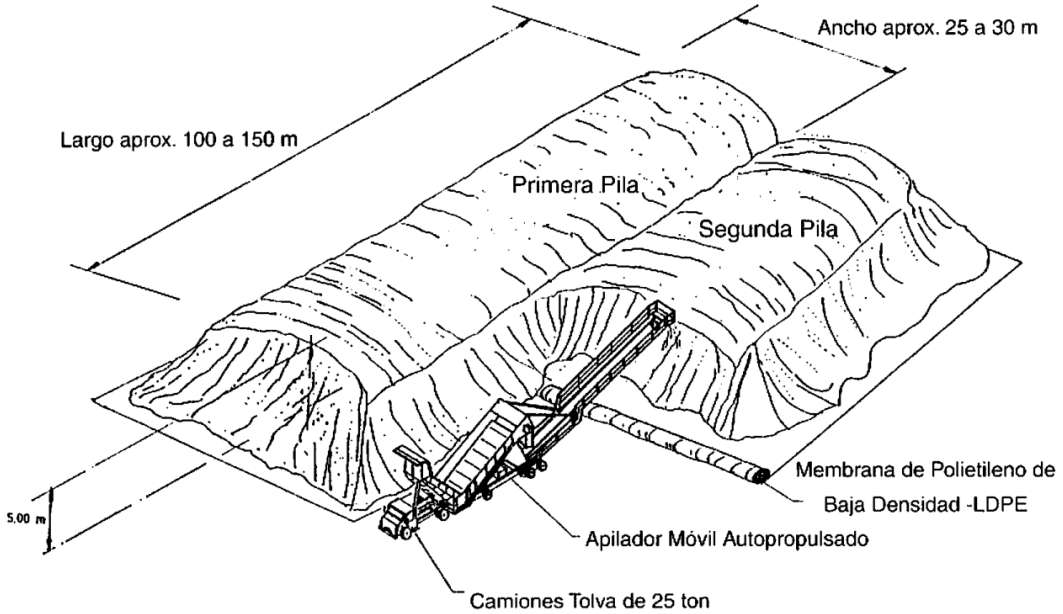

Figura 62. Esquema de formación de una pila con camión y apilador, notar la instalación simultanea de la membrana LDPE bajo de la pila sin ser afectada por la operación de descarga. (E. Domic 2001)

Para el diseño de la pila se deben tomar en cuenta varios aspectos como: la calidad de la base donde se apoya la cual debe ser impermeable, la accesibilidad a riego y recolección de las soluciones, la estabilidad física de la pila ya sea parcial o totalmente saturada y la ubicación de las piscinas donde se acumulará el PLS.

En la Figura 63 se muestra un esquema representativo de la conformación de una pila de lixiviación, el sistema se basa en una pendiente del terreno en el cual se hacen surcos mediante retroexcavadora para poner los drenes (tuberías corrugadas con orificios) y posterior a eso una malla que permite capturar la PLS y transportarlo al lugar de acumulación. Debajo de todo va una geomembrana que evita la contaminación al suelo producto de la lixiviación.

Figura 63. Esquema del sistema de filtración en la pila (López E. 2012)

Existen variables que condicionan la lixiviación en pilas y algunas de ellas son:

6.1.2.1 Altura del lecho

Determinada por la permeabilidad (líquida, en el caso de los oxidados, y también gaseosa en el caso de los sulfuros, debido a la necesidad de la presencia de oxígeno) del aglomerado producto del curado y por la velocidad en que se disuelve el material de interés (cinética de reacción). La presencia de arcillas, exceso de finos, y la formación de precipitados (por hidrólisis, por ejemplo) pueden disminuir la permeabilidad, resultando en canalizaciones de flujo preferencial y eventual acumulación de soluciones en la superficie, restringiendo el acceso uniforme de aire y de ácido. Las reacciones consumidoras de oxígeno (lixiviación de sulfuros) se ven afectadas inmediatamente por estas anomalías en la permeabilidad. Si aumenta la altura, dejando constantes las demás variables de operación, el líquido que escurre dentro de la pila estará mayor tiempo, por lo que retendrá mayor concentración de cobre en la solución efluente, sin embargo, aumentaran las compactaciones y canalizaciones restando eficiencia al proceso, al trabajar con mayores alturas debido al tiempo en que trabaja el ácido es probable que se disuelva la ganga consumiendo mayor reactivo, aumentando los costos de operación.

6.1.2.2 Flujo especifico

Es la velocidad a la que se desplaza la solución lixiviante a través de un material poroso, está en unidades de litros por tiempo y del área transversal de la pila. Depende de las cualidades físico-químicas del lecho aglomerado y está relacionado a la concentración de ácido sulfúrico en la alimentación. A medida que el flujo aumenta disminuye el tiempo de residencia en el reactor y el líquido tiene menor contacto con los aglomerados y viceversa. La influencia del flujo especifico es notoria en los primeros días de lixiviación

6.1.2.3 Tiempo de lixiviación

Queda determinado por la extracción que se desea alcanzar y la cinética de reacción, donde se observa que los primeros efluentes de PLS tienen mayor concentración de cobre y a medida que transcurre el tiempo esta va disminuyendo. La velocidad del proceso de lixiviación es inicialmente alta dado que el reactivo ataca directamente a las especies de cobre presentes en la superficie de la partícula. Con el paso del tiempo la velocidad de la reacción decae porque la superficie de reacción está cada vez más alejada de la superficie de la partícula y los reactivos y productos tardan más tiempo en desplazarse a interior de la partícula. La siguiente Figura 64 describe el proceso:

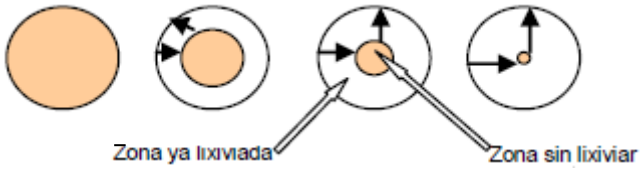

Figura 64. Mecanismo que da origen a la lixiviación

6.1.2.4 Concentración y dosificación de ácido sulfúrico

Otorga la capacidad de carga a la solución lixiviante, a mayor concentración de ácido sulfúrico, aumenta la disolución del sulfato de cobre y se sulfata el cobre remanente debido al aumento del pH. La solución dosificada se va consumiendo a medida que el ácido reacciona con la ganga como con los restos de cobres que no reaccionaron en el curado, aumentando el pH y probablemente provocando la precipitación de sales. La dosificación queda determinada por la combinación optima del flujo y concentración de ácido de la solución. El consumo de reactivo lixiviante está en función de la cantidad de especies que reaccionan con él y de la velocidad con la que lo hacen. Si un mineral de ganga reacciona más rápido que los minerales de cobre y, además se encuentra en mayor cantidad, entonces éste limita la lixiviación del cobre.

6.1.2.5 Sistema de drenaje y colección

Está compuesto por una serie de subsistemas cuya función es drenar la solución lixiviada de la pila y conducirla hasta las piscinas donde continuaran los procesos. El drenaje se lleva a cabo por tuberías corrugadas ranuradas o perforadas, cuya función es controlar el nivel freático al drenar la solución de lixiviación y conducirla a tuberías colectoras. Dentro de las tuberías colectoras existen las de interior o exterior. El sistema de colección interior está compuesto por tuberías corrugadas emplazadas en canales bajo la pila, para colectar y conducir las soluciones drenadas hasta el sistema de colección exterior. El sistema de colección exterior está compuesto por tuberías de HDPE lisas emplazadas en el contorno aguas abajo de la pila, conduciendo de forma gravitacional las soluciones desde la pila hacia las piscinas.

En conclusión, para decidir qué tipo de pila se utilizará va a depender de las condiciones del mineral a lixiviar, una evaluación económica y de disponibilidad de superficie. Se recomienda utilizar pilas permanentes cuando: El mineral es de muy baja ley, la cinética de lixiviación es lenta, los minerales son de baja recuperación, se necesita abaratar costos operacionales y se tiene pilas altas. En cambio, las pilas dinámicas se recomienda utilizarlas cuando: se tiene una alta recuperación de mineral (especialmente óxidos), la cinética de lixiviación es rápida, el mineral es de alta ley y las alturas de pila son bajas.

6.1.3 Lixiviación en tanques

La lixiviación en tanques conocida también como “vat leaching” (lixiviación en bateas) o “lixiviación por percolación”, consiste en inundar con soluciones lixiviantes una estructura de hormigón protegida interiormente con asfalto antiácido o resina epóxica que tiene un fondo filtrante, que se llena hasta el tope con mineral que presenta cinética de disolución rápida. Aprovechando el fondo filtrante se recirculan las soluciones en sentido ascendente o descendentes para pasar al siguiente tanque, las sucesivas recirculaciones permiten subir el contenido de cobre en las PLS.

El ciclo de lixiviación es normalmente corto entre 6 a 12 días. Se cuenta con 10 a 12 tanques en línea, lo que permite usar un solo puente móvil para cargar mediante cintas transportadoras y un carro repartidor. La descarga de los ripios finales es semejante mediante una grúa almeja que llena los camiones tolva o un sistema de correa.

La Figura 65 presenta un esquema tipico de la lixiviacion en tanques, donde se muestran todas sus componentes. Cabe destacar que este tipo de lixiviacion tiene un acotado campo de uso, ya que pocos minerales tienen alta cinetica de reaccion y su costo de inversion es muy alto.

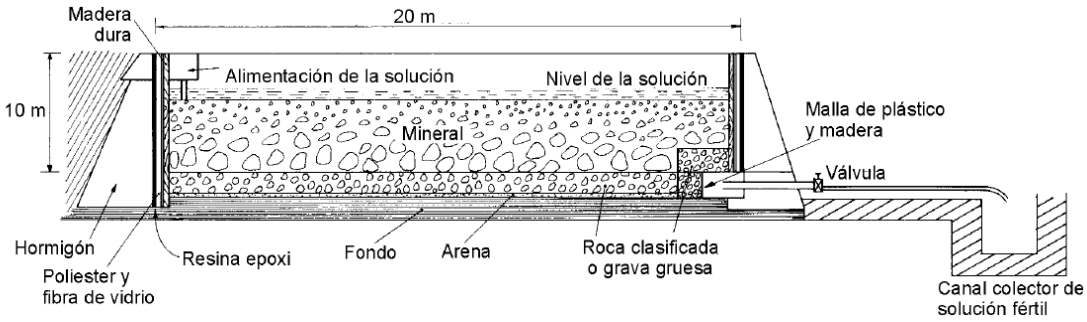

Figura 65. Corte transversal de un tanque de lixiviación de minerales (E. Domic 2001)

6.1.4 Lixiviación por agitación

Se aplica a minerales finamente molidos de leyes más bien altas, por lo que pasan por una molienda húmeda y se logra recuperar más en un menor tiempo de proceso. Este método tratando de formar una suspensión homogénea, logra dispersar los sólidos en una emulsión y dispersar las burbujas del gas en la solución, lo que aumenta el área expuesta al lixiviante y permite disminuir el espesor de la capa límite al mismo tiempo que se maximiza el área de la interfaz gas-liquido. La agitación puede realizarse por medios mecánicos o bien con aire (burbujeo).

Los agitadores mecánicos poseen dentro de su interior un impulsor o motor mecánico ubicado en el fondo del tanque que rota a través de un eje vertical, este eje descansa en una estructura sobre el tanque, puede ser de madera o de acero, pero debe ser revestido con materiales inertes que protejan de la corrosión. Los agitadores neumáticos se utilizan para oro, uranio y otros procesos que requieran oxígeno, se realiza en estanques cilíndricos de fondo cónico donde se le inyecta aire a presión continua o intermitentemente. Luego de la agitación la solución cargada, se decanta, filtra y se transporta al circuito de precipitación, donde la solución agotada es reintroducida al proceso para su reutilización.

Cuando se exceden las condiciones de temperatura y/o presiones ambientales el tanque de agitación se conoce como “autoclave”. Son reactores caros en inversión y operación, normalmente están conformados por varios compartimientos cada uno con agitadores, donde la pulpa se inyecta presurizada junto con vapor para proporcionar temperatura hasta que las mismas reacciones exotérmicas logren mantener el calor de sistema, por lo que se utilizan serpentines para enfriar. Estos contenedores son usados para tratamiento de concentrados más refractarios que exceden las temperaturas y presiones ambientales manteniendo el requisito de desarrollar la reacción en un medio acuoso.

Sus ventajas son la mayor recuperación y menor tiempo, el cual pasa de días lixiviando a solo horas. Además, es posible su automatización lo que asegura un proceso en el cual se pueden controlar los factores de manera precisa, con esto se puede acelerar la cinética mediante los siguientes factores: velocidad de la agitación, temperaturas que pueden llegar a 250[°C] superando la ebullición y trabajando a presión mayor que la atmosférica, presión de los gases desde vacío hasta más de 5.000[kPa], uso de reactivos exóticos y oxidantes altamente agresivos. Las desventajas de este método es la alta inversión que se debe hacer para el sistema de tanques y los altos costos operacionales del proceso.

En la Figura 66 se presentan los equipos que utiliza este tipo de lixiviación.

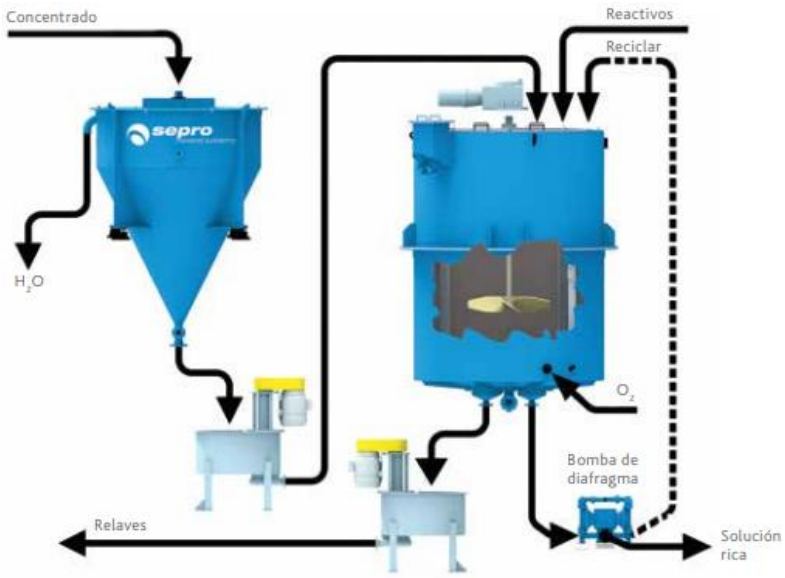

Figura 66. A la izquierda un agitador neumático y a la derecha un agitador mecánico (Sepro mineral systems)

Hay que destacar que existen más técnicas además de las convencionales para lixiviar mineral, estas son la lixiviación in situ y la biolixiviación.

6.1.5 Lixiviación in situ

A diferencia de las técnicas convencionales la lixiviación in situ no extrae el material para su tratamiento, el elemento de interés es disuelto desde la matriz rocosa y extraído en forma líquida. Mediante la inyección de solución lixiviante hasta la zona mineralizada, esta fluye a través de fisuras y poros interconectados, se logra disolver el mineral de interés obteniendo PLS que se recupera mediante bombeo de pozos para su conducción a la planta de procesamiento (Figura 67).

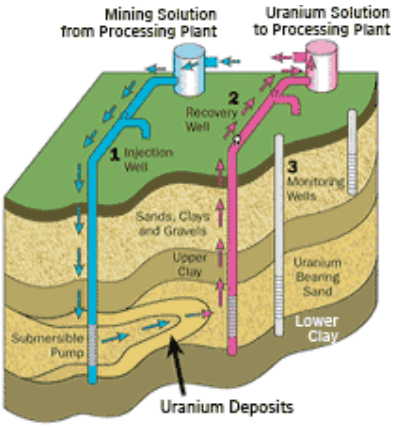

Figura 67. Proceso de recuperación in situ (Nuclear Regulatory Commission)

Este método puede ser utilizado en zonas donde el mineral ya se encuentra fragmentado por la minería (lixiviación in place) o en depósitos sin perturbación geológica alguna. En el caso de utilizar zonas donde el mineral esta perturbado puede presentar mayor permeabilidad y mejor acceso al depósito. Este método de lixiviación permite extraer desde minerales de baja ley en lugares aislados o a una profundidad donde la minería no resulta rentable. No genera residuos en superficie como pilas o botaderos de ripios y elimina otros problemas como ruidos o polvos, ya que no requiere procesos

anteriores como chancado ni aglomerado ni tampoco carga y transporte de material resulta más económico.

El problema de este método se encuentra el manejo de grandes volúmenes de solución lixiviante y posibles fugas de estas, escaso o ningún control de factores que intervienen en el proceso de lixiviación, ocurrencia de reacciones inesperadas con la ganga y que la solución pueda alterar la permeabilidad del mineral disminuyendo el contacto para la reacción. Hay que considerar que hacer este tipo de proceso es una constante preocupación en lo ambiental ya que se puede contaminar las aguas subterráneas si no se confina bien la solución lixiviante y la PLS.

6.1.6 Biolixiviación

Este tipo de lixiviación, también conocida como lixiviación bacteriana, es un proceso natural de disolución ejecutado por bacterias que oxidan minerales sulfurados permitiendo la liberación de los distintos metales contenidos en ellos. Por mucho tiempo se pensó que la disolución de metales era un proceso químico, liderado por agua y oxígeno. Pero el descubrimiento de bacterias acidófilas, ferro y sulfo oxidantes demostró que la lixiviación puede ser un proceso catalizado biológicamente (Figura 68).

Para este proceso se utilizan dos bacterias, la primera llamada "*Thiobacillus ferrooxidans*" vive en depósitos de pirita metabolizando hierro y azufre lo que produce ácido sulfúrico (solución lixiviante). La segunda bacteria "*Thiobacillus thiooxidans*" consume azufre y produce ácido sulfúrico, fue descubierta debido a daños en cañerías de cloacas. Estos microorganismos menores de 1[mm] de longitud son quimiolitotrofos, esto quiere decir que obtienen su energía gracias a la oxidación de compuestos orgánicos.

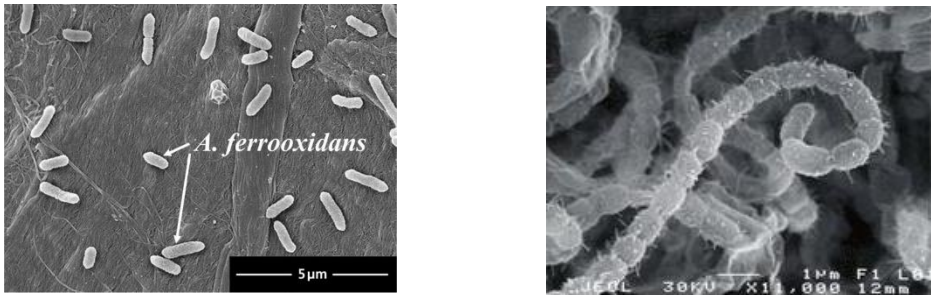

Figura 68. A la izquierda "Thiobacillus ferrooxidans" y a la derecha "Thiobacillus thiooxidans".

En términos generales, se puede decir que la biolixiviación es una tecnología que emplea bacterias específicas para extraer un metal de valor, como uranio, cobre, zinc, níquel o cobalto, presente en las mineras o en un concentrado mineral. El producto final de la biolixiviación es una solución ácida que contiene metal en su forma soluble.

Existen dos tipos de biolixiviación la directa e indirecta.

6.1.6.1 Biolixiviación indirecta

Se realiza con sulfato de hierro (III) $Fe_2(SO_4)_3$ en ausencia de oxígeno es responsable de la disolución de varios minerales sulfurados de importancia económica. Dentro de este mecanismo son importantes dos reacciones dadas por la bacteria más utilizada en Chile "*Thiobacillus ferrooxidans*". El azufre generado puede ser convertido en ácido sulfúrico por esta bacteria (mantiene pH favorable para desarrollo de la bacteria).

6.1.6.2 Biolixiviación directa

Las bacterias también pueden lixiviar sulfuros metálicos directamente, sin la participación del sulfato férrico. Muchos sulfuros metálicos pueden ser atacados por bacterias produciendo sulfatos solubles, se ocupan como pre tratamiento para sulfuros refractarios de oro y metales del grupo del platino.

La pirita es un sulfuro asociado a muchos metales (cobre, plomo, zinc, arsénico, plata, oro, etc.) su oxidación da formación a sulfato férrico y ácido sulfúrico. La lixiviación bacteriana se utiliza para romper la matriz del sulfuro en la que se encuentra la partícula aurífera, resultando un pretratamiento previo a la disolución directa del material.

El cobre se disuelve transformándose en sulfato de cobre ($CuSO_4$). El sulfuro más difícil de oxidar es la calcopirita($CuFeS_2$), pero bajo la influencia de los *T. ferrooxidans* la velocidad de oxidación aumenta hasta 12 veces más que el proceso químico. Los sulfuros secundarios (novelita, bornita, cobre-calcocita, entre otros) son oxidados de mejor manera bajo el efecto de bacterias.

