UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Repositorio Digital USM **https://repositorio.usm.cl**

Departamento de Arquitectura Arq_paso

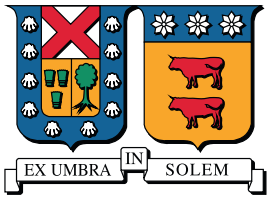
2022-07

Estudio experimental del agrietamiento superficial de relaves mineros mediante el procesamiento digital de imágenes y su relación con las tasas de evaporación y niveles de humedad

Arredondo Villalobos, Evelyn Constanza

https://hdl.handle.net/11673/54037

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL AGRIETAMIENTO SUPERFICIAL DE RELAVES MINEROS MEDIANTE EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES Y SU RELACIÓN CON LAS TASAS DE EVAPORACIÓN Y NIVELES DE HUMEDAD

Tesis de Grado y Memoria de Título presentada por

EVELYN CONSTANZA ARREDONDO VILLALOBOS

como requisito para optar al título de

Ingeniera Civil

y el grado de

Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil

Profesor Guía
GONZALO HERNÁN SUAZO FUENTEALBA

Julio, 2022, Valparaíso, Chile

Hasta que no hayas amado a un animal, parte de tu alma estará dormida.
-Anatole France

Tesis dedicada a mi madre Eliana Villalobos
Y en memoria de mi padre Rigoberto Arredondo

AGRADECIMIENTOS

AL finalizar esta etapa quiero agradecer en primer lugar a Dios por darme las oportunidades de cumplir los sueños que una vez parecían imposibles. De forma especial quiero agradecer a mi madre por siempre empujarme a seguir, sin saber cómo, sólo con la fe y esperanza de luchar por lo que soñamos. A mi padre, por el amor y el apoyo incondicional, un abrazo al cielo.

A Mario, por ser mi compañero de vida desde principio de este largo camino, por ser mi apoyo y cable a tierra. Gracias por cada momento que hemos vivido, por las veces que me levantaste y estuviste ahí, por compartir mis penas y alegrías. A mi Potopé y mi Trace, un ronroneo al cielo de los michis.

A mis amigos y compañeros de universidad, por las risas, la compañía y enseñanzas que nos dejó este largo proceso. En especial a Monje, Joxi, Vale, y Claudio, con quienes compartí largas jornadas de estudio, estrés y trabajo. A Monse y Dani, mis compañeras del programa de magíster, con quienes nos acompañamos en el estudio y laboratorio en pandemia, metiendo mano, y arruinando ensayos en el labotarorio. A Meni, por las jornadas de estudio y los tesitos de conversa.

A las profesoras que tuve durante mi etapa escolar, cada una fue un aporte importante en mi crecimiento, desarrollo personal y académico. En especial, a la Tía Maury, por ser la primera en confiar en mí, sin la cual nada de esto podría haber sido realidad. A la Tía Ingrid, Tía Fabiola, y Tía María Teresa, por enseñarnos y demostrarnos que todas podemos ser parte del mundo de las ciencias e ingeniería. A la Tía Rossana y Tía Marcela, por ser un gran apoyo en mis últimos años de colegio.

A los profesores que fueron parte de mi formación en la UTFSM, y en especial a mi profesor guía Gonzalo Suazo, por la oportunidad de dedicarme al área que me apasiona, por la solidaridad de compartir sus conocimientos y entregarme las herramientas para formarme como profesional. Por la confianza y paciencia en el desarrollo de esta investigación.

A Víctor, por el apoyo al inicio de esta investigación, y ser una parte fundamental en la implementación en laboratorio.

Al personal de LEMCO, por apoyarme en el desarrollo del trabajo de laboratorio, por transmitir sus conocimientos y experiencia para poder realizar los ensayos. En especial a don Nelson, quien siempre nos recibió con una sonrisa, por su amabilidad y su buena voluntad

siempre con nosotros.

Finalmente, agradezco el apoyo brindado por la Universidad Técnica Federico Santa María, y la Agencia Nacional de Investigación mediante la Beca de Magíster Nacional ANID convocatoria 2020, ANID-PFCHA/Magíster Nacional/2020-22201339.

Evelyn Constanza Arredondo Villalobos

RESUMEN

EL comportamiento de relaves mineros post-depositación es un fenómeno que ha sido poco estudiado, siendo las principales investigaciones existentes desarrolladas durante las últimas dos décadas. Esto, es un periodo bastante reciente comparado con los inicios de la actividad minera y la generación de residuos sólidos. Estas investigaciones se han centrado en algunos aspectos específicos, tales como la infiltración, la evaporación, precipitación de sales y/o condiciones geométricas. Además, se han llevado a cabo con bajos Contenidos de Sólidos (CS) iniciales, es decir, simulando relaves convencionales, con altos contenidos de agua. A nivel nacional, Chile tiene una amplia y desarrollada industria minera, lo cual explica la alta cantidad de depósitos de relaves mineros activos, inactivos o abandonados, distribuidos a lo largo del país. Sin embargo, el estudio de la desecación en relaves mineros nacionales es aun incipiente.

En la literatura se ha reportado que, una vez que los relaves son depositados, éstos comienzan a sufrir una serie de procesos que pueden afectar variables de interés, tales como las tasas de infiltración y/o los cambios volumétricos, lo cual puede, a su vez, influir significativamente en las densidades de depositación, y en la capacidad de almacenamiento de un depósito. De acuerdo a Simms et al. (2009), al depositar los relaves éstos disminuyen progresivamente su relación de vacíos, aumentando la densidad mediante los procesos de: sedimentación, consolidación y desecación. Durante este último proceso, la superficie de relaves finos sufre agrietamiento debido a la contracción volumétrica causada por la pérdida de agua. Se ha observado que el agrietamiento superficial influye significativamente en las tasa de evaporación al inicio de la desaturación (Fujiyasu et al., 2000). Además, se ha identificado que, las grietas por desecación aumentan la conductividad hidráulica en más de un orden de magnitud en comparación a muestras sin grietas (Rodriguez et al., 2004). Esto ha sido verificado por diversos autores (Ferrer (2011), Konrad and Ayad (1997), Rodríguez et al. (2007)). Además, la desecación y la contracción volumétrica mejoran la respuesta monótona y cíclica del depósito. Los autores han observado que la razón de resistencia cíclica en pasta aumenta casi al doble cuando el grado de saturación cae por debajo del 90 %.

En este contexto, la presente investigación estudia el comportamiento en desecación de tres relaves provenientes de la industria minera nacional, centrándose en la relación entre el agrietamiento superficial y variables tales como el contenido gravimétrico de agua, las tasas de evaporación, succión matricial y desecación. Para llevar a cabo lo anterior, se han planteado y evaluado cuatro índices para cuantificar el nivel de agrietamiento superficial mediante el procesamiento digital de imágenes de relaves en desecación en laboratorio.

Como primera conclusión se destaca que, si bien los relaves son suelos no naturales generados como residuos en las operaciones mineras, éstos se comportan de forma similar a suelos naturales finos con cierto nivel de plasticidad, experimentando agrietamiento por desecación generado principalmente por esfuerzos de tracción y, en menor medida, por esfuerzos de corte. Se observó también que, los relaves estudiados en laboratorio experimentaron los tres procesos teóricos esperados según literatura, esto es: asentamiento, consolidación y desecación. Los resultados demuestran que el patrón de agrietamiento está influenciado por la relación de aspecto, AHR, lo cual coincide con las observaciones de Lakshmikantha et al. (2006) para un suelo natural arcilloso.

Respecto al proceso de agrietamiento, se observó que éste comienza en un estado parcialmente saturado del relave, por debajo de la humedad correspondiente al Valor de Entrada de Aire (AEV), y cercano al Límite Líquido (LL) del material, y finalizó una vez que se alcanzó el Límite de Contracción (LC). Por otro lado, se observó que la tasa de evaporación está influenciada por el agrietamiento superficial, identificando tres puntos característicos: el AEV, el nivel de humedad al abrirse la primera grieta, y el LC. Estos tres puntos definen cuatro etapas en el proceso de desecación del relave. Estas observaciones se mantienen incluso al variar el CS inicial de las muestras, ya que, si bien cambia el AEV, el nivel de humedad inicial, el nivel de humedad al abrirse la primera grieta o al detenerse el cambio volumétrico, la evolución del agrietamiento ocurre de la misma forma, identificándose las cuatro etapas anteriores mencionadas.

Se ha demostrado, mediante los resultados de los índices estudiados que, existe una relación entre el nivel de agrietamiento superficial y el contenido de agua de las muestras en desecación, en las cuales a mayor nivel de agrietamiento superficial menor nivel de humedad presenta la muestra. Esta relación se mantiene incluso al desecar el relave en capas separadas, ya que una vez depositada una capa fresca sobre una ya desecada, la primera absorbe una cantidad significativa de agua, lo que genera que ambas se comporten como una única masa evaporante. Por lo tanto, a priori, cada depósito de relaves podría identificarse con una curva característica según su AHR y su nivel de agrietamiento. Sin embargo, esta hipótesis se debe continuar investigando.

Finalmente, esta investigación constituye un primer acercamiento al estudio del agrietamiento superficial por desecación en relaves chilenos, y sus variables relacionadas. Cuyos resultados pueden aportar al conocimiento del comportamiento post-depositación, y con ello, aportar información que permita mejorar el diseño de las densidades de depositación, curvas de almacenamiento, planes de depositación, y estabilidad físico-químico.

Palabras Claves

Relaves, Agrietamiento, Contenido de Agua, Contenido de Sólidos, Evaporación, Procesamiento Digital de Imágenes.

ABSTRACT

THE post-deposition behaviour of mining tailings is a phenomenon that has been poorly studied, being the focus of research for the last two decades. This is a fairly recent period compared to the beginning of mining activity and the generation of solid wastes. These research have focused on some specific aspects, like infiltration, evaporation, salts precipitation and/or geometric conditions. Moreover, these researches have been carried out with low initial solids contents, that is, simulating conventional tailings, with high water contents. Chile has a wide and developed mining industry, which explains the high number of active, inactive or abandoned tailings facilities located throughout the country. However, the study of desiccation in mining tailings is still incipient.

It has been reported in literature that once the tailings are deposited several processes begin which can affect variables of interest, such infiltration rates and volumetric changes. These can affect also deposition densities and the tailings facility storage capacity. According to Simms et al. (2009), the void ratio decreases and the densities increases continously through the processes: settling, consolidation and desiccation. During this last process, fine tailings surface experiences surface cracking due to the volume contraction caused by water loss. It has been observed that the cracks greatly influence the evaporation rate at the onset of desaturation (Fujiyasu et al., 2000). In the same way, it has been identified that the desiccation cracks rise the hydraulic conductivity in more than one order of magnitude in comparison to samples with no cracks (Rodriguez et al., 2004). This fact has been verified by different authors (Ferrer (2011), Konrad and Ayad (1997), Rodríguez et al. (2007)). Moreover, desiccation and shrinkage improves monotonic and seismic response of the deposit. It has been observed by the authors that the cyclic resistance ratio in paste almost doubles when the saturation degree drops below 90 %.

In this context, this research studies the desiccation behaviour of three tailings from the national mining industry, focusing on the relationship between surface cracking and variables such as gravimetric water content, evaporation rates, matrix suction and desiccation. For this, four indexes have been proposed and assessed to quantify the surface cracking level through digital image processing.

As a first conclusion, it is highlighted that, although tailings are non-natural soils generated from mining operations, they behave in a similar way to fine natural soils with a certain level of plasticity, experiencing cracking due to desiccation generated mainly by tensile stresses and, to a lesser extent, by shear stresses. It was also observed that the tailings studied in the laboratory underwent the three theoretical processes expected according to

the literature, that is: settling, consolidation and desiccation. The results show that the cracking pattern is influenced by the aspect ratio, AHR, which agrees with the observations of Lakshmikantha et al. (2006) for a natural clayey soil.

Regarding the cracking process, it was observed that it begins in a partially saturated state of the tailings, below the water content corresponding to the Air Entry Value (AEV), and close to the Liquid Limit (LL), and ended once the Shinkage Limit (SL) was reached. On the other hand, it was observed that the evaporation rate is influenced by surface cracking, identifying three characteristics points: the AEV, the water content at the opening of the first crack, and the SL. These three points define four stages in the tailings dewatering process. These observations are maintained even when the initial solid content varies, since, even though the AEV varies, the initial water content, the water content when the first crack opens or when the volumetric change stops, the evolution of the cracking occurs in the same way, identifying the same four previous stages mentioned.

It has been shown, through the results of the studied indexes, that there is a relationship between the level of surface cracking and the water content of the drying samples, in which the higher the level of surface cracking, the lower the level of moisture in the sample. This relationship is maintained even when the tailings are dewatered in separate layers, since once a fresh layer is deposited on top of an already desiccated one, the first one absorbs a significant amount of water, which causes both to behave as a single evaporating mass. Therefore, a priori, each tailings deposit could be identified with a characteristic curve according to its AHR and its level of cracking. However, this hypotesis should be further investigated.

Finally, this research constitutes a first approach to the study of surface desiccation cracking in chilean tailings, and its related variables. Whose results can contribute to the knowledge of post-deposition behaviour, and with it, provide information that allows improving the design of deposition densities, storage capacity curves, deposition plans, and physical-chemical stability.

Keywords

Tailings, Cracking, Water Content, Solids Content, Evaporation, Digital Image Processing.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS i

RESUMEN iii

ABSTRACT v

ÍNDICE DE FIGURAS ix

ÍNDICE DE TABLAS xiii

ABREVIACIONES xiv

SIMBOLOGíA xv

1. INTRODUCCIÓN 1
- 1.1. Introducción . . . 1
- 1.2. Objetivo General . . . 6
- 1.3. Objetivos Específicos . . . 6
- 1.4. Alcances y Limitaciones . . . 6
- 1.5. Estructura de la Tesis . . . 7

2. ESTADO DEL ARTE 8
- 2.1. Agrietamiento en Suelos . . . 8
- 2.2. Mecanismo de Desecación . . . 10
- 2.3. Comportamiento de Relaves Post-Depositación . . . 15
- 2.4. Curva de Contracción . . . 23
- 2.5. Curva de Retención de Agua . . . 24
- 2.6. Estudios Previos . . . 26
- 2.7. Procesamiento Digital de Imágenes . . . 32
  - 2.7.1. Introducción . . . 32
  - 2.7.2. Formación de Imagen Digital . . . 34
  - 2.7.3. ImageJ . . . 37
    - 2.7.3.1. Descripción de ImageJ . . . 38
    - 2.7.3.2. Filtros . . . 39
    - 2.7.3.3. Segmentación . . . 40
    - 2.7.3.4. Macros . . . 42

2.7.3.5. Complementos 42

3. METODOLOGíA **46**
3.1. Caracterización de Materiales 46
3.1.1. Propiedades Índice 47
3.1.2. Curva de Contracción 49
3.2. Preparación de Muestras 50
3.3. Banco Experimental 51
3.4. Programa Experimental 53
3.5. Campaña a Terreno 57

4. PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES EN IMAGEJ **60**
4.1. Descripción de Fotografías 60
4.2. Procesamiento Digital de Imágenes Implementado 60
4.3. Automatización 63
4.4. Medición del Nivel de Agrietamiento 65
4.4.1. Índice I 65
4.4.2. Índice II 65
4.4.3. Índice III 65
4.4.4. Índice IV 66

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN **67**
5.1. Límite de Contracción 67
5.2. Comportamiento de Relaves Post-Depositación 74
5.3. Patrón de Agrietamiento y Relación de Aspecto 76
5.4. Patrón de Agrietamiento y Contenido de Agua 79
5.5. Patrón de Agrietamiento y Contenido de Sólidos Inicial 85
5.6. Tasas de Evaporación 95

6. CONCLUSIONES **100**
6.1. Resumen 100
6.2. Conclusiones 100
6.3. Trabajo Futuro 104

A. PUBLICACIONES GENERADAS **105**

B. CÓDIGOS DE COMUNICACIÓN EN PYTHON **106**

C. CÓDIGO RUTINAS EN IMAGEJ **112**

REFERENCIAS **115**

Índice de figuras

1.1. a) Agrietamiento Superficial en un Depósito de Relaves de Hierro en Chile, b) Agrietamiento Superficial en una Arcilla Limosa de Barcelona (Lakshmikantha et al., 2012) 5

2.1. Agrietamiento Superficial Observado en un Suelo Arcilloso en Clima Seco. 10
2.2. a) Variación del Contenido de Agua con la Profundidad, b) Variaciones Estacionales Típicas de la Succión Matricial con la Profundidad (Morris et al., 1992). 12
2.3. Ejemplo de Grietas Principales y Secundarias en un Relave de Granulometría Fina. 12
2.4. Esquema de Factores y Fenómenos que Afectan la Operación de un Depósito de Relaves (Rodríguez, 2019). 16
2.5. Curva de Contracción Típica de un Suelo Tipo Arcilla. 17
2.6. Fenómenos Post-depositación en Depósitos de Relaves con Depositación Multicapa (Simms, 2021). 18
2.7. Ilustración Esquemática del Proceso de Agrietamiento. Modificado de Konrad and Ayad (1997). 19
2.8. Esquema Transversal del Proceso de Secado-Evaporación de un Suelo (Pacheco and Oldecop, 2011). 20
2.9. Comparación de las Tasas de Evaporación AE/PE versus la Succión Total para Tres Tipos de Suelos con la Curva Teórica de la Ecuación 2.2. Modificado de Wilson et al. (1997). 21
2.10. Ejemplo de la Curva de Contracción (Simms et al., 2007). 22
2.11. Variación del Coeficiente Efectivo de Difusión de Oxígeno con la Saturación usando el modelo de Millington-Quirk (Simms, 2021). 23
2.12. Estructura Típica de la SWRC. 25
2.13. Estructura Típica de la SWRC Según Tipo de Suelo (Fredlund and Rahardjo, 1993). 26
2.14. Influencia de la Densidad del Suelo en el Comportamiento de la SWRC. Modificado de Simms (2021). 26
2.15. Influencia del Contenido de Sólidos Inicial de Relaves en el Comportamiento de la SWRC (Musso, 2018). 27
2.16. Datos Conjuntos de Humedad de Agrietamiento en Función de la Humedad Inicial (Ávila, 2004). 28