Dado que el hierro siempre está presente en ambientes de Biolixiviación natural, es posible que tanto la Biolixiviación indirecta como la directa ocurran de manera simultánea (Figura 69). A través de la hidrometalurgia, se puede realizar la recuperación de los metales presentes en las soluciones, Existen muchos microorganismos con capacidad para realizar adsorción, reducción o precipitación de metales.

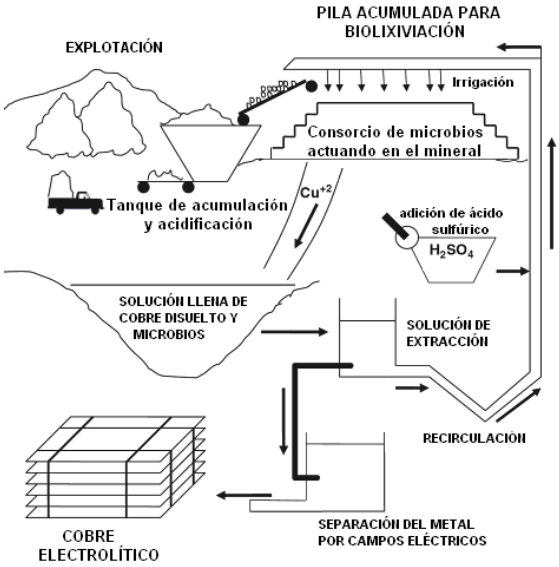

Figura 69. Proceso de biolixiviación aplicado a la obtención de cobre a partir del material original (Springer 2009)

7 Técnicas de medición de la SWRC en laboratorio

Para modelar un suelo parcialmente saturado la succión es un concepto fundamental que debe ser obtenido mediante la realización de ensayos de laboratorio. Se han desarrollado técnicas variadas para obtener este parámetro, cada una de estas metodologías tienen limitantes y deficiencias distintas. Los costos, rangos de aplicación y confiabilidad del ensayo, varían dependiendo de la metodología adoptada a su vez que la dificultad de cada método. Según la naturaleza de los métodos podemos categorizarlos en directos e indirectos ver Figura 70.

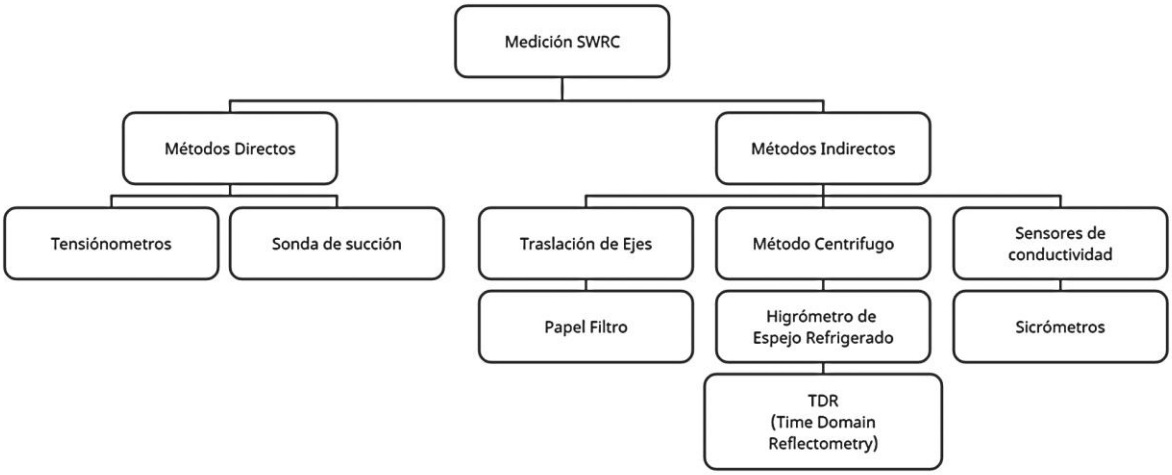

Figura 70. Mapa conceptual de métodos para obtener la succión en laboratorio

7.1 Métodos directos

Se entiende por método directo aquello que permiten medir el valor negativo de la presión de poro, por lo tanto, la succión matricial del suelo. Los instrumentos de medición directa realizan un intercambio de agua entre el suelo y el instrumento, la fuerza que produce este intercambio es la presión negativa del agua de los poros. El flujo de agua en un medio poroso saturado se produce desde un punto de mayor hasta un punto menor de presión de agua de poro, el flujo continua hasta que ambos puntos se encuentren a una presión igual de agua de por (Ridley & Burland, 1994). Estas mediciones se realizan in situ por lo que su duración depende de la succión del suelo, ya sea baja o alta presión de poro.

7.1.1 Tensiómetro

El tensiómetro (Figura 71) se utiliza para medir directamente la presión negativa del agua de poro del suelo. Se conforman por una copa porosa de cerámica de alta entrada de aire conectada con un tubo de diámetro pequeño al medidor de presión. El tubo y la copa se llena con agua sin aire, la copa se inserta en la perforación del suelo, debe existir contacto entre la copa porosa de cerámica y el suelo. El agua en el tensiómetro tendrá la misma presión negativa que el agua de poro en el suelo una vez que exista equilibrio entre el suelo y el sistema de medición. El límite de la presión del agua de poro que puede medir un tensiómetro es 100 [kPa] debido al problema de la cavitación, el uso de una copa de cerámica con un valor de entrada de aire más alto no aumentará el rango de medición del tensiómetro. Sin embargo, se han realizado mejoras en la técnica del tensiómetro para permitir que realice mediciones de succión matricial superiores a 100 [kPa].

La limitación es que el aire en el sensor dará como resultado mediciones malas o menos negativas de la presión del agua de poro, esto debido a que el agua se vaporiza cuando la presión del agua del suelo se acerca a la presión de vapor del agua a la temperatura ambiente. Se ocupan generalmente para la agronomía ya que el rango de succión que miden es relativamente bajo (0-200 [kPa]).

Figura 71. Tensiómetro (Fotografías y gráficas de QAMPO)

7.1.2 Sonda de succión

(Ridley & Burland, 1994) desarrollaron una sonda de succión (Figura 72) para medir la succión matricial del suelo. Se basa en el equilibrio entre la presión del agua intersticial en el suelo y la presión del agua intersticial en el compartimento de agua. Antes de que se alcance el equilibrio, el agua fluye desde el compartimento de agua hacia el suelo, o viceversa. Básicamente, una sonda de succión consiste en un transductor de presión con un disco cerámico de alta entrada de aire montado en la punta del transductor. El diafragma del transductor de presión responde a la presión aplicada. En la sonda de succión, se minimiza el volumen del depósito de agua debajo del disco de cerámica o la copa de cerámica. El agua en el depósito de agua está presurizada de manera que se pueda aprovechar el beneficio de la alta resistencia a la tracción del agua (Marinho & Chandler, 1993) y (Meilani et al., 2002) desarrollaron una mini sonda de succión para medir la succión matricial a lo largo de la altura de la muestra durante la prueba triaxial en un suelo parcialmente saturado. Tiene capacidad para realizar mediciones directas en una amplia gama de succiones de suelo (es decir, hasta 1500[kPa]) y se ha utilizado ampliamente en aplicaciones de laboratorio y de campo para una variedad de tipos de suelo. Las mediciones se pueden realizar en un pozo a profundidades entre 0 a 5[m] en muestras después de que se hayan recuperado del suelo.

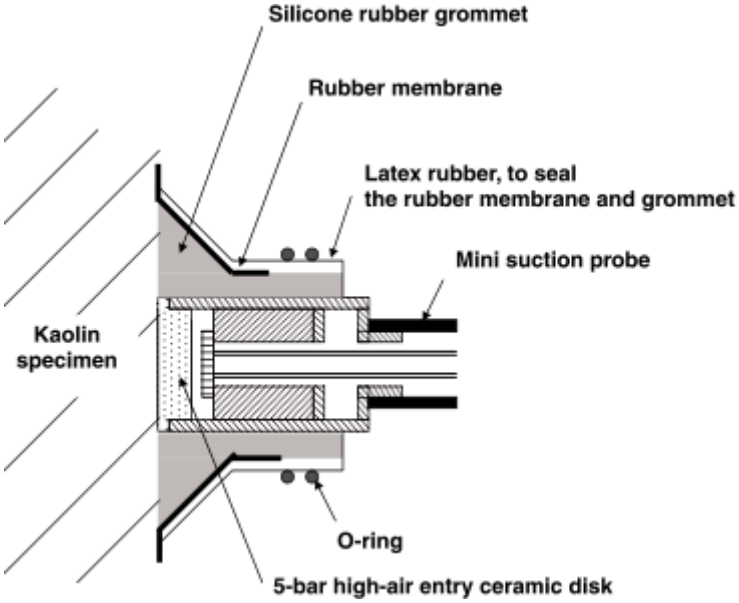

Figura 72. Mini sonda de succión para medir la succión matricial (D. Fredlund et. al 2002)

7.2 Métodos indirectos

A diferencia de la medición directa, las técnicas de medición de succión indirecta miden la condición de equilibrio de humedad del suelo en lugar de la succión. La medición indirecta de la succión matricial se realiza comúnmente usando un sensor poroso hecho de algún material especial(papel filtro, fibra de vidrio, yeso, nylon, vidrios sinterizado, cerámica de arcilla y metal). Se realiza equilibrando el sensor poroso con la succión matricial del suelo, por lo tanto, el contenido de agua del sensor poroso representa la magnitud de la succión matricial del suelo. La condición de equilibrio de humedad del suelo se puede determinar por medios primarios(la presión de vapor), medios secundarios(a través de otro medio poroso) o medios terciarios(midiendo otras propiedades físicas del medio poroso que indica su condición de equilibrio de humedad). Las técnicas de medición de succión indirecta que emplean medios primarios incluyen psicrómetros y el higrómetro de espejo refrigerado. Las técnicas de medición de succión indirecta que emplean medios secundarios incluyen el método de papel de filtro entre otros. Y las técnicas de medición de succión indirecta que emplean medios terciarios incluyen sensores de conductividad térmica y sensores de conductividad eléctrica. Todas estas técnicas se han utilizado ampliamente en la práctica de la ingeniería y en los laboratorios de investigación. Sin embargo, cada una de estas técnicas tiene sus propias limitaciones y capacidades.

Los métodos indirectos permiten medir la succión total, matricial y osmótica, por lo que según el parámetro que se desee determinar es la forma en que trabaja cada ensayo. En general, estos métodos requieren tiempos de equilibrio mayores a los de medición directa. Para la medición de la succión matricial, se emplean materiales porosos que actúan como sensores. Estos sensores porosos entran en equilibrio con la succión del suelo, por tanto, el contenido de agua que adquieran representa la magnitud de la succión matricial. Las técnicas que miden la succión osmótica basan su funcionamiento en la medición de la conductividad eléctrica del agua presente en los suelos, que se genera por el contenido de sales disueltas en ella. Finalmente, aquellos métodos que permiten determinar la succión total basan su ejecución en la determinación de diversos parámetros, tales como, punto de rocío, humedad relativa, temperatura y contenido de agua.

7.2.1 Reflectómetro (TDR)

El reflectómetro o reflectómetro de dominio de tiempo (TDR) ver Figura 73, fue sugerido por primera vez para medir el contenido volumétrico de agua de los suelos por (Topp et al., 1980). En la técnica TDR, se mide la constante dieléctrica aparente del suelo (es decir, la masa de agua del suelo), que está relacionada con el contenido volumétrico de agua del suelo. Desde entonces, el método ha sido utilizado por varios investigadores que involucran diversas disciplinas para un rango bastante grande de contenido de agua y succión que se encuentra en suelos arcillosos, el agua se retiene en los poros que se encuentran dentro de los grupos de arcilla (es decir, poros intragrupo). Por lo tanto, la reflectometría en el dominio del tiempo mide prácticamente la succión matricial. La reflectometría en el dominio del tiempo requiere una curva característica del suelo-agua del suelo analizado para relacionar el contenido volumétrico de agua medido con la succión matricial. La ventaja de la técnica es principalmente que se pueden realizar mediciones confiables del contenido volumétrico de agua en un corto período de tiempo (Benson & Bosscher, 1999). Sin embargo, la limitación es que la técnica requiere un dispositivo electrónico muy sofisticado y la precisión del TDR para medir la succión matricial depende de la determinación precisa del SWCC del suelo probado.

Figura 73. Reflectrometro marca Megger

7.2.2 Sensor de conductividad eléctrica (ECS)

El sensor de conductividad eléctrica consta de un bloque poroso y dos electrodos concéntricos incrustados dentro del bloque. El sensor de conductividad eléctrica mide la conductividad eléctrica del bloque poroso. A medida que aumenta el contenido de humedad del bloque poroso, disminuye la resistencia eléctrica del bloque. La resistencia eléctrica del bloque poroso puede estar relacionada con la succión matricial del bloque. Por lo general, el sensor de conductividad eléctrica se lee manualmente desde un medidor, lo que limita el número de lecturas cuando se usa en el campo (Skinner et al. 1997). Se descubrió que el yeso era el material de bloque poroso más adecuado, ya que el yeso tardaba menos en saturarse y respondía más rápido en las mediciones de succión matricial (Bouyoucos & Mick, 1941). Sin embargo, esto tiene el efecto involuntario de degradar el sensor de conductividad eléctrica ya que el yeso finalmente se disuelve completamente en la solución del suelo. Similar al sensor de conductividad térmica, el bloque de yeso del sensor de conductividad eléctrica también sufre histéresis. Se encontró que los tiempos de equilibrio de los sensores de conductividad eléctrica de yeso varían con la succión matricial que van desde 6[Hz] para una succión matricial de 50[kPa] a 50[Hz] para una succión matricial de 1500[kPa]. La sensibilidad del sensor de conductividad eléctrica se vuelve muy baja cuando la succión matricial supera los 300[kPa]. Además, la resistencia eléctrica del bloque poroso también depende de la concentración de sal de la solución del suelo y puede no ser una indicación directa del contenido de humedad del bloque poroso. Estas deficiencias habían llevado a una disminución del uso del sensor de conductividad eléctrica para la medición de succión matricial incluso en la industria agrícola (Skinner et al. 1997). Actualmente, la investigación sobre el sensor de conductividad eléctrica aún está en curso para superar sus limitaciones.

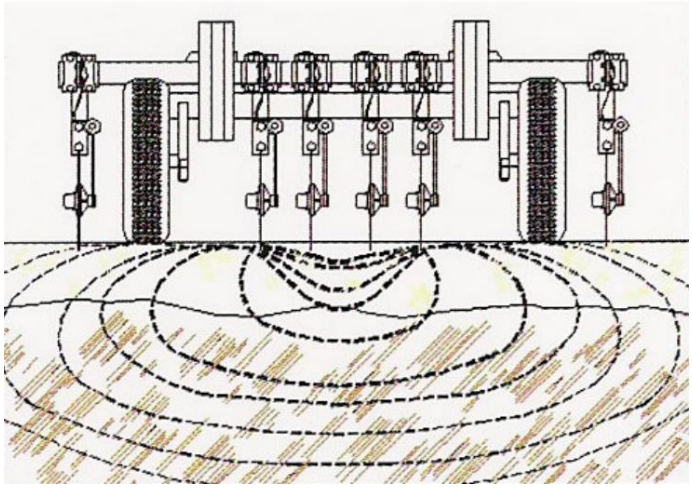

Figura 74. Un sistema de medicion a contacto de la electro conductivdad del suelo (LSUAgcenter 2011)

7.2.3 Sensor de conductividad térmica (TCS)

El sensor de conductividad térmica (TCS)(Figura 75) es un equipo propuesto por Shawand Baver (1939) para medir la succión matricial. Un sensor de conductividad térmica emplea un bloque poroso, típicamente cerámico, como medio para medir indirectamente la succión matricial. El principio básico es que, si existe un gradiente de succión matricial entre el suelo y el bloque poroso, el flujo de agua ocurrirá hasta que sus succiones sean iguales. La conductividad térmica del bloque consiste en la conductividad térmica del sólido y el fluido (aire y / o agua) que llena los vacíos en el bloque poroso. A medida que aumenta el contenido de humedad del bloque poroso, aumenta la conductividad térmica del bloque. El contenido de humedad del bloque se mide calentando el bloque poroso con un calentador incrustado en el centro del bloque poroso y midiendo el aumento de temperatura durante el calentamiento. El aumento de temperatura que está relacionado con la conductividad térmica del medio poroso y el contenido de humedad se puede utilizar entonces como un índice de succión matricial en el suelo. El tiempo para equilibrar depende del gradiente de temperatura y la conductividad hidráulica del medio poroso y el suelo circundante.

El atractivo del sensor de succión del suelo de conductividad térmica radica principalmente en su capacidad para producir una medición razonablemente confiable de la succión del suelo a lo largo de un período de tiempo, un rango relativamente amplio de succiones y las mediciones esencialmente no se ven afectadas por el contenido de sal del suelo (R. K. C. Lee & Fredlund, 1984) y (Delwyn G. Fredlund & Wong, 1989). Otra ventaja de los sensores de conductividad térmica es su versatilidad y capacidad para conectarse a un sistema de adquisición de datos para monitoreo continuo y remoto. Ha habido numerosas deficiencias y dificultades experimentadas con versiones desarrolladas previamente de sensores de succión de conductividad térmica. Estas dificultades y deficiencias pueden identificarse como: baja resistencia y poca durabilidad de la punta de cerámica, insensibilidad e inexactitud, particularmente en el rango más alto de succiones, y poca estabilidad de la señal electrónica. Hoy en día, el sensor de conductividad térmica muestra un comportamiento histerético al secarse y mojarse. Además, el principal problema del sensor de conductividad térmica es la uniformidad variable del bloque poroso de sensor a sensor. Esto significa que se requiere una curva de calibración separada para cada sensor de conductividad térmica.

Figura 75. TCR24 - Sistema de adquisición de datos para la conductividad térmica del suelo.

7.2.4 Psicrómetros

Los sicrómetros son dispositivos que se usan para medir la succión total de un suelo. Hay dos tipos principales de psicrómetros: psicrómetro de termopar (thermocouple psychrometers)(Figura 76) y psicrómetro de bucle húmedo o transistor(Figura 77).

7.2.4.1 Psicrómetro de termopar (thermocouple psychrometers)

El psicrómetro de termopar fue introducido por Spanner (1951). El dispositivo utiliza efectos Peltier y Seebeck. El efecto Peltier es una caída de temperatura inducida por una corriente eléctrica que pasa a través de una unión hecha de dos cables metálicos diferentes, que es una función de la humedad relativa del espacio de vapor donde se realiza la medición. Se mide la humedad relativa en la fase de aire de los poros del suelo. La humedad relativa obtenida de la medición se puede expresar en términos de presión de vapor relativa, la cual está relacionada con la succión total.

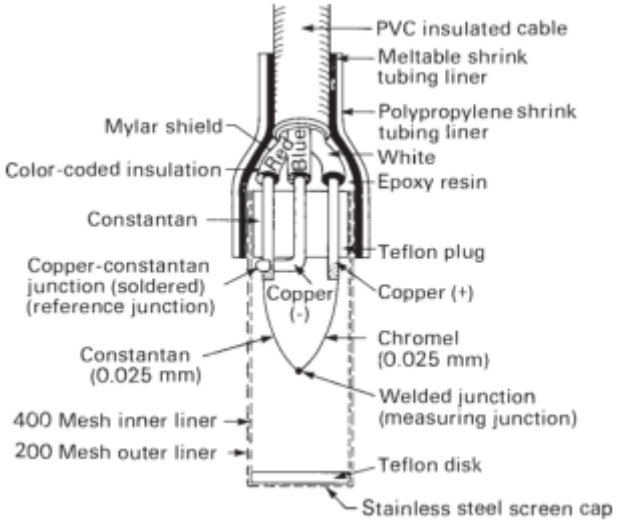

Figura 76. Psicrómetro de termopar Peltier de unión única enjaulado con pantalla (según Brown y Collins, 1980).

7.2.4.2 Psicrómetro de bucle húmedo

El psicrómetro de bucle húmedo o psicrómetro de transistores consta de un recipiente aislado térmicamente que contiene las sondas del psicrómetro y un registrador de datos para medir y registrar la salida. El psicrómetro de transistores es un termómetro electrónico de bulbo húmedo y seco en el que se utiliza una sonda de transistor húmedo y seco en lugar de bulbos de termómetro húmedo y seco como en los psicrómetros de termistor. La evaporación tiene lugar cuando ambos bulbos están expuestos al espacio de vapor en el suelo, lo que da como resultado la generación de una fuerza electromotriz. La depresión de temperatura del transistor húmedo, que contiene una gota de agua de tamaño estándar, se mide con los sensores de la sonda. Los transistores húmedos y secos se emplean como sensores de calor y la salida de voltaje de la sonda se usa para inferir la succión total.

El rendimiento que permite medir este dispositivo es un rango amplio de succión total, desde aproximadamente 100[kPa] hasta aproximadamente 10000[kPa]. Hay muchos aspectos positivos, pero pocos aspectos negativos asociados con la precisión de los psicrómetros para medir la succión total. En primer lugar, la variabilidad en la fuerza electromotriz generada induce un error en un rango de succión alto. Además, puede existir la posibilidad de que se deteriore la sensibilidad del psicrómetro debido a un problema de corrosión (Hamilton et al., 1981). A diferencia de otros métodos, recientemente no se han encontrado informes de histéresis de la técnica del psicrómetro para la medición de la succión total.