2.17. Agrietamiento de Tres Capas de Diferentes Espesores Desecadas en Laboratorio Bajo Diferentes Condiciones de Humedad Relativa (HR) y Temperatura Constante de 22°. I) 4mm, II) 8mm, y III) 16mm. A) HR = 97.8 %, B) HR = 75 %, C) HR = 60 %, D) HR = 15.6 %, y E) $HR_{laboratorio}$ = 60 % (Rodriguez, 2002). 29
2.18. Patrón de Agrietamiento al Final del Proceso de Desecación donde a) Muestra 1 con 1S:1B, y b) Muestra 2 con 5S:1B (Vogel et al., 2005). 30
2.19. Patrón de Agrietamiento Obtenido para Muestras de 8 mm de Espesor, con a) Base Lisa, b) Base con Surcos Circulares, y c) Base con Rejilla Cuadrada (Lakshmikantha et al., 2006). 31
2.20. Caja de Desecación Instrumentada Desarrollada por Daliri et al. (2016). . 32
2.21. Diagrama del Espectro Electromagnético. 33
2.22. Límites Para los Campos Dentro del Procesamiento Digital de Imágenes Propuesto por Gonzalez and Woods (2008). 34
2.23. Espacio Cartesiado 2D de una Imagen Digital de Dimensiones MxN (Solomon and Breckon, 2011). 35
2.24. Representación Espacial de Imágenes en Escala de Grises, y en Color en Formato RGB (Gonzalez and Woods, 2008). 35
2.25. Escala Representativa de la Profundidad de Bits de una Imagen. 36
2.26. Identificación de Forma y Textura en Células Humadas Mutadas (Carpenter et al., 2006). 38
2.27. Interfaz Gráfica de ImageJ 39
2.28. Ejemplo de Vecindad 3x3 en una Imagen en Escala de Grises. 39
2.29. Imagen en RGB Procesada con los Filtros Descritos 41
2.30. Imagen en 8 Bits Procesada con el Método de Umbralización de Otsu . . 42
2.31. Principio de Análisis de Filtros Morfológicos, usando una estructura base circular (B) (Legland et al., 2016). 43
2.32. Ejemplo de Aplicación de Filtro Direccional. a) Imagen Original Representando Células con Microscopía Concofal, b) Resultado Usando una Unidad Base en una Dirección (Dirección Horizontal), c) Unidad Base en una Dirección (Dirección Vertical), d) Unidad Base en dos Direcciones (Horizontal y Vertical), y e) Unidad Base en cuatro Direcciones (Horizontal, Vertical y Diagonales). Modificado de Legland et al. (2016). 44
2.33. Cálculo del Mapa de Distancia Geodésica sobre una Imagen Binaria. a) Imagen Original con el Marcador Destacado en Rojo, b) Resultado del Mapa de Distancia Geodésica donde Colores Cálidos Representan Distancias Largas y Colores Fríos Distancias Cortas. Modificado de Legland et al. (2016). . 44

3.1. Relaves Utilizados en el Estudio, a) MR1 (hierro), b) MR2 (hierro) , y c) MR3 (cobre). 47
3.2. Curvas Granulométricas de Relaves. 48
3.3. Carta de Plasticidad de Relaves. 48
3.4. Curva de Retención de Agua (SWRC). 49
3.5. Set Utilizado para Determinar el Límite de Contracción Acorde al Procedimiento Descrito en ASTM D 4943 - 02 (Gilson Company Inc.). . 50
3.6. Esquema del Cambio Volumétrico Observado en Muestras en Desecación para Curva de Contracción. 50

3.7. Muestra en Desecación para la Medición de la Curva de Contracción del Relave MR1. 51
3.8. Esquema del Banco Experimental Implementado en Laboratorio. . . . 52
3.9. Banco Experimental Implementado en Laboratorio. 53
3.10. Sistema de Monitoreo Fotográfico, donde a)Tarjeta Raspberry Pi 3, b) Módulo de Cámara V2, c) Fuente de Alimentaciónd de 12 V, d) Sensores DHT22, e) Luces Led, y f) Ordenador de Escritorio. 54
3.11. Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV) o dron, Phantom 4 Pro, Utilizado en Terreno. 58
3.12. Agrietamiento Superficial en un Depósito de Relaves del Norte de Chile, del cual se Extrajo las Muestras MR1. 59

4.1. Patrón de Agrietamiento Observado en a) Terreno, y b) Laboratorio. . . 61
4.2. a) Imagen Original en Formato RGB, b) Imagen en Escala de Grises de 8 bit, c) Imagen en Escala de Grises con Reducción de Ruido Utilizando el Filtro Median, d) Imagen Resultante de Filtrar Altas y Bajas Frecuencias con Filtro Pasabanda, e) Máscara Binaria, f) Máscara Binaria con Reducción de Ruido Utilizando un Filtro Median, g) Máscara Binaria Optimizada con un Filtro Morfológico, h) Máscara Esqueleto, i) Bloques Poligonales, y j) Ancho de Grietas. 62
4.3. a) Histograma de Imagen en Escala de Grises, Figura 4.2c), y b) Histograma de Imagen con Filtro Pasabanda, Figura 4.2d). 63
4.4. a) Sección de Grieta en 8bit, b) Línea Central de la Grieta o "Esqueleto" Usada como Marcador, c) Mapa Geodésico de la Sección de Grieta Obtenido como Resultado. 64

5.1. Curva de Contracción para Relave MR1. 68
5.2. Curva de Contracción para Relave MR2. 68
5.3. Curva de Contracción para Relave MR3. 69
5.4. Variación Porcentual de la Relación de Vacíos para Relaves MR1, MR2 y MR3 en Ensayos de Determinación de la Curva de Contracción. 69
5.5. a) Contracción Vertical en Relave MR1, b) Contracción Radial en Relave MR1. 70
5.6. a) Contracción Vertical en Relave MR2, b) Contracción Radial en Relave MR2. 70
5.7. Contracción Vertical en Relave MR3. 71
5.8. Variación del Límite de Contracción Respecto al Contenido de Sólidos Inicial en Relaves MR1 y MR2. 72
5.9. a) Grado de Saturación en Relave MR1, b) Densidad Seca en Relave MR1. 73
5.10. a) Grado de Saturación en MR2, b) Densidad Seca en Relave MR2. . . 73
5.11. a) Grado de Saturación en MR3, b) Densidad Seca en Relave MR3. . . 73
5.12. Proceso de Desecación Observado en relave MR3, a) MR3-1 AHR = 267, b) MR3-2 AHR = 133. 75
5.13. Geometría del Agrietamiento Observado en los Ensayos de Desecación en Laboratorio: a) MR1-15a, b) MR2-7a. 76
5.14. Proceso de Agrietamiento Observado en MR1, a) MR1-7 AHR = 138, b) MR1-5 AHR = 572, c) MR1-15a AHR = 618. 77
5.15. Proceso de Agrietamiento Observado en MR2, a) MR2-9 AHR = 188, b) MR2-5 AHR = 304, c) MR2-8a AHR = 710. 78

5.16. Ensayos Multicapa con a) MR1-13 $AHR_{capa1} = 695$, $AHR_{capa2} = 340$, $AHR_{capa3} = 225$, b) MR1-12 $AHR_{capa1} = 664$, $AHR_{capa2} = 332$, $AHR_{capa3} = 223$, c) MR1-15 $AHR_{capa1} = 618$, $AHR_{capa2} = 300$, $AHR_{capa3} = 196$. . 79
5.17. Ensayos Multicapa con a) MR2-10 $AHR_{capa1} = 656$, $AHR_{capa2} = 285$, $AHR_{capa3} = 187$, b) MR2-11 $AHR_{capa1} = 710$, $AHR_{capa2} = 292$, $AHR_{capa3} = 186$. 80
5.18. Relación entre AHR y a) Distancia Promedio Entre Grietas, y b) Ancho Promedio de Grietas, para Relave MR1. 80
5.19. Relación entre AHR y a) Distancia Promedio Entre Grietas, y b) Ancho Promedio de Grietas, para Relave MR2. 80
5.20. a) Resultados de Laboratorio al Final de la Desecación para MR1, b) Patrón de Agrietamiento Desarrollado en el Depósito de Relaves de MR1. . . . 81
5.21. Contenido de Agua de las Muestras en Desecación para Relave MR1 versus a) Índice I, b) Índice II, y c) Índice III. 82
5.22. Contenido de Agua de las Muestras en Desecación para Relave MR2 versus a) Índice I, b) Índice II, y c) Índice III. 83
5.23. Contenido de Agua de las Muestras en Desecación para Relave MR1 versus Índice IV. 84
5.24. Influencia de la Relación de Aspecto en el Agrietamiento Máximo Observado para a) Relave MR1, y b) Relave MR2. 84
5.25. Succión Matricial en las Muestras en Desecación para Relave MR2 versus a) Índice I, b) Índice II, y c) Índice III. 86
5.26. Agrietamiento Final en Relave MR1 con Variación en el Contenido de Sólidos Inicial: a) CS = 75 %, b) CS = 70 %, c) CS = 65 %, d) CS = 60 %, e) CS = 55 %. 87
5.27. Agrietamiento Final en Relave MR2 con Variación en el Contenido de Sólidos Inicial: a) CS = 64 %, b) CS = 60 %, c) CS = 56 %, d) CS = 52 %, e) CS = 48 %, f) CS = 44 %. 88
5.28. Contenido de Agua de las Muestras en Desecación para Relave MR1 a Distintos CS Inicial versus a) Índice I, b) Índice II, y c) Índice III. . . . 90
5.29. Contenido de Agua de las Muestras en Desecación para Relave MR2 a Distintos CS Inicial versus a) Índice I, b) Índice II, y c) Índice III. . . . 91
5.30. Influencia del Contenido de Sólidos Inicial en a) Humedad de Agrietamiento, b) Agrietamiento Máximo. 92
5.31. Influencia del Contenido de Sólidos Inicial en a) Relación de Vacíos Inicial, b) Relación de Vacíos Final. 92
5.32. Influencia del Contenido de Sólidos Inicial en a) Densidad Seca Inicial, b) Densidad Seca Final. 93
5.33. Influencia del Contenido de Sólidos Inicial en la Contracción Volumétrica para a) MR1, y b) MR2. 94
5.34. Relación de Vacíos versus Densidad Seca para a) MR1, y b) MR2. 94
5.35. a) Tasas de Evaporación para MR1, b) Tasas de Evaporación para MR2, c) Comparación AE/PE Teórico y Experimental para MR2. 96
5.36. Tasas de Evaporación versus Contenido de Agua para a) MR1-6, y b) MR1-8. 97
5.37. Tasas de Evaporación versus Contenido de Agua para a) MR2-1, y b) MR2-3. 97
5.38. Tasas de Evaporación versus Contenido de Agua para Muestras Preparadas a Distintos CS Inicial a) MR1, y b) MR2. 99

Índice de tablas

1.1. Número de Depósitos de Relaves Clasificados por Tipo, año 2020. Fuente: SERNAGEOMIN. 3

3.1. Resumen de Caracterización y Clasificación de Relaves en Estudio. 47
3.2. Valor de Entrada de Aire para Relaves en Estudio. 49
3.3. Resumen de Programa de Ensayos de Una Capa para Relave MR1. 55
3.4. Resumen de Programa de Ensayos de Una Capa para Relave MR2. 55
3.5. Resumen de Programa de Ensayos de Una Capa para Relave MR3. 56
3.6. Resumen de Programa de Ensayos multicapa para Relave MR1. 56
3.7. Resumen de Programa de Ensayos de multicapa para Relave MR2. 57
3.8. Resumen de Programa de Ensayos con Variación de Sólidos Inicial para Relave MR1. 57
3.9. Resumen de Programa de Ensayos con Variación de Sólidos Inicial para Relave MR2. 58

5.1. LC Definido para Relaves MR1 y MR2. 72

ABREVIACIONES

Mayúsculas

AHR	: Relación de Aspecto (Area to Height Ratio)
AE	: Tasa de Evaporación Real (Actual Evaporation)
AE/PE	: Evaporación Relativa
AEV	: Valor de Entrada de Aire (Air Entry Value)
CIF	: Factor de Intensidad de Agrietamiento
CS	: Contenido de Sólidos
EM	: Espectro Electromagnético
FFT	: Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform)
HR	: Humedad Relativa
IP	: Índice de Plasticidad
LL	: Límite Líquido
LP	: Límite Plástico
LC	: Límite de Contracción
MR1	: Muestra Relave 1
MR2	: Muestra Relave 2
MR3	: Muestra Relave 3
NP	: No Plástico
PAF	: Potencial de Formación de Ácido (Potential Acid Forming)
PE	: Tasa de Evaporación Potencial (Potential Evaporation)
S	: Grado de Saturación
SERNAGEOMIN	: Servicio Nacional de Geología y Minería
SWRC	: Curva de Retención de Agua (Soil Water Retention Curve)
USCS	: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Unified Soil Classification System)
WA	: Western Australia
ZNS	: Zona de Saturación Parcial o Zona No Saturada

Minúsculas

e	: Relación de Vacíos
w	: Contenido Gravimétrico de Agua

SIMBOLOGÍA

$\varepsilon_{\mathbf{a}}$: Deformación axial
$\varepsilon_{\mathbf{r}}$: Deformación radial
λ : Longitud de onda
$\rho_{\mathbf{s}}$: Densidad seca
$\rho_{\mathbf{w}}$: Densidad del agua
$\sigma_{\mathbf{t}}$: Resistencia a la tracción del suelo
ψ : Succión matricial
$\psi_{\mathbf{cr}}$: Succión matricial crítica
$\psi_{\mathbf{o}}$: Succión osmótica
$\psi_{\mathbf{t}}$: Succión total, $\psi_{\mathbf{t}} = \psi + \psi_o$
$\mathbf{a_{sh}}$: Parámetro de ajuste de la curva de contracción
$\mathbf{b_{sh}}$: Parámetro de ajuste de la curva de contracción
$\mathbf{c_{sh}}$: Parámetro de ajuste de la curva de contracción
e : Relación de vacíos
h : Espesor de muestras en desecación [mm]
p : Parámetro de ajuste de la curva de deformación axial
q : Parámetro de ajuste de la curva de deformación axial
r : Parámetro de ajuste de la curva de deformación axial
s : Parámetro de ajuste de la curva de deformación radial
t : Parámetro de ajuste de la curva de deformación radial
u : Parámetro de ajuste de la curva de deformación radial
v : Volumen molar del agua
w : Contenido gravimétrico de agua
AE : Tasa de evaporación real o medida (Actual Evaporation)
$\mathbf{G_s}$: Gravedad específica de los sólidos del suelo
HR : Humedad relativa ambiental
$\mathbf{I_1}$: Índice de Agrietamiento n°1
$\mathbf{I_2}$: Índice de Agrietamiento n°2
$\mathbf{I_3}$: Índice de Agrietamiento n°3
$\mathbf{I_4}$: Índice de Agrietamiento n°4
PE : Tasa de evaporación potencial (Potential Evaporation)
R : Constante de los Gases
$\mathbf{S_0}$: Grado de saturación inicial
T : Temperatura ambiental

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

LA industria minera representa un sector relevante en el desarrollo de Chile, llegando incluso a ser considerado como un agente macroeconómico de dinamización de la economía y la producción. Al año 2020 la participación de la minería alcanzó el 12.5 % del PIB, manteniéndose como uno de los principales pilares económicos del país, incluso durante la pandemia causada por el COVID-19 (Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), 2021). Actualmente, en Chile se producen siete minerales metálicos según los registros de SERNAGEOMIN: cobre, molibdeno, oro, plata, hierro, plomo y zinc (Consejo Minero, 2021).

Según el origen de la roca extraída, el mineral se puede encontrar en forma de óxidos o sulfuros. La obtención del mineral en presencia de sulfuros se realiza mediante una planta de concentración húmeda, la cual involucra una primera etapa de chancado de la roca, generando como residuos materiales granulares denominados ROM (Run of Mine). El material que pasa la etapa de chancado se reduce en la etapa de molienda y luego avanza a las etapas de flotación, clasificación y espesamiento (Dirección de Estudios y Políticas Públicas, 2020). El residuo final de este proceso se conoce como Relave Minero, los cuales se almacenan en estructuras especialmente diseñadas para contener los desechos, generalmente de forma permanente, llamados Depósitos de Relaves. Éstos se dividen en cinco diferentes clases, según se detalla a continuación:

i) Embalse de relaves: Corresponde a aquel depósito donde el muro de contención está construido con material de empréstito compactado y se encuentra impermeabilizado tanto en el coronamiento como en su talud interno. La impermeabilización puede ser realizada con un material natural de baja permeabilidad (ej, bentonita) o con material sintético (ej, geomembranas de alta densidad). Los relaves se depositan directamente en la cubeta a un bajo contenido de sólidos en peso (CS), alrededor de un 30 % - 55 % (Watson et al., 2010). Por lo anterior, suelen denominarse como Relaves Convencionales. El bajo CS permite que en superficie se forme la Laguna de

Aguas Claras al decantar naturalmente los sólidos finos de la pulpa de relaves. También se le denomina Embalses de Relaves a aquellos depósitos ubicados en alguna depresión del terreno en que no se requiere la construcción de un muro de contención (Decreto Supremo 248, 2007).

II) Tranque de relaves: Un tranque de relaves es aquel depósito en el cual el muro está construido utilizando la fracción gruesa del relave, denominada Arenas. Para ello, el relave integral debe pasar por un proceso de hidrociclonado, en el cual se separa la fracción gruesa de la fracción fina por medio de impulsión por flujo de agua. La fracción fina se denomina Lama, y es almacenado en la cubeta del tranque. Al igual que en un embalse de relaves, se depositan relaves con un bajo CS, por lo que se forma la laguna de aguas claras en la cubeta. Sin embargo, ésta debe mantenerse lo más alejada posible del muro de contención con el fin de evitar humectar demasiado el muro y evitar su saturación, el consecuente aumento de la presión de poros y el eventual colapso (Decreto Supremo 248, 2007). Actualmente, la mayoría de depósitos de relaves en Chile corresponden a tranques (Tabla 1.1).

III) Depósitos de relaves espesados: Los relaves espesados corresponden a aquellos que, antes de ser depositados son sometidos a un proceso de sedimentación mediante espesadores de cono profundo o de alta densidad, eliminando así un porcentaje significativo de agua. Según indica el Decreto Supremo 248, un depósito de relaves espesados debe ser construido de tal forma que se impida que el relave fluya a otras áreas distintas a las del emplazamiento determinado. Los relaves se depositan generalmente con un CS en peso entre 50 % y 70 % (Watson et al., 2010), y pueden ser bombeados usando bombas centrífugas. Dado lo anterior, los relaves tienden a generar una leve pendiente al ser depositados, formando una superficie cónica.

IV) Depósitos de relaves en pasta: Los relaves en pasta son aquellos que presentan una situación intermedia entre los relaves espesados y los relaves filtrados, con un CS en peso entre 70 % y 85 % (Watson et al., 2010). Para lograr dicha consistencia los relaves convencionales deben deshidratarse en espesadores de pasta especializados, o en espesadores de alta densidad, para lograr una densidad del material que pueda ser bombeada.

V) Depósitos de relaves filtrados: Corresponde al depósito en donde los relaves antes de ser depositados son sometidos a un proceso de filtración mediante métodos de vacío o presión, para obtener una concentración de sólidos en peso superior al 85 % (Watson et al., 2010). Por lo anterior, el material deshidratado requiere ser transportado mediante camiones o cinta transportadora, y los depósitos de relaves filtrados reciben el nombre de "torta seca" o "torta de filtración".

Según el CS con que son depositados los relaves, Rodríguez (2019) describe tres tipos:

I) Slurry: aquellos relaves que no se someten a tratamiento antes de ser depositados.

II) Pasta: corresponde a un slurry espesado.

III) Torta: corresponde a un slurry filtrado.

En la presente investigación, se ensayan muestras de relaves depositadas a diferentes CS, desde valores correspondientes a relaves convencionales, hasta relaves en pasta. Sin embargo,

dado que los materiales difieren en sus propiedades geotécnicas y geoquímicas, a un mismo CS dos relaves de faenas diferentes presentan densidades diferentes. Dado lo anterior, en este documento se hará referencia a relaves preparados en slurry, identificando cada muestra con el CS inicial al cual fue preparada.