Figura 77. Psicómetro que indica y almacena datos de temperatura de bulbo húmedo, punto de roció y HRA

7.2.5 ASTM D6836-16

Según la norma (ASTM D6836-16, 2016) "Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using a Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, and/or Centrifuge" donde se describen varios métodos indirectos, podemos encontrar el método de la columna colgante, que posee un pequeño rango de medición, entregando solo el inicio de la curva de desaturación. También se encuentran los métodos de extractores por presión, que utilizan el método de traslación de ejes el cual será detallado posteriormente, pero es utilizado entre los 0 a 1500[kPa]. Además, detalla el método centrifugo que usualmente se usa para suelos más gruesos donde se puede extraer una cantidad apreciable de agua con succiones de hasta 120[kPa]. También hace alusión del higrómetro de espejo frio.

7.2.5.1 Higrómetro de espejo frio

El higrómetro de espejo frío (Figura 78) utiliza una medición del punto de rocío para determinar la succión total en un suelo. La medición se realiza en condiciones isotérmicas en un recipiente sellado. El higrómetro de espejo frío se introdujo por primera vez para medir la humedad relativa de productos alimenticios y productos farmacéuticos. En aplicaciones de ingeniería geotécnica, (*Gee et al., 1992*) introdujeron la técnica del espejo frío que se puede utilizar para medir la succión total en el rango de 500 a 300000[kPa]. Esto permitió la medición de la succión total en el rango de succión media a alta. El dispositivo consta de una cámara sellada con un ventilador, un espejo, una celda fotoeléctrica y un termómetro infrarrojo. Se coloca una muestra de suelo en un recipiente de acero inoxidable o plástico. Luego, la muestra se traslada a la cámara en una bandeja. La cámara se cierra y la muestra de suelo se equilibra termodinámicamente con el entorno de la cámara. Un ventilador acelera el proceso de equilibrado. Se utiliza un sistema de enfriamiento para reducir la temperatura en la superficie del espejo a la temperatura del punto de rocío. Una célula fotoeléctrica detecta la primera señal de condensación en el espejo, señal que anuncia el punto de rocío. La temperatura del punto de rocío se mide con un termopar. Se utiliza un termómetro infrarrojo para medir la temperatura de la cámara, que se supone que es la misma que la temperatura de la muestra de suelo. La presión de vapor sobre la muestra de suelo en la cámara y la presión de vapor saturado a la misma temperatura se calculan utilizando el punto de rocío y las temperaturas de la muestra, respectivamente. Luego, se usa la ecuación de Kelvin para calcular la succión total de la muestra de suelo. Las muestras de suelo y el dispositivo se mantuvieron en el mismo lugar durante al menos varias horas para lograr un equilibrio de temperatura antes de la prueba.

Figura 78. WP4C higrómetro de espejo frio(Morphola)

La técnica del espejo frío ofrece una caracterización fundamental de la humedad en términos de la temperatura a la que se condensa el vapor. El control de la temperatura es muy importante. La diferencia medida entre el punto de rocío y las temperaturas de la muestra debe mantenerse pequeña. (Leong et al., 2003) informaron que la técnica podría usarse para cuantificar la succión total tan baja como aproximadamente 150[kPa]. El valor se considera pequeño en el caso de una medición de succión total baja donde se puede esperar un error mucho mayor. Al considerar el error de la medición de la succión total y la forma en que se mantiene el equilibrio isotérmico entre la muestra y el espacio de vapor, se considera que la técnica es el medio más preciso para medir la succión total.

7.2.5.2 Método traslación de ejes

El método de traslación de ejes se refiere a elevar la presión del aire de poro mientras se mantiene la presión del agua de poro en un valor de referencia a través de los poros de un material de High Air Entry (Entrada de aire alta) saturado, lo que permite un control directo de la succión matricial. Para la denominada medición nula de la succión matricial utilizando una configuración de este tipo, la presión del aire se eleva y no se permite el flujo de agua entre el suelo y el disco cerámico. La succión matricial se registra como la diferencia entre la presión de aire aplicada y la presión de agua intersticial en equilibrio. Para una prueba de extracción de agua de poros, se aumenta la presión del aire y se permite que el drenaje de la muestra se produzca a través de los poros de HAE. El drenaje continúa hasta que el contenido de agua de la muestra alcanza un equilibrio con la succión matricial aplicada, que se registra como la diferencia entre la presión del agua en un lado del disco, típicamente atmosférica, y la presión del aire de los poros en el otro lado del disco. Se pueden aplicar varios incrementos de presión de aire para generar varios puntos a lo largo del circuito de secado de la curva característica suelo-agua. En la práctica, se utilizan comúnmente dos tipos básicos de sistemas de extracción: sistemas de placas de presión y sistemas de células Tempe. Las placas de presión son aplicables para succión matricial en un rango de aproximadamente 0 a 1,500[kPa]. Las celdas de temperatura son aplicables desde aproximadamente 0 a 100[kPa].

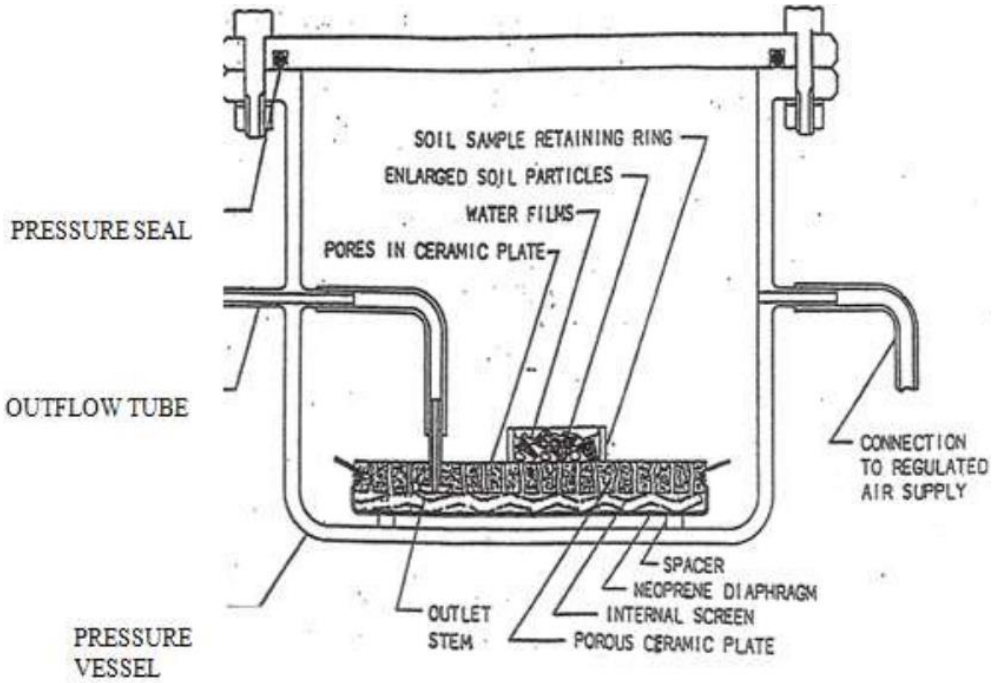

Figura 79. Vista de sección transversal de plato cerámico en cámara de presión para la curva de retención (Pa.Suriya 2015)

La Figura 79 muestra un esquema de una configuración típica de prueba de extracción de agua intersticial utilizando un aparato de placa de presión. Los componentes principales del sistema son un recipiente a presión de acero y una placa de cerámica HAE saturada o una membrana de celulosa. Las placas de cerámica se designan por la presión de entrada de aire y generalmente están disponibles en forma de 1, 3, 5 o 15[bar]. Las membranas de celulosa están generalmente disponibles en forma de 15 o 100[bar]. Como se muestra, se forma un pequeño depósito de agua debajo de la placa o membrana utilizando una pantalla interna y un diafragma de goma. El depósito de agua se ventila a la atmósfera a través de un tubo de salida, lo que permite que la presión del aire en el recipiente y la presión del agua en el depósito se separen a través de las interfaces aire-agua, uniendo los poros saturados del material HAE. Se colocan varias muestras de suelo sobre la placa de HAE de manera que el agua de los poros esté en equilibrio con el depósito de agua a presión atmosférica. Para analizar muestras remodeladas, se deben preparar muestras "idénticas" (por ejemplo, la misma densidad seca y contenido de agua de moldeo) para tener en cuenta la sensibilidad de la retención de agua de los poros a la tela del suelo. Las muestras se saturan inicialmente, normalmente aplicando un vacío parcial a la cámara de aire y permitiendo que las muestras absorban agua del depósito subyacente a través del disco de cerámica. A continuación, se aumenta la presión del aire en el recipiente hasta el nivel deseado mientras se deja que el agua de los poros drene de las muestras en busca del equilibrio. Se monitorea la salida de agua hasta que cesa, se abre el recipiente a presión y se mide el contenido de agua de una o más de las muestras, generando así un punto en la curva característica suelo-agua. Los incrementos posteriores en la presión del aire se aplican para generar puntos adicionales en la curva utilizando las otras muestras. En general, la técnica de la placa de presión es aplicable para suelos de grano relativamente grueso donde la curva característica está bien definida en un rango de succión menor a 1500[kPa], que corresponde al valor de entrada de aire más grande para la mayoría de las cerámicas aplicables. Surgen incertidumbres en las muestras de ensayo tanto cerca de la condición saturada como de la condición seca debido a las incertidumbres en la continuidad de las fases de aire de poro y agua de poro, respectivamente. (Bocking & Fredlund, 1979) proporcionan un análisis detallado de las limitaciones del método.

7.2.6 ASTM D5298-16, Método del papel filtro

Para finalizar los ensayos de laboratorio se encuentra el método del papel filtro, este método será utilizado para caracterizar los ripios de lixiviación, siendo el ensayo principal de este estudio. Entre todos los métodos de medición de la succión conocidos, la técnica del papel filtro es el único método del que se puede inferir tanto la succión total como la matricial. Usando el método del papel filtro, la muestra de suelo y el papel filtro se llevan al equilibrio de humedad ya sea en contacto (succión matricial) o no en contacto directo (succión total) en un ambiente de temperatura constante (Figura 80).

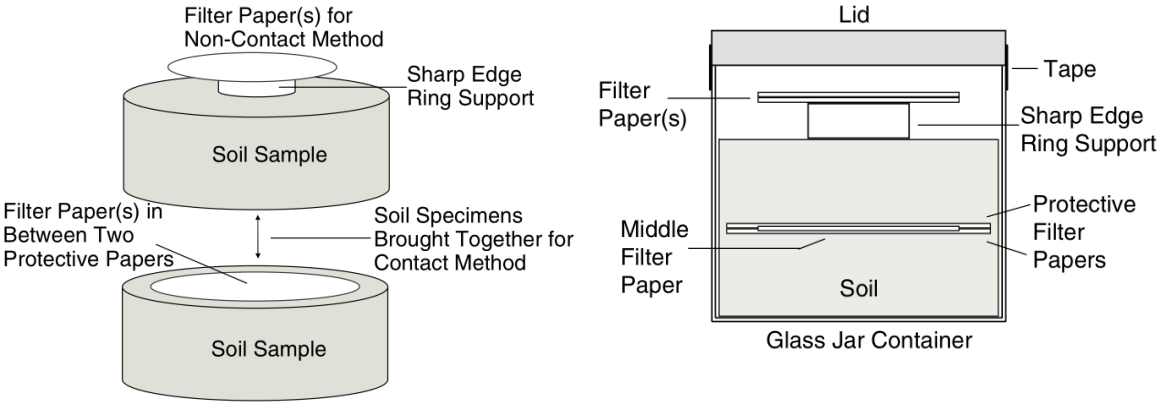

Figura 80. Dibujo esquematico de la medicion de la succion total y matricial mediante el metodo de papel filtro (Bulut y Leong 2008)

La técnica del papel filtro fue establecida para medir la succión del suelo por científicos y agrónomos (Collis-George, 1967; DEKA et al., 1995; Gardner, 1937). En los campos de la ingeniería geotécnica, muchos investigadores también han utilizado la técnica como método de rutina para la medición de la succión (Chandler & Gutierrez, 1986; Houston et al., 1994; Leong et al., 2002). La técnica del papel filtro en contacto se utiliza para medir la succión matricial de suelos. El contacto directo entre el papel filtro y el suelo permite que el agua en la fase líquida y los solutos se intercambien libremente. El contenido de agua de un papel filtro inicialmente seco aumenta debido a un flujo de agua en forma líquida desde el suelo al papel filtro hasta que ambos se equilibran. Por lo tanto, debe establecerse un buen contacto entre el papel filtro y el suelo. Una vez establecido el equilibrio entre el papel filtro y el suelo, se mide el contenido de agua del papel filtro. Luego, usando la curva de calibración del papel filtro apropiada, la succión del suelo es estimada. El método del papel filtro en contacto se vuelve inexacto en un rango de succión matricial alto ya que el transporte de agua está dominado por el transporte de vapor (D. G. Fredlund et al., 1995). La curva de calibración para la medición de succión matricial de papel de filtro se establece comúnmente usando un aparato de placa de presión (Al-Khafaf & Hanks, 1974; Greacen et al., 1989; Hamblin, 1981) o contra presiones de succión conocidas de soluciones. La técnica del papel filtro exhibe histéresis. También es importante tener en cuenta que solo se deben usar papeles filtro sin cenizas en la técnica del papel filtro y solo se usan comúnmente los papeles filtro Whatman n°42 y Schleicher & Schuell 59 (o SS 59)(Leong et al., 2002). Se debe permitir que los papeles filtro se equilibren durante un tiempo suficiente y, por lo general, se considera satisfactorio 1 semana de período de equilibrio para la mayoría de las mediciones de succión del suelo. Por lo tanto, las limitaciones son que los tiempos de respuesta (7-14 días) pueden ser demasiado largos y el papel puede no hacer un buen contacto con el suelo.

El papel filtro cubre una amplia gama de medidas de succión. Para la técnica sin contacto, se suspende un papel filtro seco sobre una muestra de suelo en un recipiente sellado para el equilibrio del vapor de agua entre el papel filtro y la muestra de suelo a una temperatura constante. El espacio de vapor sobre la muestra de suelo actúa como una verdadera membrana semipermeable que solo es permeable al vapor de agua, pero no a los iones del agua de los poros. La separación entre el papel filtro y el suelo mediante una barrera de vapor limita el intercambio de agua a la fase de vapor únicamente y evita el movimiento de solutos. Por lo tanto, en esta técnica, se mide la succión total. Una vez alcanzada la condición de equilibrio, se retira el papel filtro y se determina el contenido de agua del papel filtro lo más rápidamente posible. Luego, utilizando la curva de calibración de papel de filtro adecuada, se estima la succión del suelo. Antes de las mediciones de succión total, los papeles filtro se calibran para determinar la relación entre el contenido de agua en equilibrio y la humedad relativa. La curva de calibración para la técnica de papel filtro sin contacto se establece utilizando la técnica de equilibrio de vapor (Chandler & Gutierrez, 1986; Collis-George, 1967; Gardner, 1937; Leong et al., 2002). Todavía existen muchas preocupaciones sobre la fiabilidad del método del papel filtro. El método del papel filtro es una técnica simple y económica y puede ser confiable si se comprenden los principios básicos del método y se sigue cuidadosamente un protocolo de laboratorio estrictamente practicado. Dado que la precisión de la técnica del papel filtro depende de la precisión del contenido de agua del papel filtro frente a la curva de calibración de succión, la técnica de calibración del método del papel filtro ha sido investigada por numerosos investigadores (Bulut et al., 2001; Houston et al., 1994; Leong et al., 2002). Las ecuaciones de calibración deben desarrollarse específicamente para el papel filtro específico que se esté utilizando. Los papeles de filtro más utilizados son Whatman n°42 y Schleicher & Schuell No. 589-WH. Tanto las técnicas de papel de filtro en contacto como sin contacto han sido estandarizadas en (ASTM D5298-16, 2016a). Si bien el método del papel filtro en contacto es inexacto en el rango de succión matricial alta, la sensibilidad de la técnica del papel filtro sin contacto disminuye con una succión total baja. La técnica del papel filtro sin contacto es insensible cuando se usa para medir succiones totales bajas debido a un posible desequilibrio de vapor y temperatura durante la medición. Generalmente, se pueden usar papeles filtro similares a los usados en la técnica del papel filtro en contacto en la técnica del papel filtro sin contacto. Las limitaciones son su largo tiempo de equilibrio y se necesita un protocolo estricto durante el experimento.

Tabla 5. Curvas de calibración para papel filtro Whatman n°42 (Modificado Bicalho et al).

Curvas de calibración				
Referencia	Succión[kPa]	Humedad [%]	m[log10kPa/%]	b[log10kPa]
ASTM D5298	Total y matricial	<45,3	-0,0779	5,327
		>45,3	-0,0135	2,412
Chandler y Gutiérrez	Matricial	-	-0,0622	2,85
Chandler et. al.	Matricial	<47	-0,0622	4,842
		>47	-2,48*log()	6,05
Oliveira y Marino	Total y matricial	<33	-0,0839	4,83
		>33	-0,0154	2,57
Leong et al.	Total	<26	-0,0879	5,31
		>26	-0,222	8,778
Leong et al.	Matricial	<47	-0,0673	4,945
		>47	-0,0229	2,909

Según (ASTM D5298-16, 2016a)“Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper” este método es simple y económico para medir la succión en un rango de 10 a 100000 [kPa]. Esta norma establece la utilización de papel filtro sin cenizas en un diámetro ideal de 5.5[cm], también especifica que los contenedores de la muestra deben ser de metal o vidrio de tamaño entre 120 a 240[mL] y provistos de recubrimientos para evitar de cualquier manera la oxidación del contenedor. Además, restringe de manera abrupta los cambios de temperatura al momento de calibrar y al buscar el equilibrio térmico. La norma presenta todo lo necesario para poder calibrar de manera precisa ya sea mediante cámara de presión o con soluciones salinas. Presenta todas las ecuaciones necesarias para poder obtener el contenido de humedad dentro del papel filtro y poder relacionarlo con la succión del suelo mediante la curva de calibración. La curva de calibración

Cabe destacar que este método esta normado para contenedores de tamaño pequeño por lo que suelos con granulometría fina podrán ser testeados con mayor facilidad ya que sus partículas se acomodaran de mejor manera al contenedor de la muestra, pero para granulometrías gruesas como gravas será muy difícil, hasta casi imposible utilizar estos contenedores debido a que las partículas se estorbaran o simplemente se fragmentaran debido a la compactación de la muestra, lo que cambiaría las propiedades del suelo drásticamente, también así su curva de retención de agua.

Ahora con respecto a lo anterior, esta investigación se basa en ripios de lixiviación y su granulometría está compuesta generalmente por arenas y limos (pueden ser gravas dependiendo del origen de la muestra) se utilizarán contenedores distintos, elaborados y adaptados en el LEMCO de la UTFSM para poder obtener de mejor manera la curva de retención de agua del ripio. Por lo que con esto concluye el marco teórico de esta investigación y procederemos al desarrollo de los métodos experimentales ya expuestos, describiendo de manera detallada el procedimiento y el equipamiento utilizado en los ensayos de laboratorio.

8 Método del papel filtro en UTFSM

El procedimiento detallado en la ASTM D5298 – 16 entrega la metodología requerida para obtener un punto de la curva característica del agua, por tanto, si lo que se requiere es tener una curva aproximada de la misma, se vuelve necesario establecer claramente los pasos a utilizar para lograr ensayar probetas a diferentes humedades. El desarrollo del ensayo debe estar claramente definido en cada uno de sus procesos, y no pueden quedar elementos al azar o a criterio de los laboratoristas, pues se pueden generar errores que alteren la validez del mismo.

8.1 Aparatos y materiales

Mediante el método indirecto del papel filtro con contacto se desarrollará la técnica para medir el contenido de humedad en el papel y mediante una curva de calibración se obtendrá la curva de retención de agua del ripio en estudio. Los requerimientos de la norma (ASTM D5298-16, 2016a) contemplan los siguientes materiales y equipos para llevar a cabo el ensayo, no obstante, debido a la naturaleza de los ripios de lixiviación, se utilizarán de contenedores tubos de PVC para moldear las muestras ya que no reaccionan con el pH ácido del suelo en observación.

- Cámara de equilibrio térmico de poliestireno.
- Papel filtro cuantitativo de tipo II sin cenizas, Whatman n°42 o equivalente.
- Film de alusa plástico y de aluminio.
- Pinzas.
- Contenedores inoxidables de 5,5 [cm] de diámetro y volumen entre 110-220 [cm^3].
- Guantes de látex.
- Horno de secado con control termostático (100 ± 5 [°C]).
- Termómetro de precisión 1 [°C].
- Balanza de alta precisión 0,0001[g].
- Contenedor metálico para medición de humedad de papeles filtro con tapa.

8.2 Ripios de lixiviación

Se utilizarán 2 muestras de ripios lixiviados provenientes de un botadero de la industria minera al norte del país, para llevar a cabo el ensayo del papel filtro. Por simplicidad los ripios estudiados se denominaron L1 y L2. Se presentan en la Figura 81 a continuación:

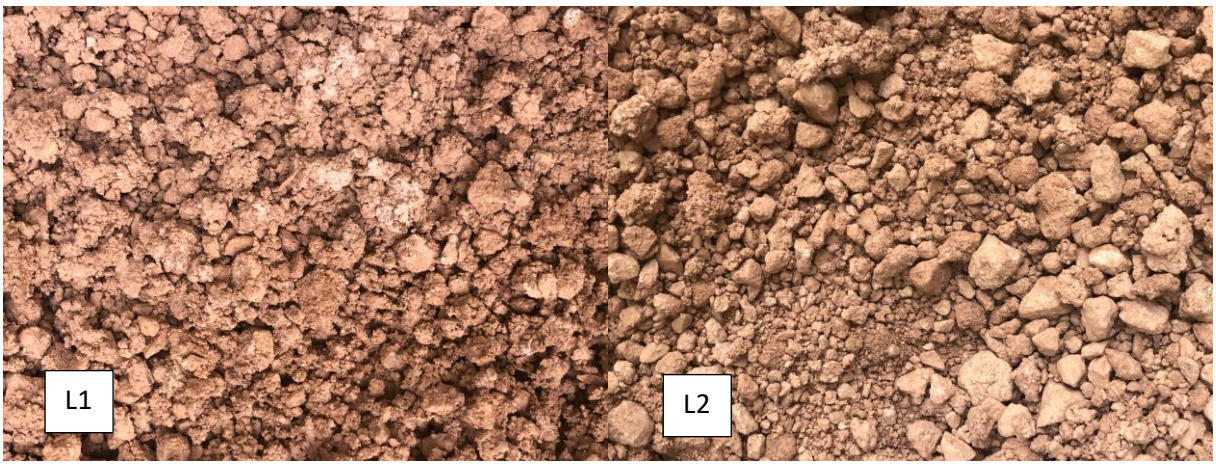

Figura 81. Ripios de lixiviación en estudio.

8.2.1 Caracterización geotécnica

Para la caracterización geotécnica de los ripios estudiados, se llevaron a cabo distintos ensayos especificados tanto en la norma chilena como en las normas internacionales ASTM. Los ensayos realizados son los siguientes:

- Gravedad específica (ASTM D 854 – NCh 1532 of. 1980)
- Granulometría por tamizado y sedimentación (8.102.1 MC-V8,2014)
- Límites de Atterberg (ASTM D 4318 – NCh 1517/1 Of. 79 – NCh 1517/2 Of. 79)
- Clasificación de Suelos (ASTM D 2487 – NCh 1886).

Para obtener la granulometría se realizó por tamizado hasta la malla #200 (0,07[mm]) y para bajo la malla #200 mediante sedimentación, a través del método del hidrómetro. A continuación, se presenta una Tabla 6 con todos los valores de la caracterización geotécnica y la curva granulométrica del material (Figura 82):

Tabla 6. Caracterización geotécnica de L1 y L2.

Ripio de Lixiviación	Gs	Clasificación USCS	LL%	LP%	IP%
L1	2,786	SC-SM	24	17	7
L2	2,869	SC	29	19	10

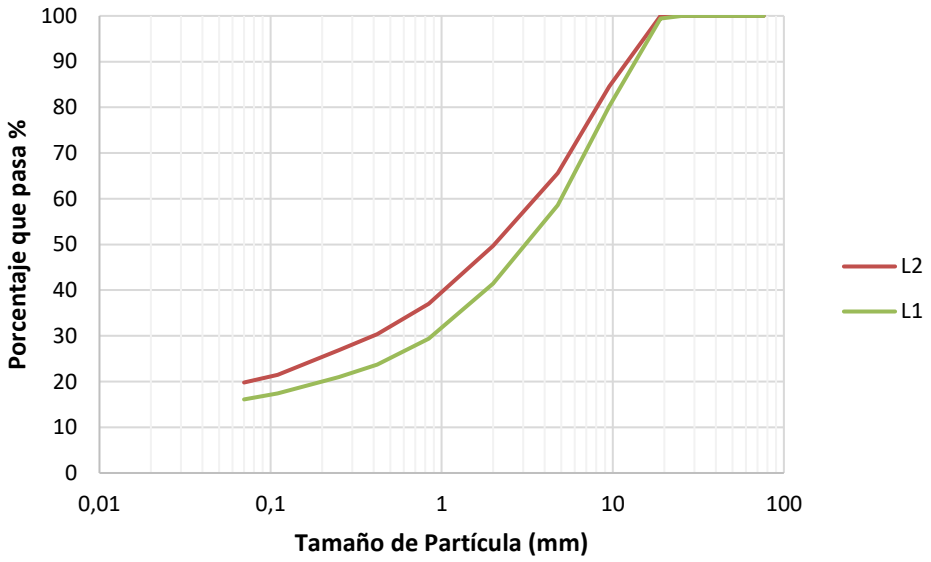

Figura 82. Curva granulométrica de L1 y L2

8.2.2 Límite de saturación w_s

En esta sección se presentan los límites del contenido gravimétrico de agua para los ripios de lixiviación a ser estudiados, esta es una característica fundamental ya que entrega la condición de mayor saturación de la muestra, lo que se traduce en al punto donde no existe succión por parte del agua al suelo, es decir el punto de inicio de la SWRC. Para los ripios en estudio este punto de succión cero en la SWRC se obtiene pesando las muestras totalmente saturadas, luego de saturar las muestras durante 24 horas una vez preparados de los moldes con la muestra a la densidad deseada para el análisis. Debido a que, al conformar las muestras de manera manual, existe variabilidad entre el mismo material, por lo que se presentara un promedio de todos moldes ocupados para la obtención de la SWRC por fecha, ya que se presentaran 3 SWRC por muestra. Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente Tabla 7.

Tabla 7. Límite de saturación para L1 y L2.

	Límite de saturación [%]		
Ripio de Lixiviación	08-sept	23-sept	08-oct
L1	20,05	21,92	18,63
L2	20,31	21,30	20,13

8.3 Preparación de la muestra

I. Se seca la muestra hasta que la masa este constante en horno a una temperatura de 100°C ± 3°C como se observa en la Figura 83 (Tiempo depende de la granulometría del material, pero se estima entre 18 a 24 horas).

Figura 83. Muestras totalmente secas. (Izq.) L1, (Der.) L2.

II. Se preparan los moldes donde se contendrán las muestras de suelo, se utiliza un tubo de PVC de diámetro 110[mm] donde en un extremo se añade un plato plástico con silicona caliente para sellar como se presenta en la Figura 84. Al plato se le hacen perforaciones pequeñas para que la muestra pueda saturar. Se toman mediciones de los pesos de los moldes para cálculos posteriores. Para obtener una buena aproximación de la SWRC se utilizarán 5 puntos, lo que con lleva realizar 10 moldes con muestra para obtener los 5 puntos necesarios. Idealmente preparar mientras la muestra se seca.

Figura 84. Molde de PVC para muestras de ripio.

III. Se deja enfriar la muestra por lo menos 30 minutos a temperatura ambiente o hasta que la temperatura del material no difiera 5°C con la temperatura ambiente.

IV. Luego se calcula el peso del material seco y se determina la cantidad de agua a verter para obtener la humedad gravimétrica deseada cercana al 7% para trabajar compactar la muestra de manera más sencilla. Se vierte agua a la paila con muestra y se revuelve de manera pausada y con cuidado para garantizar la homogeneidad de la muestra.

V. Se calcula la masa de muestra que rellenará cada molde, esto mediante la densidad final deseada de 1,8[kg/m3]. Se tienen las dimensiones del molde el cual tiene un radio de 5,264[cm] y se ocuparan 2 capas de muestra con altura de 2,1[cm] por lo que la masa total seca de la muestra es de 658[g] y el peso de la muestra humectada al 7% es de 704[g], ósea 2 capas de 352[g] cada una, verificando su altura de 2,1[cm] con un pie de metro dentro del molde.

VI. Se vierte la masa anteriormente calculada y se comienza la compactación. Se hace de manera manual con un pisón y combo de goma para no desintegrar las partículas del material, logrando llegar a la densidad de 1,8[kg/m3] por capa, como se muestra en la Figura 85.

Figura 85. Compactación por capas para muestra en molde de PVC.

VII. Con los moldes rellenos de muestra, se procede a la saturación de la muestra. Se depositan los moldes contenedores en una bandeja con agua hasta el nivel donde se encuentra la muestra en el molde, entonces por la parte inferior en las perforaciones, la muestra se comienza a saturar por ascensión capilar como se muestra en la Figura 86.

Figura 86. Moldes con muestras en proceso de saturación. (Izq.) L2 y (Der.) L1

VIII. Se deja saturar la muestra por lo menos 18 a 24 horas, esta recomendación puede variar dependiendo del contenido de fino que contenga la muestra.

IX. Con la muestra en el molde totalmente saturada, se toman los pesos de cada muestra y se calcula el contenido de humedad gravimétrica máxima que puede contener la muestra con la diferencia entre el peso de la muestra seca comparada con la muestra totalmente saturada.

X. Con estos valores de humedad gravimétrica se emparejan moldes con máximos similares y comienza el proceso de secado, para tomar las mediciones de distintos puntos de humedad en las muestras algunas se secarán más que otras para obtener todo el espectro de succiones que puede entregar este ensayo. Con esto finaliza la preparación de la muestra y comienza el método del papel filtro.

8.3.1 Resultados de preparación de la muestra

A continuación, se presenta la Tabla 8 con todos los parámetros relevantes a la hora de la preparación de los moldes con muestra (* Resultados en base a parámetros medidos en el LEMCO).

Tabla 8. Resumen de resultados de preparación de la muestra

Numero de Muestra	Ripio de lixiviación	Humedad		Densidad seca [g/cm3]*	Densidad húmeda [g/cm3]	Gravedad especifica Gs*	Índice de vacíos [-]*	Porosidad [-]*	Humedad de saturación [%]*
		Gravimétrica [%]*	Volumétrica [%]						
1	L1 8-9	7	12,6	1,8	1,925	2,786	0,548	0,354	20,05
2	L1 23-9	7	12,6	1,8	1,925	2,786	0,548	0,354	21,92
3	L1 8-10	7	12,6	1,8	1,925	2,786	0,548	0,354	18,63
4	L2 8-9	7	12,6	1,8	1,925	2,869	0,594	0,372	20,31
5	L2 23-9	7	12,6	1,8	1,925	2,869	0,594	0,372	21,3
6	L2 8-10	7	12,6	1,8	1,925	2,869	0,594	0,372	20,13

8.4 Procedimiento método papel filtro

I. Se introducen en el horno los papeles filtro con propósito de eliminar todo contenido de humedad que pudiesen tener (Figura 87).

Figura 87. Papel filtro Whatman n°42.

II. En el proceso de desaturación de la muestra, cuando los moldes emparejados estén en la humedad deseada para calcular el punto de succión, se acondiciona la muestra dentro del mismo molde, con un plato plástico de radio menor y un anillo de plástico de que hace presión sobre el plato y confina la muestra contra el plato que traía el molde como muestra la Figura 88. Para que la muestra no pueda moverse dentro del tubo de PVC, se sella mediante cinta de

embalaje en el extremo libre del tubo, para que el anillo no se mueva y además entrega hermetismo para mantener la humedad de la muestra.

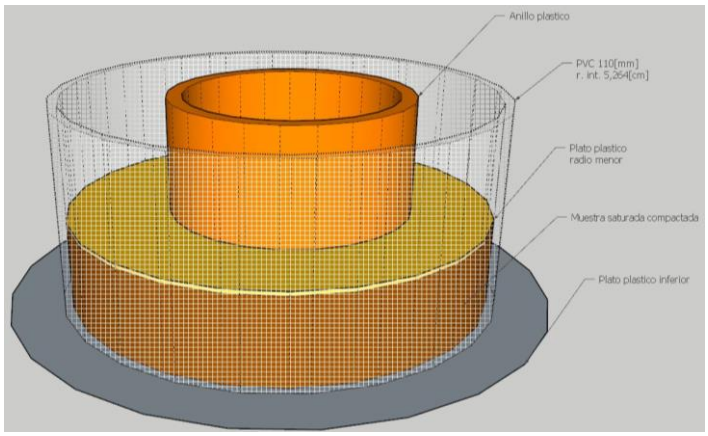

Figura 88. Esquema molde para ripios de lixiviación con PVC y plásticos.

III. Inmediatamente cuando los moldes emparejados lleguen a la humedad deseada para la obtención de un punto de la curva, se saca el plato del fondo de cada molde para unirlos donde la muestra queda expuesta. Entremedio de esta unión se ubica un emparedado de 3 papeles filtro, dos de diámetro 110[mm] y otro recortado por sus bordes en 10 ± 3[mm] por el borde para que no tenga contacto alguno con el suelo de la muestra, lo que podría arruinar la medición por el peso de las partículas que contaminan el papel filtro Figura 89.

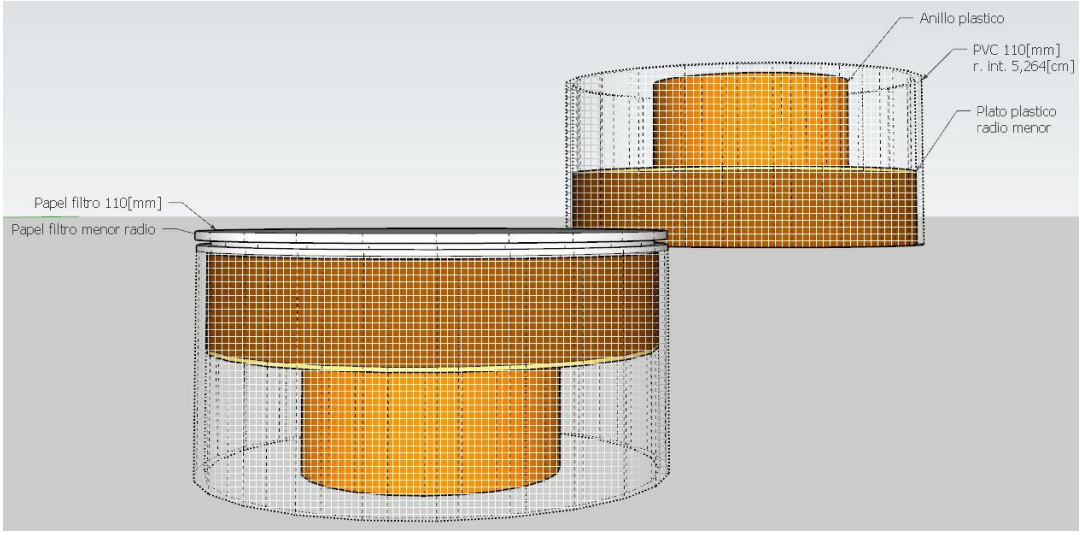

Figura 89. Esquema emparedado papel filtro entre moldes de muestra.

IV. Para luego colocar un molde encima de otro con el emparedado entre su unión, como se ilustra en la Figura 90.

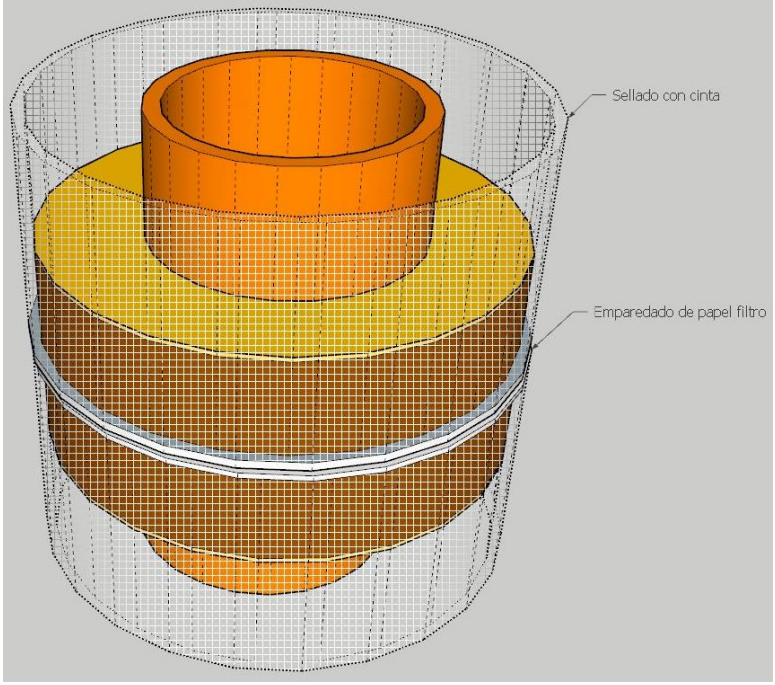

Figura 90. Probeta conformada por dos moldes con muestra y emparedado de papel filtro entre ambas muestras.

V. Al finalizar de colocar los papeles filtro, se sella la unión entre moldes lo más rápido posible con huincha aisladora (cinta eléctrica). Como se muestra en la Figura 91.

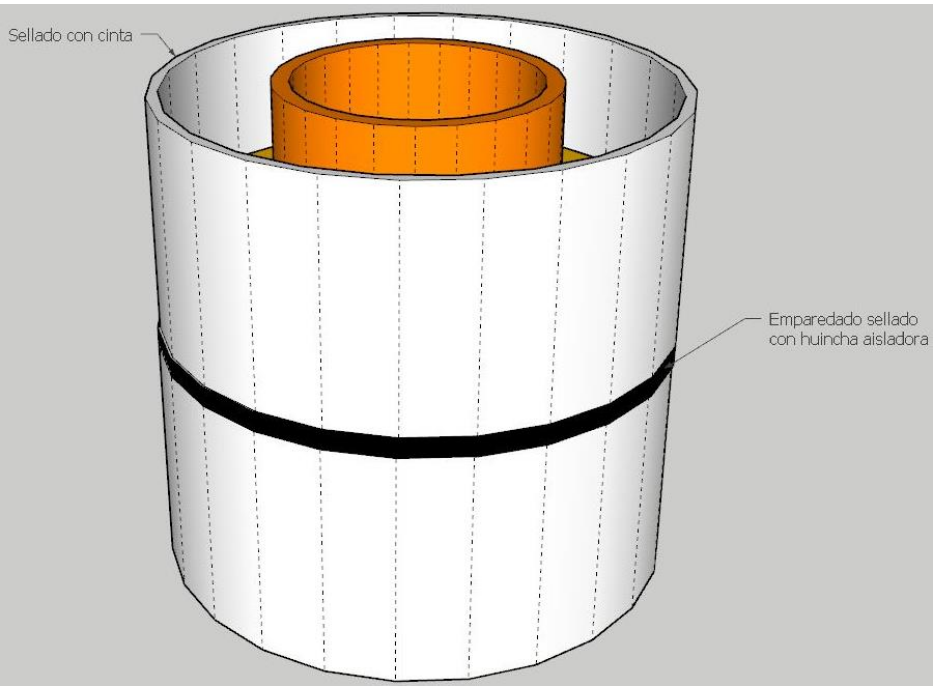

Figura 91. Probeta sellada con huincha aisladora.

VI. Para luego sellar por completo los dos tubos de PVC unidos, con film plástico adherente (alusa plast) utilizando la cantidad que sea necesaria para darle hermeticidad a la probeta, y luego capas de papel aluminio para evitar mayores cambios de temperatura. Se añade por fuera de todo lo anterior una etiqueta con el porcentaje de humedad que representa el molde y la muestra de suelo que contiene.

VII. Al finalizar de embalar y etiquetar los moldes, se guardan en un contenedor de poliestireno, donde cumplirán por lo menos 7 a 10 días de equilibrio térmico, donde la humedad en el papel filtro y el suelo que contienen los moldes entraran en equilibrio. Como se aprecia en la Figura 92.

Figura 92. Probetas terminadas listas para el equilibrio térmico de 7-14 días.

VIII. Al finalizar el periodo de equilibrio térmico comienza el proceso más meticuloso del ensayo de laboratorio. Primero se pesan los contenedores metálicos secos donde se depositarán los papeles filtros recién extraídos de la probeta en equilibrio. Se deben registrar todos los pesos de los contenedores metálicos con sus respectivas etiquetas bajo la denominación de “peso contenedor frío”. Es necesario utilizar un balanza digital de precisión de al menos 0.0001[gr]. Como demuestra la Figura 93.

Figura 93. Medición de contenedores metálicos para el papel filtro en balanza digital de precisión.

IX. Los siguientes pasos son cruciales para la correcta obtención de datos, por lo que se recomienda que dos personas trabajen de manera sincronizada para no provocar errores en las mediciones. Se sacan los contenedores de la cámara de equilibrio térmico y al mismo tiempo se preparan los contenedores metálicos donde se deposita el papel filtro.

X. Luego de manera sumamente veloz, idealmente en menos de algunos segundos, se corta el envoltorio de la probeta de PVC y se sustrae rápidamente el papel filtro de menor diámetro mediante el uso de pinzas, para ser depositado de manera ágil en el contenedor metálico dispuesto anteriormente. Cerrar inmediatamente el contenedor metálico al momento de depositar el papel filtro.

XI. Luego pesar lo antes posible el contenedor metálico con el papel filtro dentro y anotar este valor, debe quedar registrado como “peso contenedor frio y papel filtro húmedo”.