Tabla 1.1: Número de Depósitos de Relaves Clasificados por Tipo, año 2020. Fuente: SERNAGEOMIN.

Tipo	Cantidad	Porcentual
Total	757	100 %
Tranque	606	80.05 %
Embalse	122	16.11 %
Filtrado	16	2.12 %
Espesado	6	0.79 %
En Pasta	5	0.66 %

En los últimos años ha aumentado progresivamente la demanda de minerales, con lo cual ha aumentado también la producción de desechos mineros. Al mismo tiempo, la concentración de mineral presente en las rocas ha disminuido paulatinamente en los yacimientos actuales, por lo cual cada vez disminuye la ley del mineral a la vez que aumenta la cantidad de desechos producidos. Según estimaciones, en Chile las faenas mineras actuales generan relaves a una tasa de 530 millones de toneladas al año que cubren extensas áreas, acumulando, hasta el presente aproximadamente 24 mil millones de toneladas en el territorio nacional (Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), 2021).

A nivel mundial, la generación de residuos mineros excede con creces el volumen total de materiales que mueve anualmente la Ingeniería Civil. Adicionalmente, los depósitos de relaves mineros suelen tener una vida útil significativa, comúnmente mayor a 20 años, mientras que una vez realizado el cierre de las operaciones, dichos depósitos permanecerán a perpetuidad sobre la superficie de la tierra (ICOLD 121, 2001). En muchos tipos de minería (ej, metales básicos , metales preciosos, minería de superficie de arenas petrolíferas, bauxita), se utilizan grandes cantidades de agua en el procesamiento de minerales. El agua lubrica el proceso de molienda y facilita otros procesos de extracción o separación utilizados en otros tipos de minería, como la flotación (Wills, 2006). El alto contenido de agua también facilita el transporte de la mezcla de mineral de una unidad a otra dentro del molino o planta. En consecuencia, los relaves salen convencionalmente del molino con un contenido de agua muy alto, muy por encima del límite líquido de estos materiales (Vick, 1990). El volumen de agua depositada junto con los relaves es sustancial: en una mina de roca dura que opera a 100,000 ton por día, el contenido de agua al 100 % implica que se depositarán 100,000m^3 de agua junto con los relaves, una cantidad mayor que el uso doméstico de una ciudad de 1 millón de personas en América del Norte (Simms, 2017). Por otro lado, la deshidratación natural de los relaves en los depósitos es lenta debido al pequeño tamaño de partícula, predominantemente del tamaño de limos, a menudo con una fracción sustancial del tamaño de arcillas.

Dado lo anterior, uno de los principales desafíos de la industria minera consiste en el uso eficiente del recurso hídrico, el cual como ya es conocido, se encuentra en una grave crisis, siendo reconocido por el Foro Económico Mundial como uno de los tres primeros riesgos mundiales (Dirección de Estudios y Políticas Públicas, 2020). Por ello, la tendencia avanza a aumentar la tasa de recirculación de las aguas en los distintos procesos involucrados, tales como en la concentradora o en el depósitos de relaves.

La recuperación de agua de los relaves es, de hecho, un importante motor económico para deshidratar los relaves antes de la depositación, especialmente en climas áridos donde el costo del agua es alto. Otra motivación para deshidratar los relaves antes de la depositación es eliminar o limitar las consecuencias de una falla. Las fallas son más comunes en las estructuras de relaves aguas arriba, donde los propios relaves sirven como base de la presa (Berti et al. 1988; Chandler y Tosatti 1995; Martin y McRoberts 2002). Sin embargo, ya sea en sentido ascendente o no, la susceptibilidad de los relaves a la pérdida rápida de resistencia es lo que da lugar a largos períodos de tiempo y, por consiguiente, grandes impactos después de una ruptura de la presa (Davies et al. 2002). Se ha postulado que esto se debe a un comportamiento de colapso bajo la carga sin drenar que se sabe que ocurre en las arenas sueltas (Sladen et al. 1985) y en las arenas limosas (Yamamuro y Lade 1998; Hyde et al. 2007), con la consecuencia de que ese comportamiento de colapso puede manifestarse en la fracción de arena segregada o en los relaves integrales. En cualquier caso, está claro que los relaves depositados en slurry son susceptibles de una pérdida sustancial de resistencia, ya sea por carga cíclica o por un cambio en la carga estática inducida por un aumento en el nivel freático o la ruptura de la presa. Tales fallas a menudo han resultado en zonas afectadas (run-outs) muy extensas con efectos devastadores (Simms, 2017).

En el caso específico de Chile, si bien existen diversas técnicas de deshidratación que buscan reducir el contenido de agua en los relaves previo a su depositación, la gran mayoría de relaves se depositan aun con un alto contenido de agua, es decir, un bajo CS. Si bien la geometría resultante de la superficie del depósito puede variar dependiendo del tipo de relave (convencional y/o en pasta, filtrado), debido a la depositación en diferentes tiempos y ciclos de secado, los relaves resultan siempre en una depositación multicapa, en la cual relaves frescos se van depositando sobre relaves anteriores, que ya sufrieron procesos como evaporación y desecación. Debido a ello, forman una estructura estratificada, con un alto contenido de agua y con presencia de grietas que pueden influir tanto en las tasas de infiltración como de evaporación.

Por su parte, el comportamiento de los relaves post-depositación ha sido poco estudiado. Diversos autores concuerdan en que una vez que los relaves son depositados se pueden identificar al menos tres fenómenos diferentes que ocurren en los momentos posteriores a la descarga de relaves y que resultan en una disminución de la cantidad de agua retenida por el material y en un aumento en su densidad: sedimentación, consolidación y desecación (Simms et al., 2009). La consolidación es un proceso dependiente del tiempo en el cual el suelo disminuye su volumen mientras que aumenta el esfuerzo efectivo producto de la disipación del exceso de presión de agua en los poros. La sedimentación, por otro lado, se considera una etapa previa de asentamiento, cuando no se han desarrollado esfuerzos efectivos entre partículas de suelo, donde la interacción de estas partículas se ve gobernada por su peso propio, decantando en el fondo las más pesadas y formándose en superficie una pequeña

a) b)

Figura 1.1: a) Agrietamiento Superficial en un Depósito de Relaves de Hierro en Chile, b) Agrietamiento Superficial en una Arcilla Limosa de Barcelona (Lakshmikantha et al., 2012)

capa de agua. Sin embargo, no hay consenso sobre el punto exacto en el que el proceso de sedimentación se convierte en un proceso de consolidación (Hurtado, 2018). Por su parte, la desecación es el mecanismo natural mediante el cual la consolidación de la superficie de los relaves se incrementa aun más producto de la ocurrencia de dos mecanismos: contracción y formación de grietas en superficie (Robinsky (1999), Simms et al. (2009)). Es por ello que durante la desecación, puede reducirse considerablemente la relación de vacíos de los relaves frescos, aumentando la capacidad de almacenamiento del depósito (Blight, 1988). A partir de lo anterior, se considera que el proceso de desecación está íntimamente ligado con la contracción del material, siendo controlado principalmente por la tasa de evaporación superficial en el depósito de relaves.

El agrietamiento superficial durante el proceso de desecación de los relaves tiende a ocurrir en aquellos cuya granulometría es más bien fina y con cierto nivel de plasticidad, producto de la contracción volumétrica que experimentan al perder agua. En la Figura 1.1 se presentan dos fotografías del agrietamiento superficial observado en un depósito de relaves y en un suelo natural arcilloso, donde se puede apreciar el patrón de agrietamiento similar en ambas imágenes. Además, estudios anteriores han demostrado que las grietas tienen una influencia significativa en la velocidad de evaporación una vez que el relave comienza a desaturarse (Fujiyasu et al., 2000). Del mismo modo, se ha identificado que las grietas por desecación aumentan la conductividad hidráulica en más de un orden de magnitud en comparación con muestras sin grietas (Rodriguez et al., 2004). Esto último ha sido corroborado por distintos autores (Ferrer (2011), Konrad and Ayad (1997), Rodríguez et al. (2007)). Por lo tanto, el agrietamiento superficial en los relaves se vuelve un factor importante que puede influir en la estabilidad física y química de los depósitos.

Con base en lo anterior, resulta de especial interés estudiar el agrietamiento superficial en depósitos de relaves ubicados en territorio nacional, ya que, con base en estudios de diversos autores se ha establecido una posible relación entre éste y fenómenos que ocurren en los suelos en desecación, como los procesos de evaporación, consolidación, infiltración, y estabilidad físico-química. A nivel nacional, interesa estudiar estos fenómenos, y su aplicación

técnica mediante el desarrollo de nuevas tecnologías. Es allí donde nace la motivación de llevar el procesamiento digital de imágenes a la industria minera.

Actualmente, el procesamiento digital de imágenes se utiliza para aplicaciones en diversas áreas, tales como aplicaciones industriales, ciencias médicas, biometría e identificación, agricultura, ganadería, satélites de observación terrestre, entre otras. Además, el costo de estas tecnologías está permitiendo cada vez un acceso más democrático a sus herramientas, y el desarrollo de las mismas permite una búsqueda de información más eficiente y eficaz en los procesos de análisis de imágenes. Por lo anterior, esta investigación se enfoca en los procesos de desecación y agrietamiento superficial en relaves chilenos mediante el procesamiento digital de imágenes.

1.2. Objetivo General

El objetivo general de esta investigación comprende el estudio y caracterización experimental del fenómeno de desecación y agrietamiento superficial de relaves provenientes de la industria minera nacional explorando la influencia y relación de los procesos de agrietamiento superficial, desecación y evaporación en los niveles de humedad.