XII. Al realizar los pasos VIII a IX para todos los contenedores embalados, se procede a dejar los contenedores metálicos semi destapados con el papel filtro en su interior , en un horno a baja temperatura para poder eliminar toda la humedad restante en el papel filtro. Dejar secando por lo menos 10 horas y antes de sacarlos , cerrar la tapa del contenedor por lo menos 5 minutos para formar equilibrio dentro del contenedor, ver Figura 94.

Figura 94. Horno con contenedores metálicos secando el papel filtro húmedo.

XIII. Sacar el contenedor del horno y posarlo sobre un bloque de aluminio (El cual acelera el proceso de enfriamiento) por unos 10 segundos, para luego pesar el contendor caliente con el papel filtro seco en su interior. Registrar esta medición como “peso contenedor caliente y papel filtro seco”.

XIV. Para finalizar las mediciones sacando el papel filtro seco del interior del contenedor metálico caliente y tomar el peso del contenedor metálico caliente. Apuntar esta medición como “peso contenedor caliente”

Con todos los pesos que se registraron anteriormente se puede llevar a cabo el cálculo del contenido de humedad dentro del papel filtro para calcular mediante una curva de calibración la succión a esa determinada humedad del papel filtro. Se utiliza la fórmula que aparece en la norma (ASTM D5298-16, 2016b) que se presenta a continuación:

$$M_f = M_2 - T_h$$

$$M_w = M_1 + T_h - M_2 - T_c$$

Donde: M_f: masa papel filtro seco [g]; M_1: masa contenedor frio y papel filtro húmedo [g]; M_2: masa contendor caliente y papel filtro seco [g]; T_h: masa contendor caliente [g]; T_c: masa contendor frío [g]; y M_w: contenido de agua en el papel filtro [g].

Luego de obtener todos los valores de los parámetros anteriores se calcula el porcentaje de agua en el papel filtro, con este último dato, se calcula la succión con respecto al porcentaje de humedad que corresponde a la probeta. El cálculo del porcentaje de contenido de agua en el papel filtro (w_f) es mediante la siguiente formula:

$$w_f = 100\frac{M_w}{M_f}$$

Y para convertir el contenido de humedad w_f a un valor de succión se usa la referencia de una curva de calibración o se calcula mediante:

$$h = mw_f + b$$

Donde: m: es la pendiente de la curva de calibración del papel filtro, $[\log_{10} kPa\ /w_f]$; y b: el intercepto de la curva de calibración, $[\log_{10} kPa]$.

En específico para el papel filtro utilizado en esta investigación (Whatman n°42) se cuenta con una curva de calibración, expuesta por la norma (ASTM D5298-16, 2016a), la cual se presenta a continuación en la Figura 95:

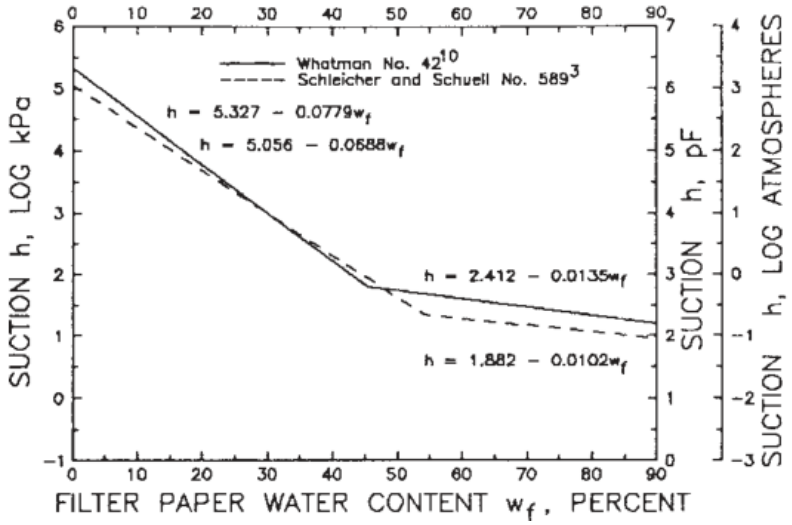

Figura 95. Curvas de calibración de contenido de agua-succión para humedecer papel de filtro tipo Whatman n°42 y Schleicher and Schuell No. 589.

Basta con observar la curva para notar el punto de quiebre que sufre en el contenido de agua en el papel filtro al alcanzar el valor w_f= 45,3. El segmento superior representa la humedad retenida como películas adsorbidas a las superficies de las partículas, mientras que el segmento inferior representa la humedad retenida por las fuerzas capilares o de tensión superficial entre las partículas. En este caso se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$h = -0{,}0779w_f + 5{,}327 \text{ para } w_f \leq 45{,}3$$

$$h = -0{,}0135w_f + 2{,}412 \text{ para } w_f > 45{,}3$$

Con las dos ecuaciones presentadas, se puede calcular las succiones correspondientes a un porcentaje de humedad que se le da a la probeta. Al obtener estos datos se puede graficar la SWRC para los ripios de lixiviación en estudio.

La variabilidad en los resultados es menos del 2% de la succión por encima de 100[kPa]. La alteración del suelo tiene una influencia mínima en la succión por encima de 20[kPa]. Con contenidos de humedad con succiones inferiores a 20[kPa], la alteración de la muestra aumenta la variabilidad de la medición.

8.5 Curva de retención de ácido del suelo, SARC

Como ya mencionamos anteriormente los utensilios y equipamientos del método del papel filtro permiten adaptarse a la realidad de la muestra que se investiga, por lo que para ripios de lixiviación es una herramienta bastante poderosa, ya que todos los materiales que se utilizan para la confección de probetas son de plástico. Esto quiere decir que el ácido no provoca ningún malfuncionamiento en el procedimiento que requiere el ensayo, por lo que se ha llevado a cabo la curva de retención de ácido. En vez de utilizar agua como liquido principal del estudio, se ha cambiado este fluido para utilizar algo similar a lo que se utiliza en la práctica en las mineras, una solución de ácido sulfúrico. La concentración del mismo en la solución utilizada es aproximadamente de 10[g/L].

Dicho esto, se presenta la curva de retención de ácido del suelo ”Soil Acid Retention Curve, SARC” que fue confeccionada con la muestra de ripio lixiviado L1, ya que se dispone más de esta muestra. Se siguió a cabalidad el mismo procedimiento descrito anteriormente, siguiendo paso a paso el procedimiento de confección de los moldes con muestra compactada, para luego a diferencia del método tradicional, se saturaron los moldes en la solución acida como se muestra en la Figura 96. Siempre siguiendo todas las recomendaciones de seguridad e identificando todos los peligros que contiene la hoja de datos de seguridad del ácido sulfúrico.

Figura 96. Moldes con muestra compactada en proceso de saturación con solución acida.

Esta es la única diferencia con el método de obtención del resto de los valores de succión, el papel filtro al estar en equilibrio con la probeta humectada en ácido, no tuvo ningún efecto negativo notorio en su integridad, se comportó de igual manera que con el agua. La muestra tuvo un comportamiento diferente con el ácido por su composición química es un líquido más denso tiene una gravedad especifica de 1,84 en comparación a el agua que es 1, por lo mismo penetra más profundo en las partículas de suelo, pero toma un poco más de tiempo para su saturación completa. Esto también conlleva en un mayor tiempo de secado, ya que no se evapora ni escurre de la misma manera que el agua, quedando estancado en los poros intersticiales. Como se aprecia en la Figura 97 de derecha a izquierda se muestra desde el mayor contenido de solución acida gravimétrico a el menor.

Figura 97. Probetas saturadas en ácido luego de la extracción del papel filtro

A medida que el ácido comienza a secarse se va a adhiriendo con las partículas de fino que se desprenden de las gravas y forman una especie de capa delgada viscosa que recubre por completo las partículas de mayor tamaño de la muestra. Por lo que se facilita la confección de las probetas, pero toma más tiempo secar la muestra hasta el contenido gravimétrico deseado.

9 Análisis de las SWRC resultantes del método del papel filtro para ripios lixiviados.

Se presentan las SWRC correspondientes a muestras de ripios de lixiviación obtenidos de botaderos en mineras del norte del país, que se encuentran en dependencias del laboratorio de geotecnia de UTFSM (LEMCO). Las curvas de retención de agua fueron obtenidas mediante la medición de cinco puntos característicos de forma aproximadamente equidistante para una gráfica logarítmica, estas humedades se distanciaban dependiendo del contenido máximo de humedad de la muestra que además se toma como punto asociado al contenido gravimétrico de humedad al límite de saturación, presentado en 8.2.2, este punto corresponde al punto de inicio de la SWRC de secado, asociado a una succión nula. Para el ajuste de los puntos obtenidos en una curva única, se utilizará el modelo de (Xing & Fredlund, 1994), presentado en 3.6.

A continuación, se presentan los datos obtenidos del ensayo del papel filtro mediante dos gráficos que comparan el porcentaje de contenido gravimétrico de agua que tiene el suelo versus el contenido de agua en el papel filtro en porcentaje y el contenido gravimétrico de agua en el suelo versus la succión matricial en [kPa]. A su vez, se presentan los resultados gráficos de la curva de retención de agua del suelo para 3 series de ensayos mediante el método de papel filtro a las muestras L1 y L2. Primero se presentan gráficos comparativos separados por muestra para las tres mediciones que se les realizó, un gráfico resumen de todas las SWRC obtenidas para ambas muestras y finalmente todos los gráficos por separado.

9.1 Análisis de datos

Al realizar el método del papel filtro se advierten diferencias en las mediciones de una misma muestra, esto es debido a que los parámetros para preparar la muestra presentan mucha variabilidad y el manejo del papel filtro en si es muy sensible al cambio de humedad, por lo que se espera dispersión en los datos.

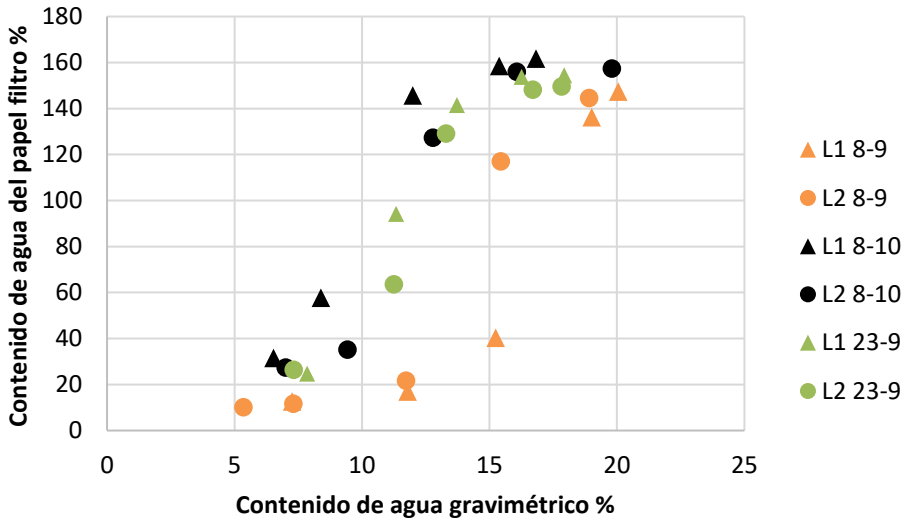

Figura 98. Contenido de agua del papel filtro versus contenido gravimétrico de agua en el suelo.

Analizando la Figura 98, los datos contenidos en ese gráfico, al ser analizados por separados y calcular su regresión lineal, se logra llegar a un coeficiente de determinación (R^2) bastante alto, el cual tiene su mínima en 0,828 y su máxima en 0,920, y promedia entre todos los datos R^2=0,881. Lo que a priori demuestra una buena medición de datos y concordancia en los valores obtenidos en el ensayo con los valores teóricos esperados.

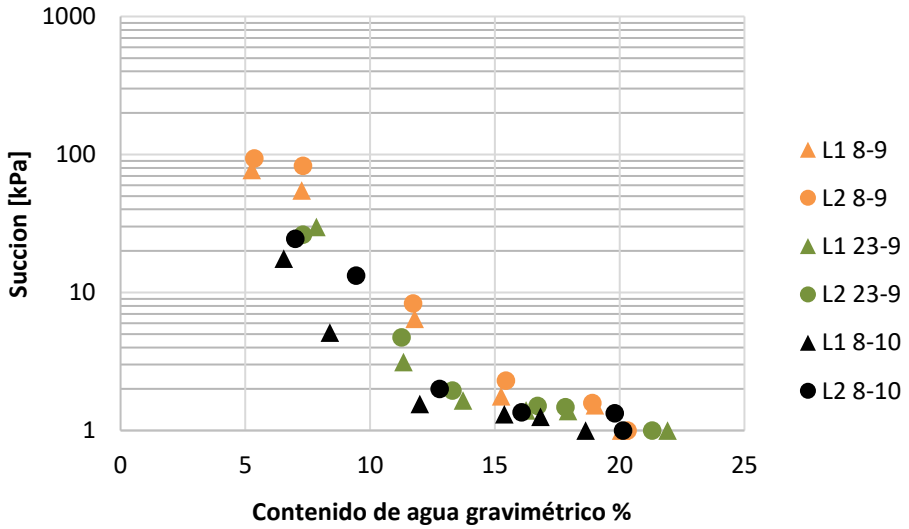

Figura 99. Succión matricial versus contenido gravimétrico de agua en el suelo.

La Figura 99 representa todos los puntos obtenidos para calcular las SWRC, la cual deja en evidencia la granulometría que conforman nuestras muestras ya que a medida que aumenta el contenido de agua gravimétrico decae de manera exagerada la succión en comparación a un material más fino.

9.2 SWRC de ripio de lixiviación L1

En la Figura 100, se aprecia una caída abrupta en la curva, esto se asocia a la entrada de aire que tiene la muestra, esta caída repentina también deja en evidencia la existencia de poros de un tamaño mayor en comparación a una muestra con muchos finos, lo que ocasiona que las fuerzas capilares tengan una magnitud menos incidente.

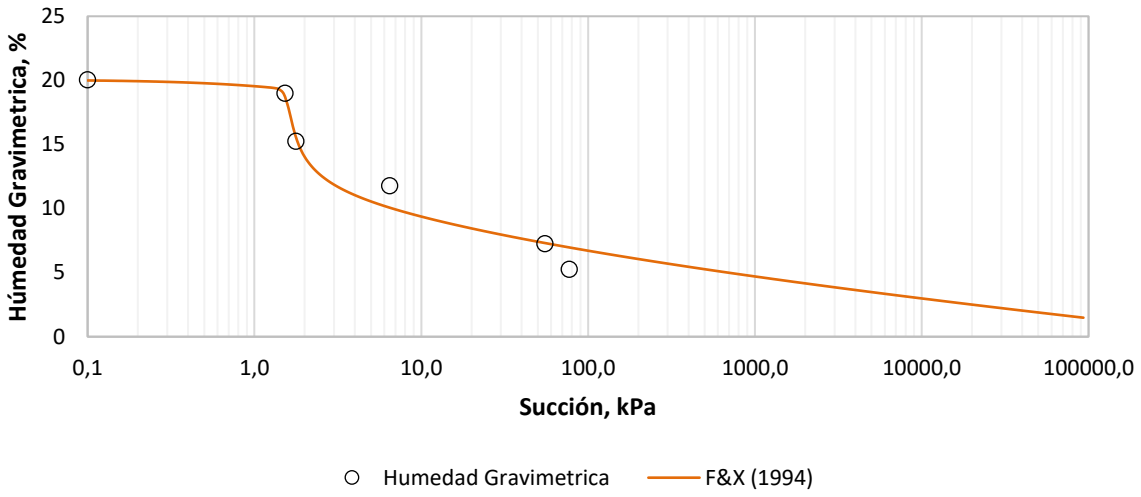

Figura 100. Curva de retención de agua del ripio de lixiviación L1 8-9, ajustada mediante Fredlund & Xing 1994.

El grafico de la Figura 101 pone en evidencia la reutilización del mismo material, ya que al manipular la muestra en el laboratorio (Saturar, secar, compactar) los glómeros que conforman la estructura del ripio lixiviado, comienza a desintegrarse, por consecuencia la cantidad de fino aumenta y el contenido de gravas disminuye, alcanzando un mayor límite de saturación ya que el fino absorbe más agua.

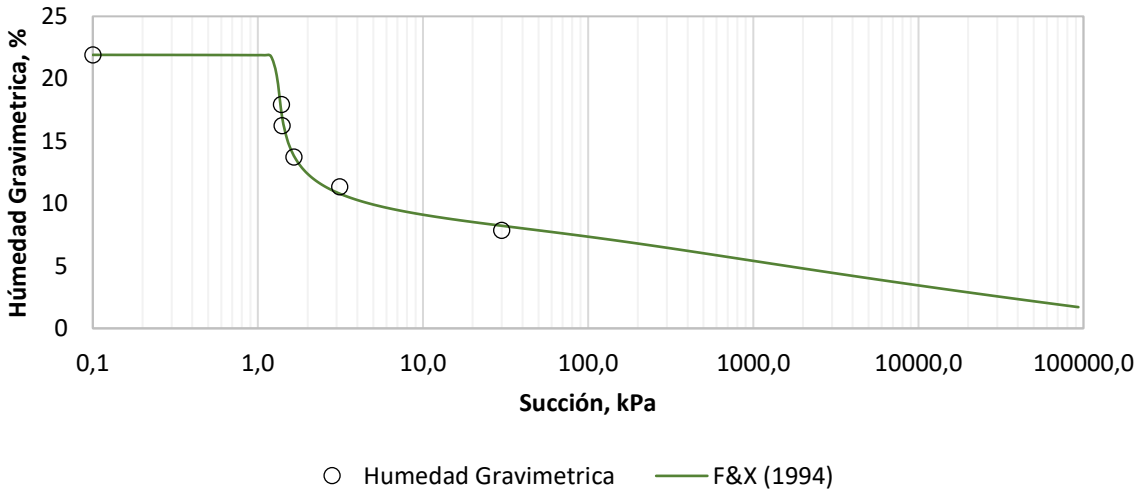

Figura 101. Curva de retención de agua del ripio de lixiviación L1 23-9, ajustada mediante Fredlund & Xing 1994.

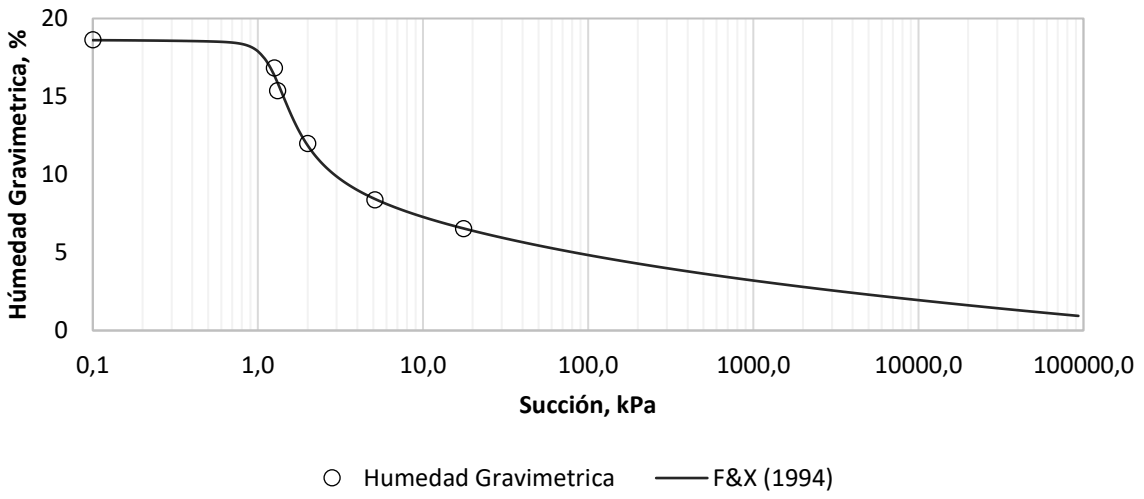

Figura 102. Curva de retención de agua del ripio de lixiviación L1 8-10, ajustada mediante Fredlund & Xing 1994.

La curva de la Figura 102 en cambio, no presenta una pendiente tan pronunciada en comparación a las dos curvas anteriores, pero presenta una conformación casi idéntica y los puntos experimentales se ajustan mejor en el modelo matemático utilizado. Como era de esperarse para esta arena limo-arcillosa con gravas, la curva demuestra la variada granulometría que conforma el material, ya que presenta una caída acentuada producto de los poros de mayor tamaño que se presentan entre gravas y arenas (mayores materiales que conforman la muestra). Esto se traduce en un valor de entrada de aire (AEV) pequeños, idealmente muy cercanos a 1[kPa] o menores que 5-7[kPa]. Además, la influencia del ascenso capilar por sobre el nivel freático en la zona vadosa, no es de mayor envergadura debido a la variabilidad del tamaño de poros, pero esto llama a no descuidarse al momento de calcular la compactación adecuada para darle al depósito de los ripios, debido a que, compactando el terreno el índice de vacíos disminuye y con esto, el tamaño de poro disminuye tomando mayor relevancia el ascenso capilar.

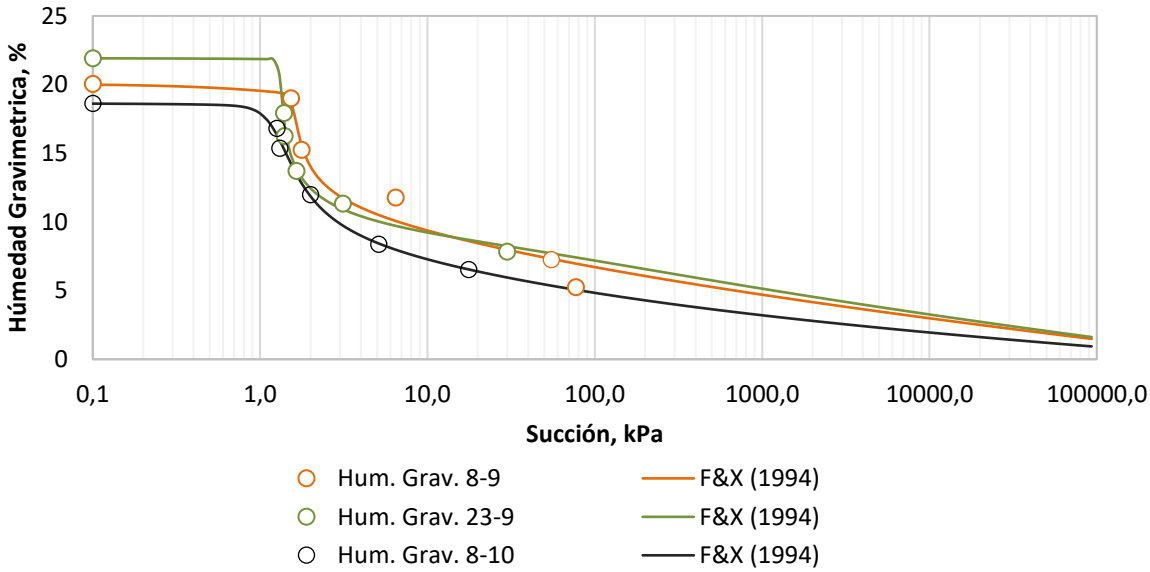

Figura 103. Curvas de retención de agua del ripio de lixiviación L1, ajustadas mediante Fredlund & Xing 1994.

Por último, se muestra en la Figura 103 un gráfico comparativo de todas las SWRC para el ripio de lixiviación L1. Donde se aprecia la poca variabilidad en los puntos obtenidos entre tandas de experimentos. Lo que contrasta con el "grado" del material, ya que a los botaderos solo llegan suelos de descarte, suelos clasificados como malos geotécnicamente hablando, esto quiere decir que se fragmentan de manera sencilla cuando esfuerzos aplicados a estos los atañen. Analizando la literatura disponible, es esperable el comportamiento de la SWRC obtenida mediante muestras compactadas como presenta en su libro (Delwyn G. Fredlund et al., 2012). Aun así, la entrada de aire para los ripios lixiviados concuerda con otros estudios realizados, dándole la característica fundamental que presentan las arenas gravosas.

9.3 SWRC de ripio de lixiviación L2

La Figura 104,Figura 105 y Figura 106 presentan respectivamente los ensayos realizados al ripio de lixiviación L2 por fecha en que fue hecho el ensayo. Las SWRC tienen un comportamiento muy similar a las de la muestra L1, pero con algunas diferencias en los parámetros de ajuste del modelo matemático. Como por ejemplo el promedio del parámetro $a_{F\&X}$(AEV) es prácticamente el mismo, pero con $n_{F\&X}$ (pendiente de zona de transición) es bastante dispar, ya que L2 presenta un promedio de pendiente 3 veces menor que la otra muestra, esto realza en la curva una bajada desde el valor de AEV mucho menos pronunciada.

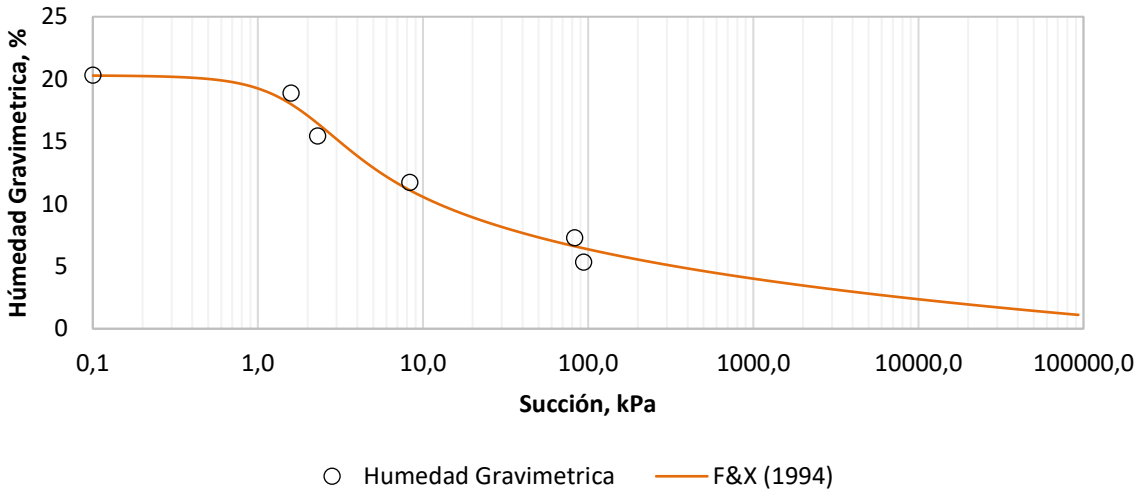

Figura 104. Curva de retención de agua para el ripio de lixiviación L2 8-9, ajustada mediante Fredlund & Xing 1994.

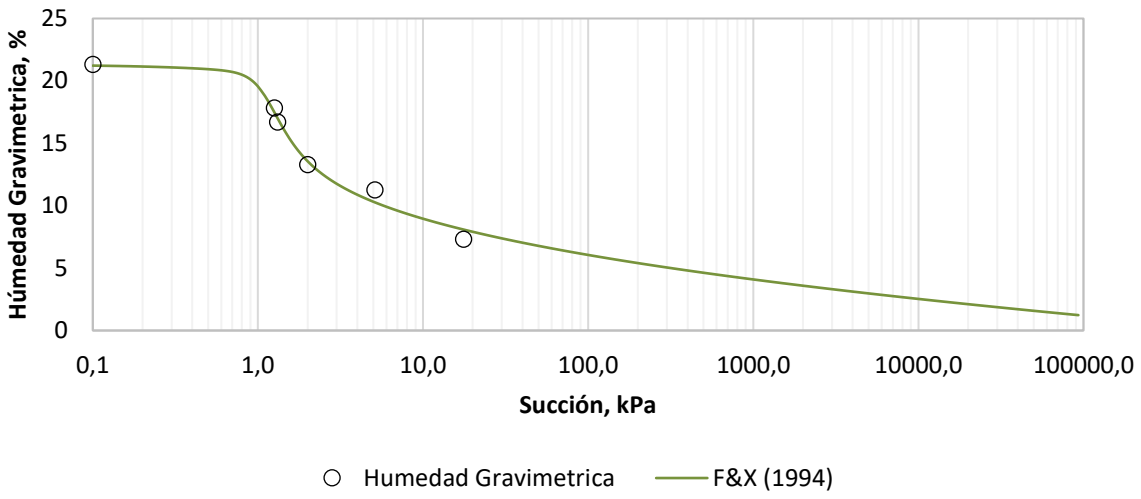

Figura 105. Curva de retención de agua para el ripio de lixiviación L2 23-9, ajustada mediante Fredlund & Xing 1994.

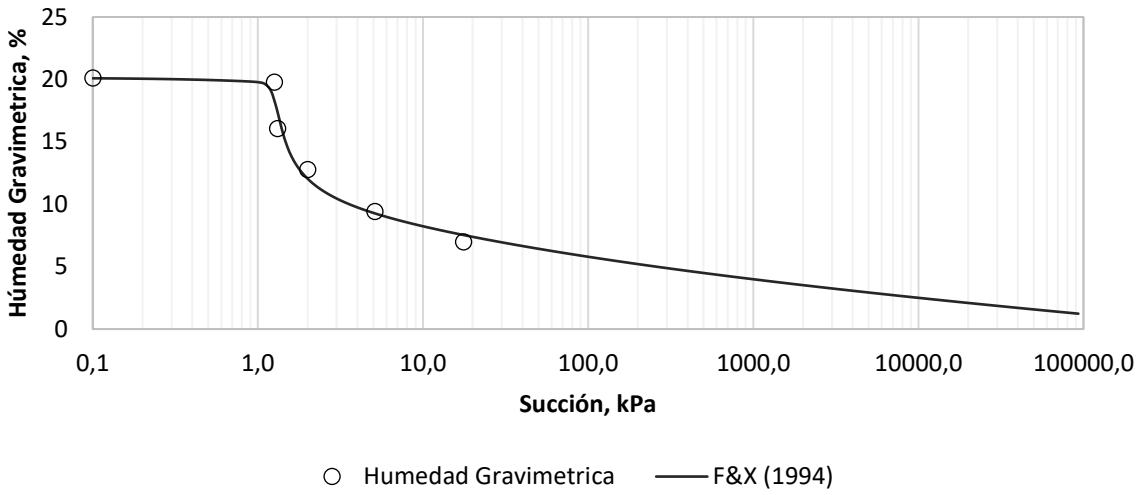

Figura 106. Curva de retención de agua para el ripio de lixiviación L2 8-10, ajustada mediante Fredlund & Xing 1994.

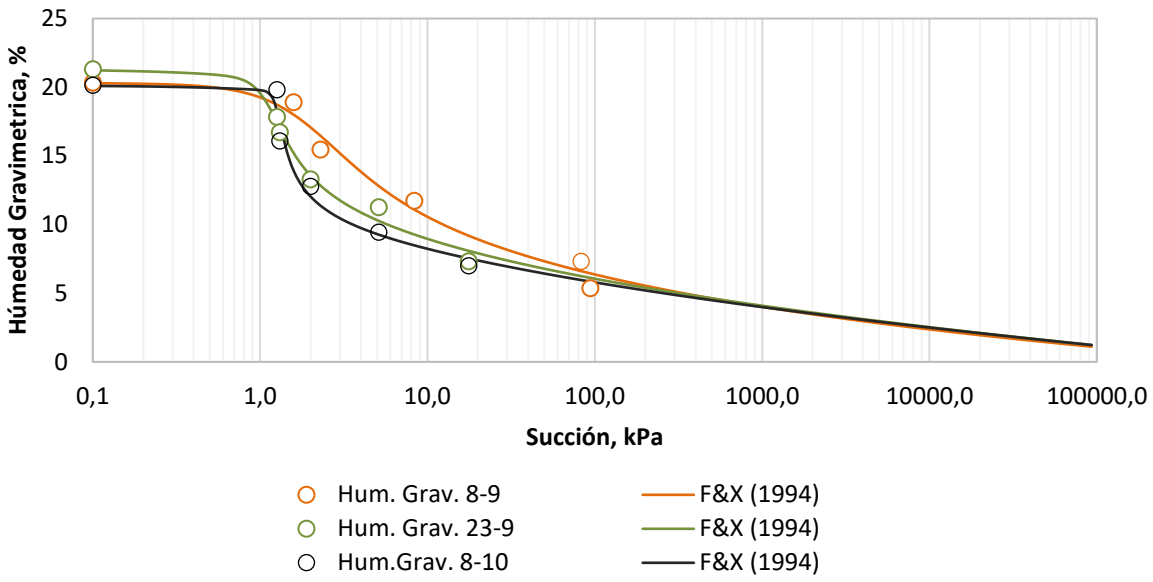

Figura 107. Curvas de retención de agua del ripio de lixiviación L2, ajustadas mediante Fredlund & Xing 1994.

En la Figura 107 se presenta un gráfico comparativo de todas las curvas para la muestra L2 donde se aprecia que los últimos dos ensayos entregaron resultados muy similares, el ensayo del 8-9 presento una mayor dispersión en los datos, el cual puede ser atribuido a la falta de experiencia al realizar los ensayos para obtener la succión matricial. A pesar de esto los resultados son correspondidos con el comportamiento teórico de la succión variando el contenido gravimétrico de humedad en este tipo de arena arcillosa con gravas.

9.4 Valores de parámetros relevantes para la obtención de la SWRC

Se presentan todos los valores de succión con su par correspondiente al porcentaje de humedad gravimétrica de la probeta, para todos los ensayos de ambas muestras en la Tabla 9:

Tabla 9. Tabla resumen de puntos de la SWRC donde contenido gravimétrico de agua se asocia a la succión obtenida mediante el método del papel filtro.

ripios de lixiviación	L1 8-9	*w*%	20,05	19,00	15,24	11,78	7,25	5,25
		[kPa]	1,00	1,53	1,77	6,47	55,08	77,18
	L2 8-9	*w*%	20,31	18,90	15,44	11,72	7,30	5,35
		[kPa]	1,00	1,59	2,30	8,33	82,88	94,00
	L1 23-9	*w*%	21,92	17,93	16,25	13,72	11,33	7,84
		[kPa]	1,00	1,39	1,40	1,65	3,13	29,92
	L2 23-9	*w*%	21,30	17,82	16,70	13,29	11,25	7,31
		[kPa]	1,00	1,48	1,51	1,95	4,73	26,25
	L1 8-10	*w*%	18,63	16,82	15,37	11,99	8,38	6,53
		[kPa]	1,00	1,26	1,31	1,56	5,12	17,64
	L2 8-10	*w*%	20,13	19,80	16,07	12,78	9,43	7,00
		[kPa]	1,00	1,33	1,36	2,00	13,26	24,57

Para lograr ajustar todas estas curvas expuestas en los acápites anteriores se utilizaron distintos valores para los parámetros que definen al ajuste de Fredlund & Xing. A continuación, se presenta la Tabla 10 con todos los valores utilizados para lograr las SWRC presentadas:

Tabla 10. Resumen de parámetros de ajuste para modelo de Fredlund & Xing 1994.

Ripio	$a_{F\&X}$	$n_{F\&X}$	$m_{F\&X}$	w_r
L1 8-9	1,549	27,315	0,160	2,600
L1 23-9	1,300	52,000	0,180	36,669
L1 8-10	1,182	7,395	0,315	8,257
L2 8-9	1,626	2,293	0,407	8,560
L2 23-9	1,048	7,128	0,260	2,054
L2 8-10	1,239	20,557	0,211	4,539

9.5 SARC de ripio de lixiviación L1

En esta sección se presentan los resultados del ensayo único realizado mediante la solución de ácido sulfúrico. A priori al observar la curva y los puntos que la conforman, los resultados se ven esperanzadores debido a que el contenido gravimétrico de humedad es mayor y se logra ajustar de buena manera al modelo matemático como se aprecia en la Figura 108.

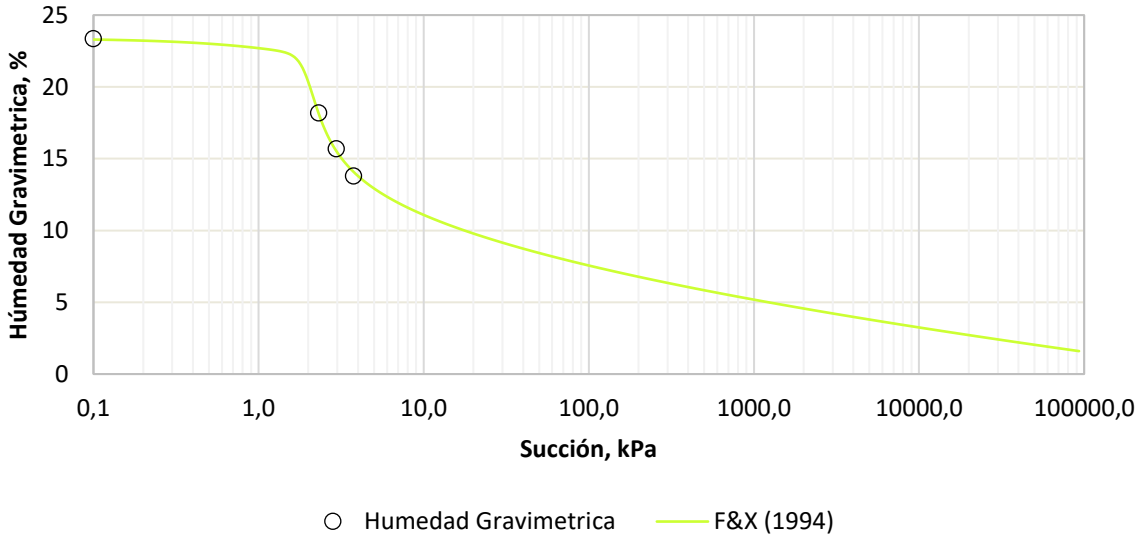

Figura 108. SARC para ripio de lixiviación L1

Cabe destacar que los tres puntos obtenidos tienen un coeficiente de determinación increíble con el valor de R^2=0,994, lo que asienta bases de una correcta obtención de la curva de retención de ácido del suelo.

Es vital comparar los resultados obtenidos de la SARC de L1 con las SWRC de L1. Al comparar todas las curvas en un gráfico, se logra apreciar su mayor similitud con respecto a la SWRC L1 8-10, por lo que se presenta en la Figura 109. Es posible notar que la SWRC se traslada al utilizar ácido en vez de agua, ya que son prácticamente iguales con pequeñas diferencias que se hacen un poco más notorias al revisar los parámetros del ajuste matemático.

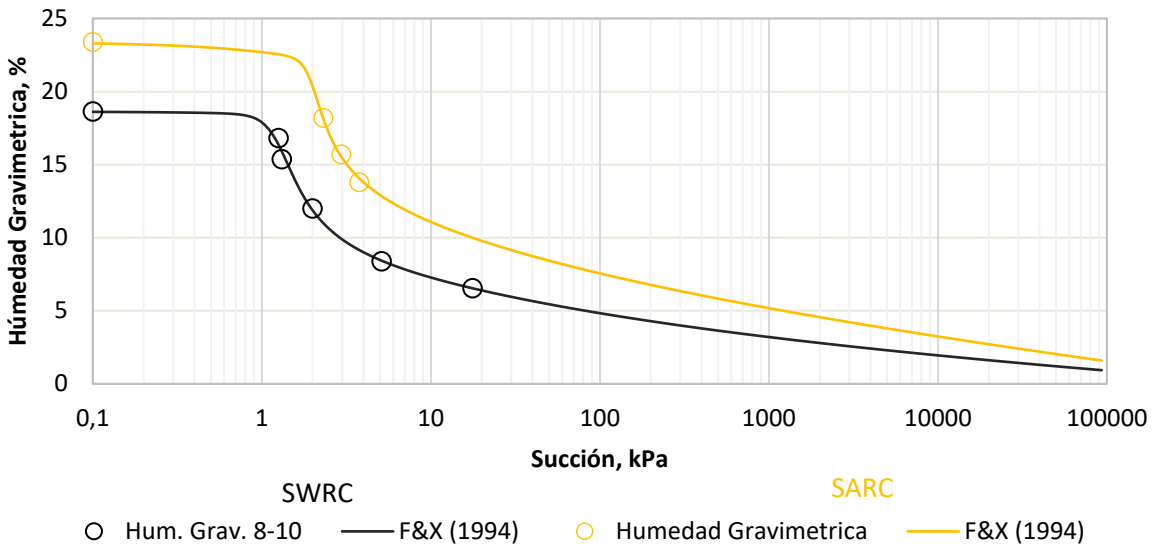

Figura 109. Comparación entre SARC y SWRC del ripio de lixiviación L1

Como muestra la Tabla 11, es imperiosa la diferencia en el parámetro $a_{F\&X}$ (AEV) por lo que la caída de la SARC comienza después que la SWRC, esto puede explicarse por la dificultad que debe tener el aire al tratar de atravesar la capa delgada de solución acida con partículas finas que se aglomera como un sustancia viscosa y colmata los poros.

Tabla 11. Parámetros de ajuste para modelo de Fredlund & Xing 1994.

Ripio	$a_{F\&X}$	$n_{F\&X}$	$m_{F\&X}$	w_r
SARC	1,890	12,140	0,201	2,165
L1 8-10	1,182	7,395	0,315	8,257

Otro aspecto importante a comparar debido a lo observado al llevar a cabo el ensayo con ácido, es la permeabilidad del suelo, la cual está relacionada con la succión del suelo, por lo tanto, debiese variar en comparación al ensayo con agua.

9.6 Coeficiente de permeabilidad normalizado

A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante la ecuación de van Genuchten 3.7.4 para obtener el grafico de conductividad hidráulica en base a los puntos obtenidos para la SWRC. Se debe considerar que no se tiene información sobre el coeficiente de permeabilidad saturado(K_s) por lo que los coeficientes entregados son en función de este valor. A continuación, desde la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** hasta la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presentan todos los gráficos obtenidos para las muestras L1 y L2, incluyendo una comparación entre el coef. de permeabilidad de L1 SARC y L1 SWRC en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.