1.3. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos del presente trabajo son:

- Establecer una relación entre el contenido de agua superficial de relaves en desecación, y las tasas de evaporación, succión matricial y agrietamiento superficial.
- Estudiar el comportamiento no saturado de relaves finos, y su relación respecto a la succión matricial y cambios volumétricos.
- Identificar los mecanismos de agrietamiento superficial por desecación en relaves, y su relación con parámetros característicos del material.
- Desarrollar una metodología para ensayos de desecación y agrietamiento superficial en laboratorio sin perturbar las muestras.
- Implementar un banco experimental que permita simular las condiciones de terreno y monitorear continuamente mediante cámaras en el rango visible de la luz cada ensayo.
- Aplicar técnicas de procesamiento digital de imágenes para evaluar el comportamiento bajo desecación de los relaves.

1.4. Alcances y Limitaciones

La investigación desarrollada como parte del trabajo de tesis abarca el estudio en desecación en laboratorio de tres relaves provenientes de la industria minera nacional. Lo anterior no contempla el desarrollo de la investigación de campo en los depósitos de relaves correspondientes debido a la pandemia causada por el COVID-19.

El estudio del comportamiento en desecación de los relaves comprende la relación entre los procesos de agrietamiento superficial, desecación y evaporación, no considerando en ello

los procesos de infiltración entre capas, o por canales de flujo preferentes formados por grietas, o los efectos de altas concentraciones de sales.

Por su parte, el proceso de desecación en relaves se simuló en laboratorio con condiciones ambientales secas, similares a las encontradas en la zona centro-norte de Chile. Por lo anterior, los resultados no consideran el efecto de ciclos de humectación y secado en los procesos de desecación, agrietamiento superficial y evaporación.

Dado que el agrietamiento superficial es el foco de la investigación, las muestras de relaves se ensayaron sin perturbar la superficie expuesta a desecación, con el fin de no alterar el patrón de agrietamiento o inducir nuevas grietas por la instalación de instrumentación.

El procesamiento digital de imágenes desarrollado para el análisis del agrietamiento superficial se realiza en un nivel medio a alto, es decir, obteniendo información a partir de imágenes. Sin embargo, dicha información requiere el ajuste manual de las rutinas de procesamiento digital de imágenes ajustando parámetros de luz y ruido para cada ensayo en particular. Este procesamiento no incluye técnicas de alta complejidad, por ejemplo Machine Learning, dada la alta cantidad de información de entrada que requieren dichos procesamientos. Sin embargo, este punto constituye una rama abierta significativa a desarrollar en este ámbito.

1.5. Estructura de la Tesis

A continuación, se presenta una breve descripción de los seis capítulos que conforman esta tesis:

- **Capítulo 1:** Introducción. Presenta el contexto y la motivación de la problemática en estudio.
- **Capítulo 2:** Estado del Arte. Presenta la base teórica, los conceptos claves abordados, y el estado del arte de suelos finos naturales y relaves en desecación.
- **Capítulo 3:** Metodología. Se describe la metodología empleada en la investigación, presentando el programa experimental y una caracterización de los materiales en estudio.
- **Capítulo 4:** Procesamiento Digital de Imágenes en Image J. Presenta un breve estado del arte del procesamiento digital de imágenes aplicado a diversas áreas, incluyendo las funcionalidades y ventajas del programa de código abierto Image J.
- **Capítulo 5:** Resultados y Discusión. Presenta los resultados y el análisis de éstos obtenidos del programa experimental llevado a cabo.
- **Capítulo 6:** Conclusiones. Presenta un resumen y conclusiones generales del estudio, incluyendo desafíos futuros para próximos trabajos en esta línea investigativa.

Capítulo 2

ESTADO DEL ARTE

EN este capítulo se presentan tópicos relevantes y que engloban el desarrollo de la investigación, tales como el comportamiento parcialmente saturado de suelos finos, el comportamiento contractivo de suelos en desecación y el estado del arte actual respecto al comportamiento de relaves mineros. La teoría y los conceptos presentados en este capítulo son la base para la definición del programa experimental y el análisis de los resultados.

2.1. Agrietamiento en Suelos

Actualmente, el agrietamiento en suelos es un fenómeno que no se ha estudiado en profundidad, siendo un área relativamente nueva en la Ingeniería Civil. Recién en las últimas décadas se han realizado investigaciones mediante diversos métodos y procedimientos experimentales que permiten tener un primer acercamiento a este fenómeno. Muchos de ellos enfocados en la influencia de las grietas en el comportamiento estructural de los suelos, y otros en la influencia de las grietas en la agricultura. Por ejemplo, a nivel constructivo bajo una fundación el agrietamiento del suelo puede producir asentamientos debido a la contracción volumétrica; o afectar la capacidad de infiltración, ya que las grietas pueden aumentar su conductividad hidráulica (Serra, 2017). Por su parte, en tierras de regadío, el aumento de la permeabilidad aumenta la demanda de agua y la pérdida de fertilizantes (Bronswijk, 1991), al tiempo que las grietas también dan lugar a canales de flujo preferenciales dentro de la matriz del suelo, siendo una de las principales causas de transporte y difusión de contaminantes (Drumm et al., 1997). En la misma línea, otro ejemplo significativo corresponde al caso en que se utiliza un suelo arcilloso como barrera impermeable para una presa de agua, un depósito de relaves o un vertedero o relleno sanitario. Una sequía intensa puede generar grietas, lo que aumenta la permeabilidad de la barrera y puede crear canales de flujo preferenciales para el agua contaminada (Lakshmikantha et al., 2012), afectando también su estabilidad e integridad (Yesiller et al., 2000).

Parte de la dificultad y el retraso en el estudio del agrietamiento en suelos se explica por las características inherentes de éstos, es decir, son materiales heterogéneos y multifásicos, con un comportamiento dependiente de la historia de carga, el tiempo, la temperatura y el contenido de agua. Por lo anterior, las propiedades físicas y el comportamiento geotécnico

de suelos agrietados difieren bastante a las de un suelo intacto (sin grietas). Sumado a lo anterior, la mayor parte de las investigaciones hasta ahora realizadas se han enmarcado dentro de la mecánica de suelos clásica, considerando que el agrietamiento se desarrolla en suelos completamente saturados o con un grado de saturación muy cercano a 100 %. Sin embargo, investigaciones recientes afirman que el agrietamiento es más bien un problema de la mecánica de suelos no saturados donde la succión juega un rol importante, tal como lo señala Lakshmikantha et al. (2006).

En geotecnia, investigaciones recientes permiten afirmar que el agrietamiento en suelos afecta la compresibilidad (un suelo agrietado es más compresible que el mismo suelo sin grietas al mismo contenido de agua), la tasa de consolidación, la resistencia y la conductividad hidráulica, por lo que gran parte de las construcciones geotécnicas se ven afectadas directa o indirectamente por la presencia de grietas en la masa del suelo. Sin embargo, si el suelo está sometido a ciclos de humectación y secado, aumenta la tasa de sobreconsolidación hacia la superficie, reduciendo la compresibilidad.

Durante el secado de un suelo, además de la recarga superficial que pueda tener por lluvia, puede tener influencia la recarga de agua debido al flujo ascendente de aguas subterráneas hacia la superficie, donde se elimina por evaporación. La recarga de agua subterránea ocurre, en parte, por el agua que llena las grietas. Esta recarga se controla al humedecerse desde la base de la grieta, donde la relación de vacíos y, por lo tanto, la conductividad hidráulica es mayor que cerca de la superficie del suelo. Mientras que el secado es esencialmente un proceso unidimensional (vertical), la humectación es tridimensional, particularmente cuando se recuerda que la conductividad hidráulica horizontal suele ser mayor que la conductividad hidráulica vertical. El agrietamiento puede incluso producir que la recarga de agua subterránea sea más rápida que la disminución del nivel freático, lo cual tiene un impacto considerable en la estabilidad de estructuras geotécnicas (Morris et al., 1992).

En términos de resistencia, Morris et al. (1992) afirma que en arcillas la resistencia al corte a lo largo de la dirección de las grietas a menudo es notablemente menor que la resistencia de la arcilla intacta. Por lo que, en un sentido general, la resistencia al corte en un suelo agrietado depende de la relación entre la orientación de las grietas y la dirección de las tensiones principales. Por lo tanto, la presencia de grietas de desecación cambia el comportamiento del suelo de muchas maneras.

Por su parte, el agrietamiento puede variar dependiendo del tipo de suelo, mineralogía, de las restricciones que tenga la superficie, y del área en que se ubique. Por ejemplo, en áreas con condiciones climáticas más secas probablemente aumentará la frecuencia y el tamaño de la formación de grietas en suelos (Figura 2.1), especialmente en regiones templadas que aun no alcanzan su potencial de contracción completo (Lakshmikantha et al., 2009). En la misma línea, Bronswijk (1988) indica que en suelos arcillosos, la forma, magnitud y patrón de grietas por contracción cambian constantemente a lo largo del año, y que la matriz porosa del suelo tiene una conductividad hidráulica saturada baja. En estos suelos la influencia de los macroporos en el transporte de agua y solutos es importante, pero difícil de cuantificar. Suelos arcillosos se contraen e hinchan constantemente en estrecha relación con los cambios en el contenido de humedad. Esta contracción e hinchazón resulta en el cierre y apertura de grietas y cambios en el espesor de las capas del suelo. Lo anterior da cuenta de la gran variabilidad del agrietamiento en campo, el cual no se puede captar simplemente tomando

medidas en áreas pequeñas, y requeriría de mediciones muy frecuentes para obtener una estimación confiable. A la vez que el costo y la seguridad involucrados en cada expedición de medición manual puede ser un factor prohibitivo que puede obligar a reducir el número de mediciones realizadas, reduciendo con ello la cantidad de información disponible. Es aquí donde la innovación y el uso de nuevas tecnologías puede jugar un rol significativo en la mejora del estudio del agrietamiento en suelos.

Figura 2.1: Agrietamiento Superficial Observado en un Suelo Arcilloso en Clima Seco.

2.2. Mecanismo de Desecación

Como se mencionó anteriormente, el suelo es un material heterogéneo y multifásico, compuesto por los vacíos de aire, agua y las partículas de suelo, las cuales pueden variar tanto en su tamaño como en mineralogía. En un estado completamente saturado, es decir, cuando todos los vacíos entre las partículas de suelo se encuentran llenos de agua, las fuerzas entre partículas de suelo (esfuerzos efectivos) disminuyen debido a que el agua recibe parte la fuerza actuando sobre el suelo. Por el contrario, en un estado completamente seco, en el que todos los vacíos entre partículas están llenos de aire, el esfuerzo efectivo en el suelo es máximo, ya que toda la carga actuando sobre el suelo es resistida por el contacto entre partículas. En el caso intermedio, en el cual los vacíos entre partículas están llenos de aire y agua, se desarrollan presiones negativas o succiones dentro de la red porosa del suelo, lo cual genera un aumento en el esfuerzo efectivo. Ahora, cuando un suelo fino se somete a desecación, las grietas se formarán cuando el contenido de agua haya disminuido lo suficiente como para generar esfuerzos de tracción dentro de la red porosa del suelo y éstos alcancen su resistencia máxima. Para el caso de una arcilla saturada sometida a evaporación, Konrad and Ayad (1997) afirman que ésta experimenta una disminución continua en el contenido de agua y se desarrollan presiones negativas o succiones en la red porosa del suelo. Si el suelo no está restringido, las succiones desarrolladas imponen un aumento en los esfuerzos efectivos, lo que a su vez, produce una disminución en el volumen del suelo por consolidación. La relación entre el contenido de humedad y la proporción de vacíos a menudo

se conoce como las características de contracción de un suelo dado. Esto último cobra vital importancia en el comportamiento de suelos en desecación como se verá en la Sección 2.3.

El nivel de esfuerzo requerido para desarrollar la primera grieta por desecación variará según el tipo de suelo. Así, según lo demuestra Morris et al. (1992), en arcillas con pequeños tamaños de partículas el esfuerzo de tracción requerido para propagar una grieta es mayor que el requerido en limos o en arenas con tamaños de partículas más grandes. El modelo capilar simple sugiere que la succión es inversamente proporcional al radio de los tubos capilares y, por lo tanto, al tamaño de partícula. Por lo tanto, las succiones matriciales pueden ser mayores en suelos con un tamaño de partícula más pequeño. Lo anterior indica que el agrietamiento se produce más fácilmente en materiales de grano fino que en materiales de grano grueso. Más tarde, Vogel et al. (2005) observó que en muestras de suelo con distintas proporciones de arena y bentonita, aquellas muestras con menor contenido de arcilla presentaron un menor nivel de agrietamiento.

Dado que los suelos generalmente se secan desde la superficie hacia abajo, las succiones matriciales serán más grandes en o cerca de la superficie, tal como lo describe Morris et al. (1992), lo que provoca que las grietas por desecación se inicien en la superficie y se propaguen hacia abajo. Si las condiciones climáticas se mantienen constantes el tiempo suficiente para que se alcancen las condiciones de equilibrio completo y un nivel freático constante en el perfil del suelo, la succión matricial disminuirá linealmente con la profundidad desde la máxima succión en superficie hasta cero (presión atmosférica) en el nivel freático. Sin embargo, esta condición rara vez se alcanza en la práctica, y es más común observar una disminución transitoria no lineal de la succión matricial desde un máximo en la superficie hasta cero en el nivel freático, tal como se esquematiza en la Figura 2.2. A medida que avanza la desecación, las grietas comienzan a propagarse hacia abajo en el suelo bajo la influencia de la succión matricial en dirección perpendicular a la de la tensión de tracción máxima. La tensión de tracción en la punta de cualquier grieta dada se reduce por la presencia de grietas adyacentes. Las grietas más largas se ven menos afectadas por esta interacción, ya que el esfuerzo de tracción requerido para propagarse es menor que el requerido para propagar grietas más cortas. En consecuencia, el crecimiento de grietas más pequeñas se retrasa y eventualmente se suprime por el crecimiento de grietas más grandes adyacentes. El agrietamiento se concentra así en una serie de grietas relativamente grandes, llamadas en adelante Grietas Principales. En un campo de esfuerzo horizontal más o menos uniforme debajo del nivel del suelo, las grietas grandes o principales están espaciadas aproximadamente de manera uniforme en cualquier dirección dada. Su orientación inicial en planta es aleatoria. A medida que avanza la desecación y aumentan las succiones matriciales, las grietas principales tienden a crecer tanto en longitud como en profundidad. Su profundidad se ve limitada en última instancia por las crecientes tensiones debidas al peso propio del suelo, y su longitud en planta está limitada por la intersección con otras grietas principales o con grietas secundarias que puedan surgir si se alcanza el nivel de esfuerzos requerido entre dos grietas principales. La Figura 2.3 presenta un ejemplo de grietas principales y secundarias identificadas en terreno.

El comienzo del agrietamiento depende, además, de la mineralogía del suelo, de las condiciones climáticas como temperatura y precipitación, y de la capa vegetal superficial que posea. A un determinado nivel de resistencia, las arcillas de alta plasticidad tienen un mayor contenido de agua que las arcillas de baja plasticidad, por lo tanto experimentan mayores

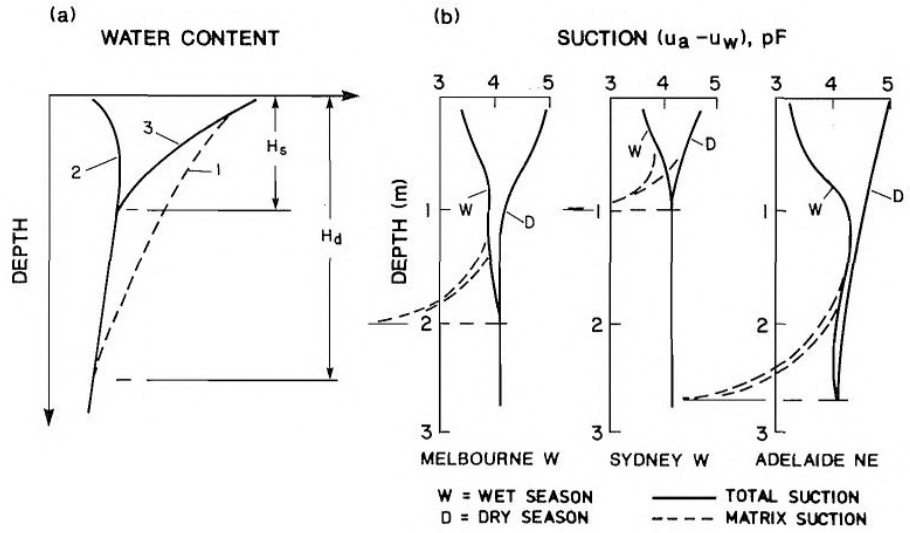


Figura 2.2: a) Variación del Contenido de Agua con la Profundidad, b) Variaciones Estacionales Típicas de la Succión Matricial con la Profundidad (Morris et al., 1992).

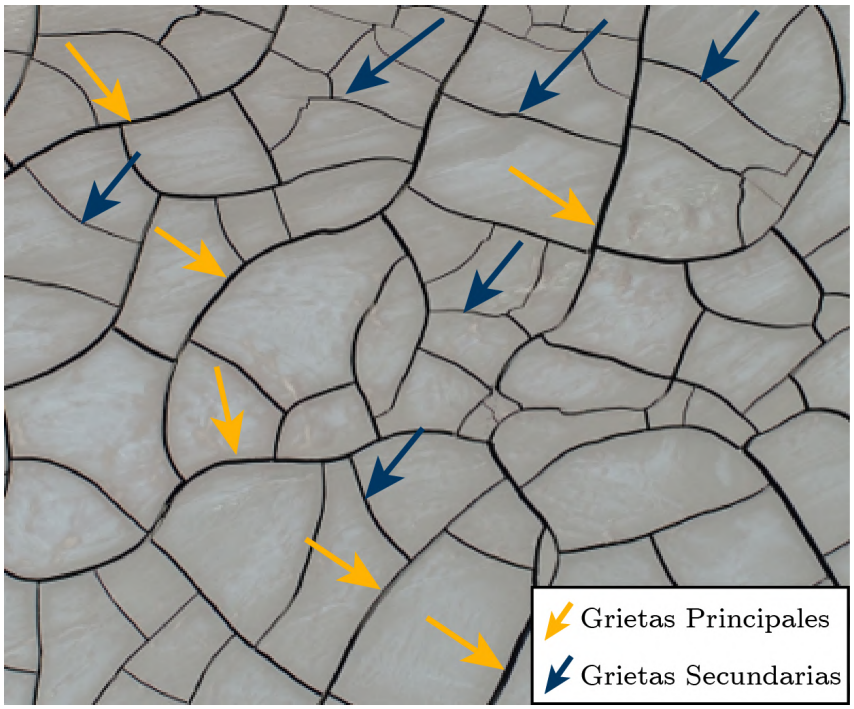


Figura 2.3: Ejemplo de Grietas Principales y Secundarias en un Relave de Granulometría Fina.

contracciones volumétricas durante la desecación. También poseen una mayor cohesión efectiva, c', y una mayor resistencia a la tracción, lo cual conduce a grietas más anchas y profundas en arcillas con plasticidades más altas (Senior, 1981). En la misma línea, altas temperaturas por sí solas no producen grietas anchas y profundas si éstas ocurren durante las estaciones húmedas. Por su parte, las grietas anchas y profundas se asocian con los suelos plásticos y altas temperaturas durante las estaciones secas cuando el nivel freático cae a una profundidad considerable en el perfil del suelo (Morris et al., 1992).