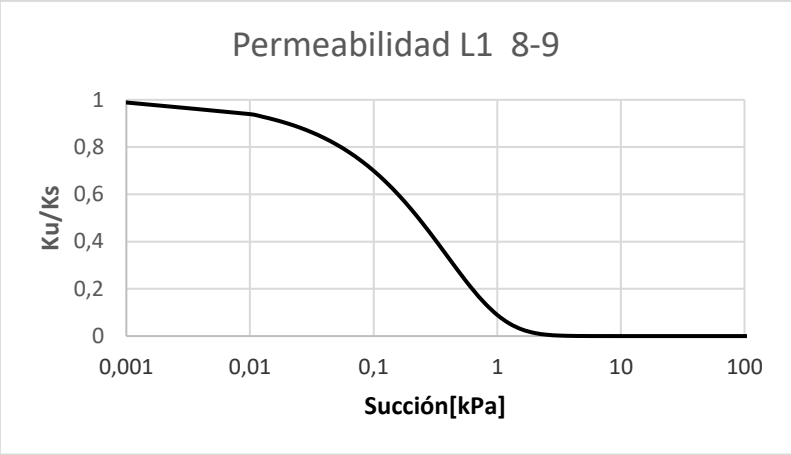

Figura 110. Coeficiente de permeabilidad para L1 8-9

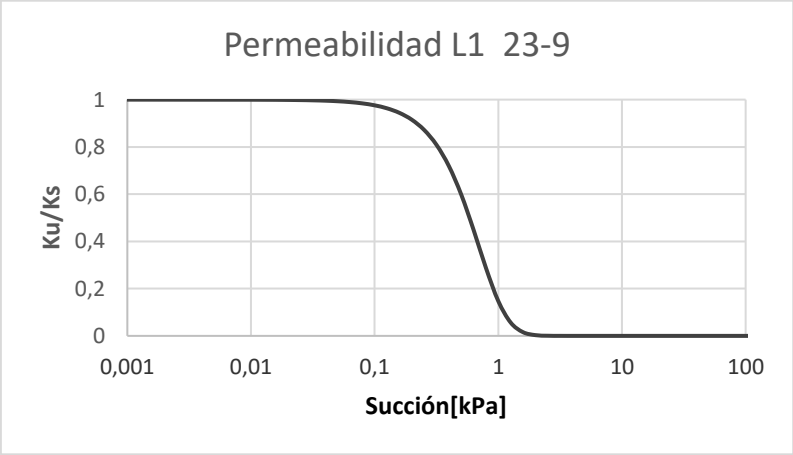

Figura 111. Coeficiente permeabilidad para L1 23-9

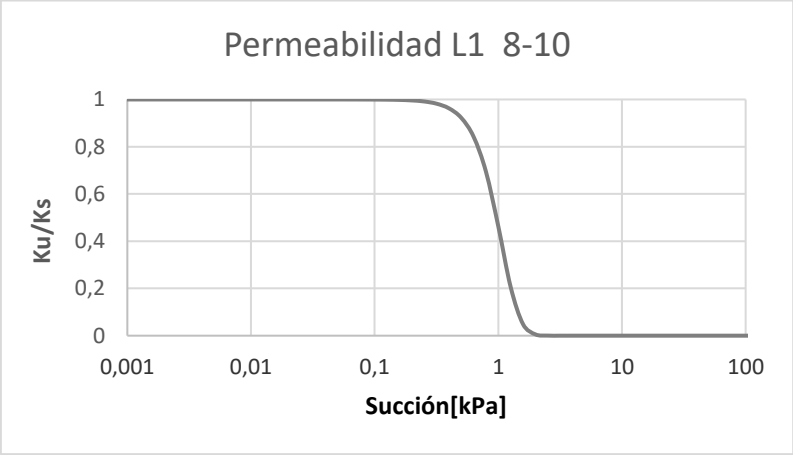

Figura 112. Coeficiente de permeabilidad para L1 8-10

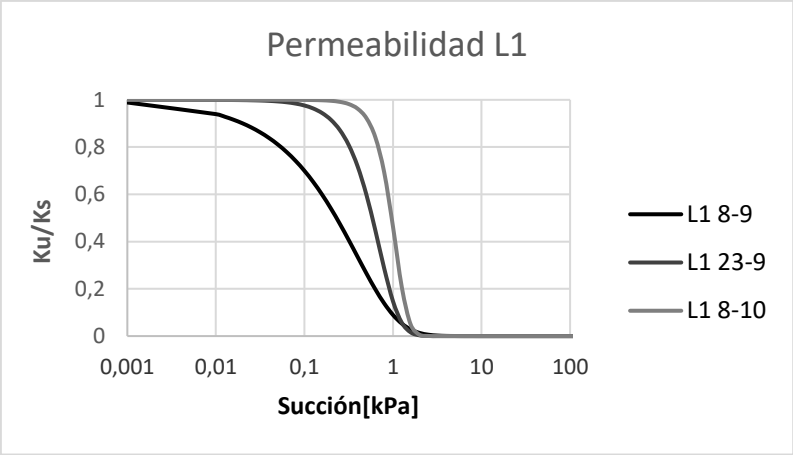

Figura 113. Coeficientes de permeabilidad para L1

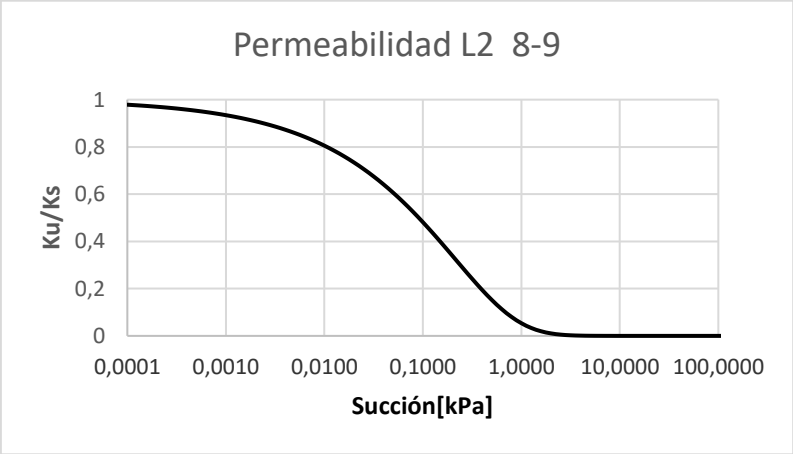

Figura 114. Coeficientes de permeabilidad para L2 8-9

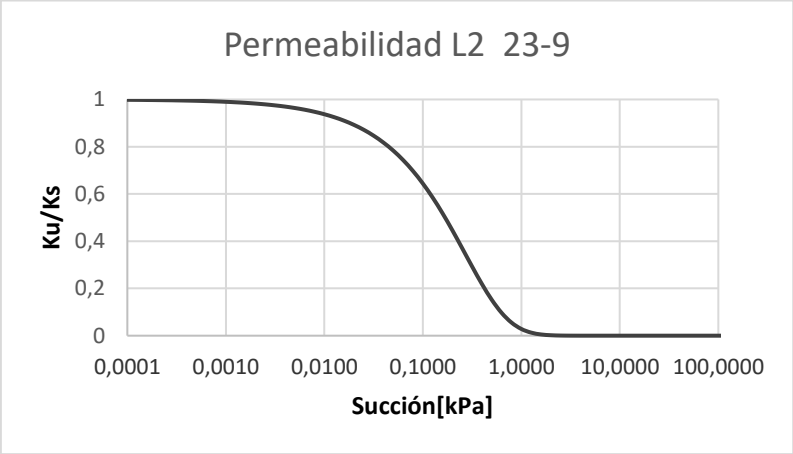

Figura 115. Coeficiente de permeabilidad para L2 8-23

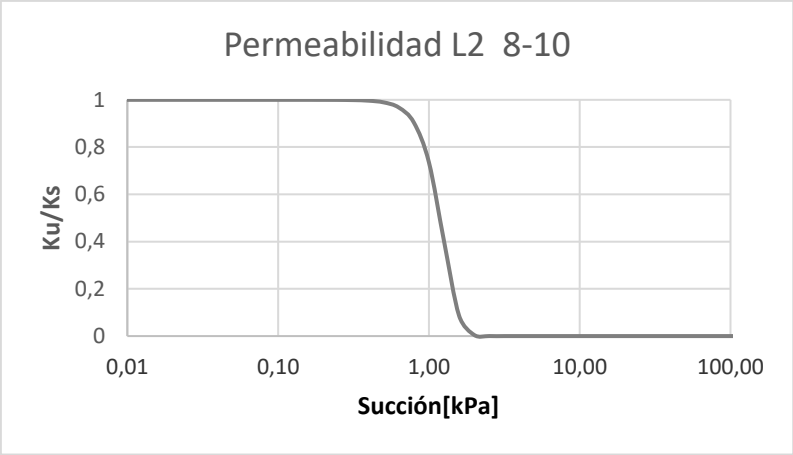

Figura 116. Coeficiente de permeabilidad para L2 8-10

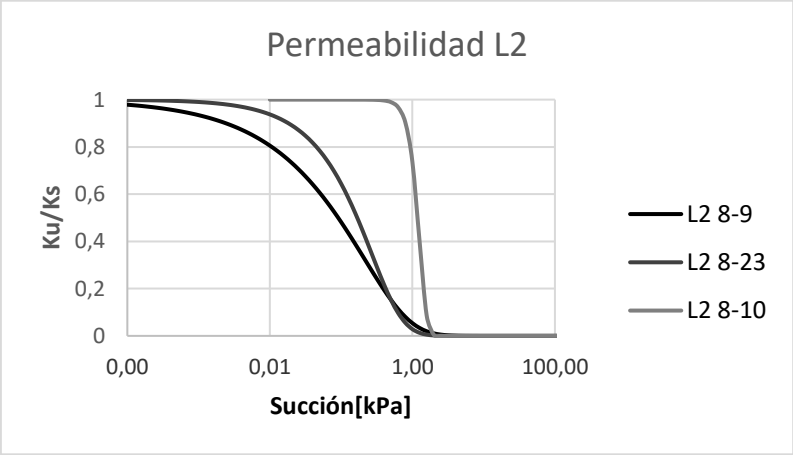

Figura 117. Coeficientes de permeabilidad para L2

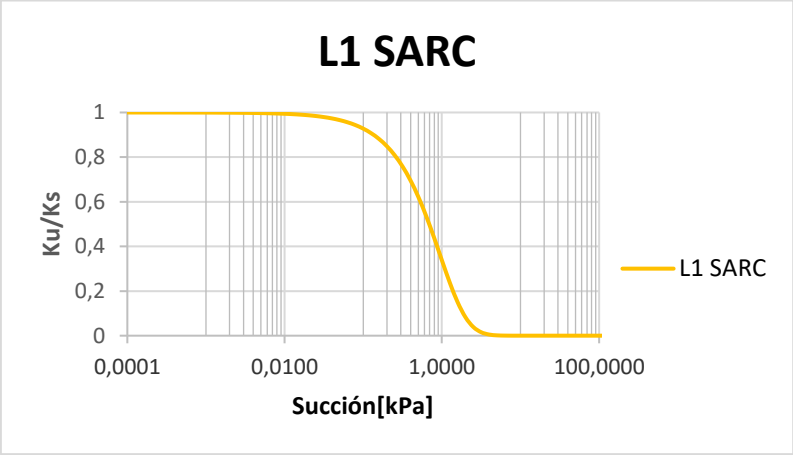

Figura 118. Coeficiente de permeabilidad para L1 SARC

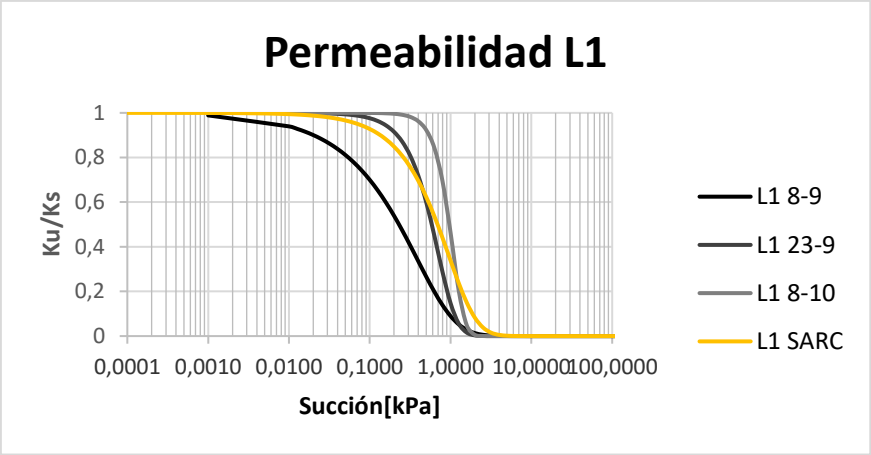

Figura 119. Coeficiente de permeabilidad L1 vs L1 SARC

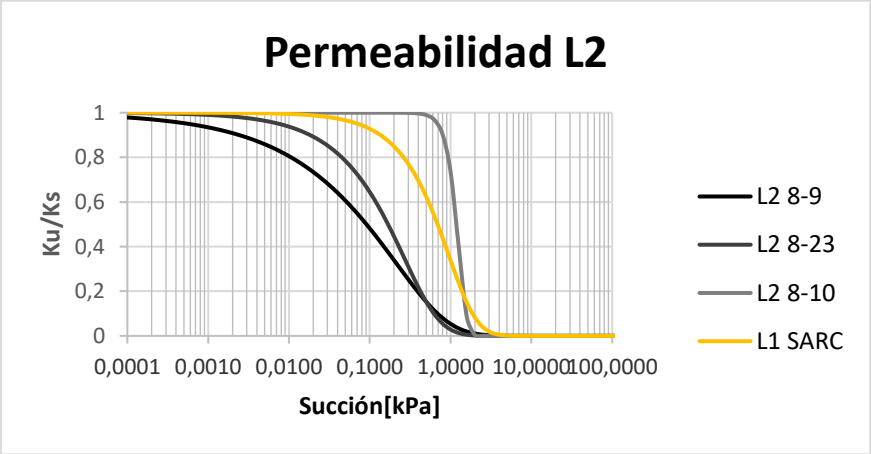

Figura 120. Coeficiente permeabilidad para L2 vs L1 SARC

9.7 Comentarios del método

La obtención de la SWRC mediante el uso del método del papel filtro posee una repetitividad variable, aunque con una dispersión aceptable para los valores obtenidos, es decir generando curvas concordantes y bien conformadas para el material en cuestión, por lo que es un método que genera resultados con bastante fiabilidad. Por otra parte, el método presenta un gran nivel de adaptación en relación de la muestra a estudiar, ya que las herramientas que se utilizan son económicamente asequibles y de fácil acceso en el comercio. Basta comparar con otros métodos de laboratorio que utilizan equipos que pueden ser dañados fácilmente por las propiedades corrosivas que tiene el ácido en los ripios, por ejemplo, la cámara de presión al utilizarla con ripios puede dañar el plato poroso. A su vez, este ensayo al tener disponible suficientes contenedores y moldes se puede obtener la totalidad de la curva, con muchos puntos si el caso lo requiriese, en un periodo de tiempo menor a los demás ensayos que logran entregar la curva en su rango total (cámara de presión con platos poroso toma prácticamente un mes), aproximadamente tomaría 10 días (dependiendo del tiempo en equilibrio térmico que se estime pertinente).

En contraparte, por estar supeditado a errores experimentales, es importantísima la experiencia de quien lo lleva a cabo, ya que se infiere grandes modificaciones en los resultados al ser mal ejecutados los procedimientos del ensayo. Ya que en si el papel filtro es excepcionalmente sensible a variaciones de humedad y peso, por lo que el ambiente de trabajo debe ser cerrado, cálido y libre de cualquier contaminación que pueda interferir en el ensayo y los resultados como polvo, humedad, etc. Además, la demora en la medición de más de 5 segundos puede provocar errores de hasta un 5%, lo cual se ve acrecentado producto de la humedad relativa y las altas temperaturas.

Al realizar los ensayos con ácido se requiere especial cuidado al manejar el líquido y sellar sus contenedores, también utilizar siempre guantes, ropa protectora, gafas de seguridad y respirador con filtro para vapores ácidos.

10 Conclusiones

Los residuos masivos mineros son un problema latente en cualquier país dedicado a la minería como es el caso de Chile, donde se encuentran más de 1700 faenas mineras en abandono de las cuales no se tiene conocimiento sobre su estabilidad físico-química. La cual se ve influenciada mayoritariamente por el grado de saturación en los depósitos. Se hace de vital importancia caracterizar los parámetros de los residuos mineros parcialmente saturados para la comprensión de propiedades e.g. la permeabilidad, resistencia al corte y respuesta sísmica. Esto debido a que la zona parcialmente saturada se puede encontrar muy cercana a la saturación completa en virtud al ascenso capilar en la zona vadosa desde el nivel freático, la velocidad de este fenómeno se da dependiendo de la granulometría del residuo y puede provocar fallas repentinas por perdida de resistencia en la estructura del depósito.

La curva de retención de agua del suelo es una herramienta fundamental para describir las propiedades y comportamiento de los suelos parcialmente saturados, esta se basa en la relación entre la succión y el contenido de agua en el suelo que genera esta succión. Esta curva se divide con el punto de entrada de aire (AEV) y con el punto de succión residual, separándola en tres zonas, la primera zona va desde la succión cero al AEV, zona de muy baja succión o gravimétrica; la segunda entre el AEV y la succión residual, zona de transición dominada por succión capilar; y por último la zona residual, donde debido al contenido gravimétrico de agua residual existen altas presiones. Con el desarrollo y mejoras en los métodos de obtención de la curva y sus ajustes matemáticos, se aporta al continuo avance científico en el campo de la mecánica de suelos parcialmente saturados.

El método del papel filtro entrega una técnica simple, pero sensible para obtener la succión matricial del suelo, se obtienen buenos resultados si se provee una curva de calibración adecuada. Siempre es recomendable verificar si la curva de calibración se puede utilizar sin causar errores significativos a los valores de succión a determinar, esto se puede llevar a cabo comparando las curvas de calibración entregadas por distintos autores e.g. (Bicalho et al., 2007). En este ensayo en particular la curva de calibración de la norma ASTM D5298-16 fue la que mejor se acomodó a los datos obtenidos del papel filtro Whatman n°42.

Es acertado decir que, comparando con los demás métodos para obtener el rango de succión completo, el método del papel filtro es bastante más rápido y eficaz que todo el resto, también hay que destacar su versatilidad, ya que al aumentar las dimensiones del contenedor de la muestra y realizar el mismo procedimiento estipulado, se obtuvo datos bastante acertados que se acomodan bien en el ajuste matemático más utilizado en la actualidad. Esta cualidad de adaptación del ensayo se manifiesta de manera inequívoca al poder llevar a cabo la curva de retención de ácido del suelo, ya que ningún otro método podría ser sometido a semejante pH sin resultar en daños para los equipos.

Es importante señalar que este estudio se basa en los ripios de lixiviación, estos residuos masivos mineros tienen una granulometría variable entre arena y gravas, pero dependiendo de la zona geográfica puede tener alto contenido de finos. Y a su vez, su composición físico-química influenciada por el riego con ácido sulfúrico es variable en el tiempo, ya que este químico reacciona abruptamente al contacto con agua y en presencia de oxígeno genera sales que pueden hacer variar su succión osmótica, por consiguiente, su succión total. Esto podría generar problemas en los depósitos que normalmente son acopiados, los botaderos y pilas, ya que debido a un fenómeno externo podría cambiar su grado de saturación repentinamente y desencadenar problemas si el diseño del depósito no fue hecho correctamente o tuvo problemas constructivos e.g. niveles de compactación de capas.

Debido al mayor tamaño de partícula que presentan los ripios de lixiviación, se complica compactar en el laboratorio a una densidad muy alta, ya que el material al ser geotécnicamente “malo” se fragmenta al ejercérsele demasiada presión, lo que conlleva cambios en su granulometría. Si se necesita compactar la muestra se aconseja un valor aproximado a 1,6 [Kg/cm^3], aunque lo ideal seria que la muestra sea inalterada, por lo que debiese ser extraída desde el botadero con un sondaje del mismo

diámetro que tendrá la probeta, para no compactar y realizar los ensayos a la densidad natural del suelo en el botadero. Dicho esto, la densidad inicial de la probeta afecta directamente tanto el límite de saturación de la muestra como la forma de la curva, ya que altera todo los espacios vacíos que pueda tener la muestra, alterando la composición natural de la muestra, lo que podría ser incluso perjudicial al momento de evaluar la capilaridad de la muestra. Sin embargo, la variabilidad de los datos de esta investigación se puede atribuir a los cambios en la granulometría de la muestra a lo largo de las tandas de ensayos. También al error del operador, al llevar a cabo el procedimiento de compactación o el proceso del método del papel filtro, ya que es muy susceptible a fallas en los meticulosos pasos que se deben llevar a cabo, si no se cuenta con la experiencia.

En concordancia con lo anterior, al llevar a cabo la investigación para obtener la SWRC mediante el método del papel filtro, se debe tener muy claro donde llevar a cabo el levantamiento de la muestra y a que profundidad del depósito, ya que la granulometría y humedad varían espacialmente en los depósitos de ripios, tanto en pilas como botaderos. Esto debido a la segregación que sufre el material al ser depositado desde los medios de transporte y la posterior compactación que se lleva a cabo para poder circular sobre los depósitos.

Con respecto a los resultados obtenidos mediante los ensayos del papel filtro se puede concluir que la adaptación desarrollada en la confección de moldes y posterior uso como probetas, entrego resultados bastante cercanos a los esperados teóricamente, resultaron curvas ajustadas a los modelos matemáticos y en concordancia a los parámetros relevantes, como el valor de AEV que concuerda completamente con la distribución granulométrica que tienen los ripios estudiados. Se confecciono las curvas mediante el ajuste de Fredlund & Xing, ya que diversos autores ya habían realizado la comparación de métodos y sin lugar a dudas es el que mejor se adapta a la succión obtenida mediante el método del papel filtro.

Quedo satisfecho con los resultados entregados ya que se logró llevar a cabo la SARC, contribuyendo un granito de arena la investigación de los suelos parcialmente saturados, y por sobre todo abriendo nuevas puertas para la adaptación de métodos utilizados a lo largo de la historia para necesidades modernas. El resultado de la SARC aparece en el horizonte como una nueva herramienta para el diseño y monitoreo de los botaderos de ripios de lixiviación, ya que este ensayo ocupa ácido en vez de agua, tal como se aplica en la realidad a estos suelos.

Analizando y comparando los valores de la SARC con la SWRC podemos notar los efectos que tiene el ácido sulfúrico en los ripios de lixiviación, ya que no solo cambio su límite de saturación aumentando el contenido gravimétrico de agua que puede almacenar la muestra, sino que también la permeabilidad de esta. El coeficiente de permeabilidad es influenciado por la humedad del suelo, así cuando el suelo se encuentra saturado (succión igual a cero) K_ψ pasa a tener un valor máximo y constante. Por otro lado, cuando la humedad del suelo disminuye por efectos naturales (evaporación, drenaje, etc.) o antrópicos (bombeo del agua subterránea) aumenta la succión del suelo, K_ψ es reducido drásticamente, pues es introducido un nuevo potencial que incluye los efectos matriciales que influencian en el movimiento del agua del suelo. La presencia de este potencial significa reducción en la velocidad de percolación debido a que el drenaje ocurre inicialmente en los poros de mayor tamaño, así el agua remaneciente se concentra en forma de meniscos (efectos capilares y absorción) en contacto con las partículas. Luego, el flujo es transferido para los poros de menor tamaño siendo necesarios gradientes muy grandes y tiempos extensos para detectar el movimiento del agua en el suelo.

11 Bibliografía

Aitchison, G. (1961). Relationships of Moisture Stress and Effective Stress Functions in Unsaturated Soils. *Golden Jubilee of the International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering: Commemorative Volume*.

Al-Khafaf, S., & Hanks, R. J. (1974). Evaluation of the filter paper method for estimating soil water potential. *Soil Science*, *117*(4). https://doi.org/10.1097/00010694-197404000-00003

Al Haj, K. (2013). Mechanical response of two plastic clay soils from Sudan. *Phd thesis*, *November*, 363.

Alfaro Soto, M. (2008). Geotecnia en suelos no saturados. *Revista de la Academia Colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales*, *32*(125), 471–482.

ASTM D5298-16. (2016a). Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. *Astm International*, *04.08*, 1–6.

ASTM D6836-16. (2016). Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Chararcteristic Curve for Desorption Using a Hanging Column , Pressure Extractor , Chilled Mirror Hygrometer , or Centrifuge. En *ASTM International*.

Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussière, B., & Chapuis, R. P. (2003). A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. *Canadian Geotechnical Journal*, *40*(6), 1104–1122. https://doi.org/10.1139/t03-054

Aubertin, M., Ricard, J. F., & Chapuis, R. P. (1998). A predictive model for the water retention curve: application to tailings from hard-rock mines. *Canadian Geotechnical Journal*, *35*(1), 55–69. https://doi.org/10.1139/t97-080

Bamberg, S. A., & Van Zyl, D. (1986). Probabilistic risk analysis in waste disposal - an integrated approach. *Geotechnical and geohydrological aspects of waste management. Proc. 8th symposium, Fort Collins, 1986, (Balkema)*, 399–406.

Benson, C. H., & Bosscher, P. J. (1999). Time-domain reflectometry (TDR) in geotechnics: a review. *ASTM Special Technical Publication*, *1350*, 113–136. https://doi.org/10.1520/stp13313s

Bicalho, K. V, Gomes Correia, A., Ferreira, S., & Marinho, F. A. M. (2007). Filter paper method of soil suction measurement Método del papel de filtro para la medida de la succión del suelo. *XIII Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.

Bishop, A. W. (1959). The principle of effective stress. *Teknik Ukeblad*, *39*.

Bocking, K. A., & Fredlund, D. G. (1979). USE OF THE OSMOTIC TENSIOMETER TO MEASURE NEGATIVE PORE WATER PRESSURE. En *Geotechnical Testing Journal* (Vol. 2, Número 1, pp. 3–10). https://doi.org/10.1520/gtj10583j

Bouma, J. (1989). *Using Soil Survey Data for Quantitative Land Evaluation* (pp. 177–213). https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3532-3_4

Bouyoucos, G. J., & Mick, A. H. (1941). Comparison of Absorbent Materials Employed in the Electrical Resistance Method of Making a Continuous Measurement of Soil Moisture under Field Conditions. *Soil Science Society of America Journal*, *5*(C), 77–79. https://doi.org/10.2136/sssaj1941.036159950005000c0014x

Brooks, R., & Corey, A. (1964). Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Papers, Colorado State University*, *3*(March), 37 pp.

Brüll, L., Komlos, K., & Majzlan, B. (1980). Early shrinkage of cement pastes, mortars, and concretes. *Matériaux et Constructions*, *13*(1), 41–45. https://doi.org/10.1007/BF02474020

Brutsaert, W. (1966). Probability laws for pore-size distributions. *Soil Science*, *101*(2), 85–92. https://doi.org/10.1097/00010694-196602000-00002

Bulut, R., Lytton, R. L., & Wray, W. K. (2001). Soil suction measurements by filter paper. *Expansive Clay Soils and Vegetative Influence on Shallow Foundations*, *November*, 243–261. https://doi.org/10.1061/40592(270)14

Bumb, A. C., & McKee, C. R. (1984). Use of a computer model to design optimal wellfields for dewatering coal seams for methane production. *Society of Petroleum Engineers - SPE Unconventional Gas Recovery Symposium, UGR 1984*, 281–285. https://doi.org/10.2118/12859-ms

Burdine, N. T. (1953). Relative Permeability Calculations From Pore Size Distribution Data. *Journal of Petroleum Technology*, *5*(03), 71–78. https://doi.org/10.2118/225-g

Campbell, G. S. (1974). A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Science*, *117*(6), 311–314. https://doi.org/10.1097/00010694-197406000-00001

Chandler, R. J., & Gutierrez, C. I. (1986). The filter-paper method of suction measurement. *Geotechnique*, *36*(2), 265–268. https://doi.org/10.1680/geot.1986.36.2.265

Chen, Y. (2018). Soil–Water Retention Curves Derived as a Function of Soil Dry Density. *GeoHazards*, *1*(1), 3–19. https://doi.org/10.3390/geohazards1010002

Collis-George, N. (1967). A filter-paper method for determining the moisture characteristics of soil. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, *7*(25), 162–167. https://doi.org/10.1071/EA9670162

Corey, A. T., & Laliberte, G. E. (1967). Hydraulic properties of disturbed and undisturbed soils. *ASTM Special Technical Publication*, 56–71. https://doi.org/10.1520/STP47259S

DEKA, R. N., WAIRIU, M., MTAKWA, P. W., MULLINS, C. E., VEENENDAAL, E. M., & TOWNEND, J. (1995). Use and accuracy of the filter-paper technique for measurement of soil matric potential. *European Journal of Soil Science*, *46*(2). https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1995.tb01831.x

Delage, P., Suraj de Silva, G. P. R., & De Laure, E. (1987). Un nouvel appareil triaxial pour les sols non saturés. *IXème Conf. Eur. Mécanique des Sols et Travaux de Fondations*, *1*(January 1987), 26–28.

Dineen, K., Colmenares, J. E., Burland, J. B., & Ridley, A. M. (1999). Suction and volume changes of a bentonite-enriched sand. *Proceedings of the ICE - Geotechnical Engineering*, *137*(4), 197–201. https://doi.org/10.1680/geng.1999.137.4.197

Escario, V., & Sáez, J. (1986). The shear strength of partly saturated soils. *Geotechnique*, *36*(3), 453–456. https://doi.org/10.1680/geot.1986.36.3.453

Fredlund, D. G., Gan, J. K. M., & Gallen, P. (1995). Suction measurements on compacted till specimens and indirect filter paper calibration technique. *Transportation Research Record*, *1481*.

Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., & Widger, R. A. (1978). SHEAR STRENGTH OF UNSATURATED SOILS. *Canadian Geotechnical Journal*, *15*(3), 313–321. https://doi.org/10.1139/t78-029

Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). An overview of unsaturated soil behavior. *ASCE Specialty Series on Unsaturated Soil Properties*, 31.

Fredlund, D. G., Xing, A., Fredlund, M. D., & Barbour, S. L. (1996a). The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, *33*(3), 440–448. https://doi.org/10.1139/t96-065

Fredlund, D.G., & Xing, A. (1994). *Fredlund & Xing, 1994, Equations for the soil-water characteristic*

curve.pdf (p. 12). CAN. GEOTECH. J. VOL. 31, 1994.

Fredlund, Delwyn G. (2000). The 1999 R.M. Hardy Lecture: The implementation of unsaturated soil mechanics into geotechnical engineering. *Canadian Geotechnical Journal*, *37*(5), 963–986. https://doi.org/10.1139/t00-026

Fredlund, Delwyn G., & Morgenstern, N. R. (1977). STRESS STATE VARIABLES FOR UNSATURATED SOILS. *ASCE J Geotech Eng Div*, *103*(5), 447–466. https://doi.org/10.1061/ajgeb6.0000423

Fredlund, Delwyn G., & Pham, H. Q. (2006). *A Volume-Mass Constitutive Model for Unsaturated Soils in Terms of Two Independent Stress State Variables*. *40802*(December 2020), 105–134. https://doi.org/10.1061/40802(189)4

Fredlund, Delwyn G., Rahardjo, H., & Fredlund, M. D. (2012). Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice. En *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. https://doi.org/10.1002/9781118280492

Fredlund, Delwyn G., & Wong, D. K. H. (1989). Calibration of thermal conductivity sensors for measuring soil suction. *Geotechnical Testing Journal*, *12*(3), 188–194. https://doi.org/10.1520/gtj10967j

Fredlund, M. D., Wilson, G. W., & Fredlund, D. G. (2002). Use of the grain-size distribution for estimation of the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, *39*(5), 1103–1117. https://doi.org/10.1139/t02-049

Gan, J. K. M., Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1988). Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test. *Canadian Geotechnical Journal*, *25*(3), 500–510. https://doi.org/10.1139/t88-055

Gardner, R. (1937). A method of measuring the capillary tension of soil moisture over a wide moisture range. *Soil Science*, *43*(4), 277–283. https://doi.org/10.1097/00010694-193704000-00004

Gee, G. W., Campbell, M. D., Campbell, G. S., & Campbell, J. H. (1992). Rapid Measurement of Low Soil Water Potentials Using a Water Activity Meter. *Soil Science Society of America Journal*, *56*(4), 1068–1070. https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600040010x

Greacen, E. L., Walker, G. R., & Cook, P. G. (1989). Procedure for the filter paper method of measuring soil water suction. *Divisional Report - CSIRO Australia, Division of Soils*, *108*.

Gulhati, S. K., & Satija, B. S. (1981). Shear strength of partially saturated soils. *Soil mechanics and foundation engineering. Proc. 10th international conference, Stockholm, June1981. Vol. 1, (A.A.Balkema)*, 609–612. https://doi.org/10.1016/0148-9062(83)91364-5

Hamblin, A. P. (1981). Filter-paper method for routine measurement of field water potential. *Journal of Hydrology*, *53*(3–4). https://doi.org/10.1016/0022-1694(81)90011-1

Hamilton, J. M., Daniel, D. E., & Olson, R. E. (1981). MEASUREMENT OF HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF PARTIALLY SATURATED SOILS. *ASTM Special Technical Publication*, 182–196. https://doi.org/10.1520/stp28324s

Houston, S. L., Houston, W. N., & Wagner, A. M. (1994). Laboratory filter paper suction measurements. *Geotechnical Testing Journal*, *17*(2). https://doi.org/10.1520/gtj10090j

INAP-GARD. (2014). *GARDGuide*. The International Network for Acid Prevention (INAP) Guide 2014.

Khanzode, R. M., Vanapalli, S. K., & Fredlund, D. G. (2002). Measurement of soil-water characteristic curves for fine-grained soils using a small-scale centrifuge. *Canadian Geotechnical Journal*, *39*(5), 1209–1217. https://doi.org/10.1139/t02-060

Khire, M. V., Benson, C. H., & Bosscher, P. J. (2000). Capillary Barriers: Design Variables and Water

Balance. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *126*(8), 695–708. https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2000)126:8(695)

Kossoff, D., Dubbin, W. E., Alfredsson, M., Edwards, S. J., Macklin, M. G., & Hudson-Edwards, K. A. (2014). Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*, *51*(December 2014), 229–245. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.09.010

Kovacs, G. (1981). *Seepage hydraulics.* https://doi.org/10.1016/0022-1694(84)90254-3

Lambe, T. W., D'Appolonia, D. J., Karlsrud, K., & Kirby, R. C. (1972). PERFORMANCE OF THE FOUNDATION UNDER A HIGH EMBANKMENT. *J Boston Soc Civ Eng*, *59*(2), 71–92.

Landriault, D., Johnson, J. M., & Palkovits, F. (2005). Thickened tailings and paste technology: The future of industrial waste disposal. *2005 SME Annual Meeting: Got Mining - Preprints*, 899–908.

Lee, H. C., Wray, W. K., Pomper, P. S., & Bratton, W. L. (1990). *Field monitoring of moisture conditions in expansive soils*. https://doi.org/10.1016/0148-9062(92)92318-7

Lee, R. K. C., & Fredlund, D. G. (1984). MEASUREMENT OF SOIL SUCTION USING THE MCS 6000 SENSOR. *National Conference Publication - Institution of Engineers, Australia*, *84 /3*, 50–54.

Leong, E. C., He, L., & Rahardjo, H. (2002). Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements. *Geotechnical Testing Journal*, *25*(3). https://doi.org/10.1520/gtj11094j

Leong, E. C., Tripathy, S., & Rahardjo, H. (2003). Total suction measurement of unsaturated soils with a device using the chilled-mirror dew-point technique. *Geotechnique*, *53*(2), 173–182. https://doi.org/10.1680/geot.2003.53.2.173

Likos, W. J., & Lu, N. (2004). Hysteresis of Capillary Stress in Unsaturated Granular Soil. *Journal of Engineering Mechanics*, *130*(6), 646–655. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(2004)130:6(646)

Manahiloh, K. N., Muhunthan, B., & Likos, W. J. (2016). Microstructure-Based Effective Stress Formulation for Unsaturated Granular Soils. *International Journal of Geomechanics*, *16*(6). https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000617

Marinho, F. A. M., & Chandler, R. J. (1993). Aspects of the behavior of clays on drying. *Unsaturated Soils*, 77–90.

McKee, C. R., & Bumb, A. C. (1987). FLOW-TESTING COALBED METHANE PRODUCTION WELLS IN THE PRESENCE OF WATER AND GAS. *SPE Formation Evaluation*, *2*(4), 599–608. https://doi.org/10.2118/14447-PA

Meilani, I., Rahardjo, H., Leong, E. C., & Fredlund, D. G. (2002). Mini suction probe for matric suction measurements. *Canadian Geotechnical Journal*, *39*(6), 1427–1432. https://doi.org/10.1139/t02-101

Meza, V. (2005). Influencia De La Succion Matricial En El Comportamiento Deformacional De Dos Suelos Expansivos. *Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellin*, *71*.

Musso, J., & Suazo, G. (2019). Determinación de la curva de retención de agua para relaves multimetálicos de la industria minera de Chile. *Obras y proyectos*, *25*, 22–29. https://doi.org/10.4067/s0718-28132019000100022

Narasimhan, T. N. (2007). Central Ideas of Buckingham (1907): A Century Later. *Vadose Zone Journal*, *6*(4), 687–693. https://doi.org/10.2136/vzj2007.0080

Oldecop, L. A., Garino, L., Muñoz, J. J., Rodriguez, R., & García, C. (2011). Unsaturated behaviour of mine tailings in low precipitation areas. *Unsaturated Soils - Proceedings of the 5th International*

Conference on Unsaturated Soils, *2*(July 2014), 1425–1430. https://doi.org/10.1201/b10526-225

Oldecop, L., & Rodríguez, R. (2007). Liquefacción de los relaves mineros: Riesgo ambiental. *Universidad Nacional de San Juan. Instituto Geologico Y Minero De Espana*, *July*, 10.

Oldecop, L., Zabala, F., Pacheco, R., & Libardi, L. (2008). Funcionamiento hidráulico, estabilidad y mecanismos de rotura de presas de relaves mineros. *Researchgate*, *13*(4), 18–39.

Pereira, J. H. F., & Fredlund, D. G. (2000). Volume Change Behavior of Collapsible Compacted Gneiss Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *126*(10), 907–916. https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2000)126:10(907)

Pham, H. Q., & Fredlund, D. G. (2008). Equations for the entire soil-water characteristic curve of a volume change soil. *Canadian Geotechnical Journal*, *45*(4), 443–453. https://doi.org/10.1139/T07-117

Pham, H. Q., & Fredlund, D. G. (2011). Volume-mass unsaturated soil constitutive model for drying-wetting under isotropic loading-unloading conditions. *Canadian Geotechnical Journal*, *48*(2), 280–313. https://doi.org/10.1139/T10-061

Pham, H. Q., Fredlund, D. G., & Barbour, S. L. (2005). A study of hysteresis models for soil-water characteristic curves. *Canadian Geotechnical Journal*, *42*(6), 1548–1568. https://doi.org/10.1139/t05-071

Ramírez Morandé, N. A. (2007). Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Seguridad Minera*, 1–42.

Ridley, A. M., & Burland, J. B. (1994). A new instrument for the measurement of soil moisture suction. *Geotechnique*, *44*(3), 551–556. https://doi.org/10.1680/geot.1994.44.3.551

Ridley, A. M., Dineen, K., Burland, J. B., & Vaughan, P. R. (2003). Soil matrix suction: Some examples of its measurement and application in geotechnical engineering. *Geotechnique*, *53*(2), 241–253. https://doi.org/10.1680/geot.2003.53.2.241

Seed, H. B., & Chan, C. K. (1961). Closure to "Structure and Strength Characteristics of Compacted Clays". *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, *87*(3), 107–110. https://doi.org/10.1061/jsfeaq.0000344

Sernageomin. (2019). *Catastro-de-Faenas-Abandonadas-Actualizado-a-2019* (p. 1).

SERNAGEOMIN. (2018). Estudios de normativas internacionales de diseño, construcción, cierre y post cierre de depósitos de relaves. *Sernageomin*, *4*, 239.

SERNAGEOMIN. (2019). ANUARIO DE LA MINERIA DE CHILE. En *ISSN: 0066-5096 Inscripción: Nº 2020-A-3913 Servicio Nacional de Geología y Minería, Avenida Santa María 0104, Casilla 10465, Providencia, Región Metropolitana de Santiago, Chil: Vol. ISSN: 0066*. Inscripción: Nº 2020-A-3913 Servicio Nacional de Geología y Minería, Avenida Santa María 0104, Casilla 10465, Providencia, Región Metropolitana de Santiago, Chile.

Silvia, A. (2006). Geología y Geotecnia - Permeabilidad de suelos. *Universidad Nacional de Rosario*, 39.

Terzaghi, K. (1943). Theoretical Soil Mechanics. En *Theoretical Soil Mechanics*. https://doi.org/10.1002/9780470172766

Topp, G. C., Davis, J. L., & Annan, A. P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, *16*(3), 574–582. https://doi.org/10.1029/WR016i003p00574

Van Genuchten, M. T. (1980). van_Genuchten1980.pdf. En *Soil. Sci. Soc. Am.* (Vol. 44, Número 5, pp. 892–898).

Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E., & Clifton, A. W. (1996). Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Canadian Geotechnical Journal*, *33*(3), 379–392. https://doi.org/10.1139/t96-060

Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J., & Darius, P. (1989). Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. *Soil Science*, *148*(6), 389–403. https://doi.org/10.1097/00010694-198912000-00001

White, N. F., Duke, H. R., Sunada, D. K., & Corey, A. T. (1970). Physics of Desaturation in Porous Materials. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, *96*(2), 165–191. https://doi.org/10.1061/jrcea4.0000716

Williams, J. R. (1991). The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, United States Environmental Reseach Laboratory. *US GOVERNMENT PRINTING OFFICE*, *1*(December), 1–93.

Wu, S., Gray, D. H., & Richart, F. E. (1984). Capillary effects on dynamic modulus of sands and silts. *Journal of Geotechnical Engineering*, *110*(9), 1188–1203. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1984)110:9(1188)

Xing, A., & Fredlund, D. G. (1994). Fredlund & Xing, 1994, Equations for the soil-water characteristic curve.pdf. *Canadian Geotechnical Journal*, *31*, 12.