Aunque la orientación de las grietas es aleatoria, Morris et al. (1992) observó que todas se intersectan en ángulos que se aproximan a 90°. Estos patrones de grietas se pueden explicar fácilmente en términos del criterio de propagación de grietas dado anteriormente. La dirección de la tensión de tracción máxima en el suelo en la punta de una grieta de propagación adyacente a una grieta abierta existente debe ser paralela al plano de la grieta, ya que la tensión de tracción perpendicular ha sido aliviada por la fisuración. La dirección de propagación de la grieta que se aproxima se gira progresivamente hacia la grieta existente hasta que finalmente se intersecan a cerca de 90°. A medida que la succión matricial aumenta, los bloques entre las grietas existentes tienden a romperse en piezas más pequeñas. Las grietas secundarias que causan esta ruptura se propagan desde la mitad de los lados más largos de los bloques existentes de suelo sin fisuras, comenzando en la superficie del suelo y propagándose hacia abajo y hacia los lados en un suelo previamente sin fisuras. La dirección inicial de propagación, que tiende a mantenerse bien en la mitad del bloque, es inicialmente perpendicular a la grieta existente. Esta subdivisión de bloques existentes se rige por las condiciones más favorables para el inicio y la propagación de grietas según el criterio de tensión de tracción dado anteriormente. Inicialmente, las tensiones de tracción son más altas en el medio del lado más largo de un bloque existente de suelo formado por una grieta anterior, y las tensiones se incrementan a lo largo del bloque aumentando las succiones. La restricción necesaria para la propagación de grietas es proporcionada por el suelo subyacente que está sujeto a succiones más bajas y, por lo tanto, a deformaciones inducidas por succiones más pequeñas. Las tensiones por peso propio son mínimas (cero) y las succiones son máximas en la superficie superior del bloque, es decir, en la superficie del suelo. El bloque también tiende a perder agua por los lados de la grieta o paredes verticales expuestas por las grietas, por lo que las succiones se maximizan en las esquinas formadas por grietas que se cruzan. A primera vista, esto podría sugerir que el agrietamiento debería propagarse desde las esquinas superiores del bloque donde la desecación es mayor. Sin embargo, estas áreas son las menos restringidas de todo el bloque, y las tensiones se aproximan a la condición isotrópica definida por las succiones. Por lo tanto, no ocurre agrietamiento. A medida que avanza la desecación, un bloque puede subdividirse aún más mediante ocurrencias sucesivas del mismo proceso. La subdivisión se detiene cuando el tamaño decreciente del bloque en planta (y, por lo tanto, la creciente profundidad relativa del agrietamiento) supera las tensiones de restricción en la base del bloque y las succiones matriciales alcanzan el equilibrio con la atmósfera, es decir, cuando se alcanza la máxima succión consistente con las condiciones ambientales.

Investigaciones más recientes observaron en suelos arcillosos en desecación que, además de formarse grietas que se intersectan en ángulos rectos, también se forman intersecciones en ángulos de aproximadamente 120°. Entre ellos, Vogel et al. (2005) estudió el patrón de agrietamiento por desecación en mezclas de arena y bentonita, observando que el agrietamiento se inicia en lugares aleatorios de la superficie en desecación, y que las grietas se propagan

desde sus puntas. Cuando una grieta se encuentra con otra ya existente o en propagación se produce el fenómeno descrito por Morris et al. (1992) en el cual ambas grietas forman un ángulo de 90°. Sin embargo, observó que adicional a este fenómeno se generan ángulos entre grietas en 120°, específicamente cuando una grieta principal se ramifica o bifurca. Así, mediante un análisis estadístico encontró dos máximos para los ángulos de intersección entre grietas: 90° y 120°. Según las observaciones, el máximo de 120° se establece poco después del inicio del agrietamiento, y se mantiene estable durante éste. Mientras que el máximo de 90° se produce en una etapa posterior de la formación de grietas, en la cual grietas que se propagan de forma independiente se intersectan. Por lo que es probable que la ramificación de una grieta en desarrollo forme uniones en Y, mientras que la coalescencia de dos grietas individuales formen uniones en T. En la misma línea, Lakshmikantha et al. (2009) observó un comportamiento similar mediante la desecación de suelos finos cohesivos, yendo un paso más allá en el análisis del fenómeno. Así, afirma que las intersecciones ortogonales parecen formarse debido a fallas por tracción, mientras que las intersecciones no ortogonales, 120°, parecen estar más relacionadas con fallas por corte. Sin embargo, éstas últimas son menos frecuente que las intersecciones ortogonales. De esto se puede concluir que las tensiones de tracción juegan un papel predominante en la formación de grietas, lo cual respalda la necesidad de estudiar más a fondo el agrietamiento en suelos finos como los relaves, y su relación con procesos relevantes como la desecación, evaporación, entre otros. Además, hasta hace poco la resistencia a la tracción en suelos no era muy estudiada, en parte, porque para el diseño se asume un caso conservador en el que el suelo está completamente saturado y no hay esfuerzos de tracción. Sin embargo, los materiales cohesivos como limos y arcillas exhiben tanto resistencia a corte como a tracción. Sin esta última, fenómenos como el agrietamiento por desecación en suelos no saturados no se pueden explicar (Lakshmikantha et al., 2012).

Debido a la desecación, y previo a la formación de grietas, la superficie de las capas de suelo se asientan, disminuyendo la relación de vacíos entre partículas y con ello produciendo un cambio volumétrico. Luego, al iniciar las grietas, éstas se propagan hacia abajo formando columnas de suelo agrietado con una corteza de superficie desecada (Abu-Hejleh and Znidarcic, 1995). Lo anterior ha fomentado en los últimos años el estudio del proceso de desecación en suelos finos mediante ensayos de laboratorio. En ellos, muestras de suelo se han sometido a desecación bajo diversas metodologías, en distintas condiciones ambientales, de contorno y geométricas. Entre ellos destaca el trabajo realizado por Ávila (2004), quien estudió los mecanismos y variables más relevantes que intervienen en el agrietamiento de suelos arcillosos por fenómenos de retracción. Encontró así que, el patrón de agrietamiento final depende principalmente de las condiciones de contorno impuestas por el molde o bandeja en el que se deposita la muestra, y que la ubicación de la grieta y la humedad a la cual se inician depende de manera especial de las restricciones de contracción impuestas por los moldes. Más tarde, Lakshmikantha et al. (2006) estudió el efecto directo de las condiciones de contorno en el agrietamiento de un suelo arcilloso, utilizando para ello moldes circulares y rectangulares de diferentes tamaños y rugosidades para la base (liso, con surcos circulares y con grilla rectangular). Concluyeron de manera similar a Ávila (2004) que el tamaño de la muestra, el grosor y la relación de aspecto tienen una fuerte influencia en el patrón de agrietamiento, en la pérdida total de humedad y en la tasa de pérdida de humedad.

2.3. Comportamiento de Relaves Post-Depositación

Dado el proceso en que se producen los relaves, pasando por una o varias etapas en circuito de molienda fina en las plantas de concentración húmeda, el material resultante generalmente se compone de partículas finas del tamaño de un limo o incluso arcilla, cuyas propiedades químicas y/o mineralógicas variarán dependiendo del tipo de roca que le dio origen. Por lo anterior, al disponer estos residuos en los depósitos de relaves éstos están sujetos también a sufrir agrietamiento por desecación, y con ello, a producirse los mismos efectos que en suelos finos.

Adicionalmente, dada la naturaleza de los relaves, éstos tienen propiedades de consolidación no convencionales, como un alto contenido de agua, alta compresibilidad, baja permeabilidad y resistencia (Abu-Hejleh and Znidarcic, 1995). Por lo que el relave se comportará como un fluido viscoso mientras menor sea su contenido de sólidos, el cual en caso de una falla del depósito se podría esparcir sobre grandes superficies de terreno (Oldecop and Pacheco, 2007). Por otro lado, al someter los relaves a desecación, se inducen cambios en el estado de esfuerzos del suelo, la relación de vacíos puede reducirse considerablemente y variar con ello el volumen de los relaves, lo que genera como consecuencia grietas verticales por desecación (Rodriguez, 2006). Este cambio volumétrico puede aumentar la capacidad de almacenamiento de sólidos de los depósitos (Blight, 1988).

Cuando los relaves son depositados quedan sujetos a una serie de acciones externas derivadas de su interacción con el ambiente, operación y fundación. Tanto en la etapa de operación como en la etapa post-cierre, fenómenos físico-químicos ocurren dentro o alrededor del depósito de relaves, lo cual influye directamente en su estabilidad (Zandarín et al., 2009). En la Figura 2.4 se esquematizan los procesos hidrogeológicos típicos que afectan la seguridad de un depósito de relaves. En estado convencional, el slurry depositado tiene generalmente un contenido de sólidos en peso alrededor de un 30 % - 55 % (Watson et al., 2010), por lo tanto el volumen de agua es relevante para la operación hidráulica del depósito. Diversos autores concuerdan en que una vez depositado el slurry comienza inmediatamente la sedimentación del material, lo que permite una clasificación espontánea de las partículas por tamaño, donde las partículas más gruesas se depositan cerca del punto de vertido, mientras que los finos se transportan hacia áreas más distantes. Durante este proceso, el agua de la mezcla comienza a segregarse de la masa de sólidos, parte de la cual se infiltra a la masa de relaves previamente depositada, mientras que el resto fluye como una escorrentía superficial hacia la laguna de decantación o de aguas claras. Este proceso permite que se forme una playa de baja pendiente por la que los relaves recién vertidos fluyen hacia el centro, donde se ubica la laguna de decantación. Lo cual puede ser un efecto favorable, ya que produce un material con mayor conductividad hidráulica cerca del muro del depósito, ayudando a deprimir el nivel freático y mejorando con ello las condiciones de estabilidad del depósito (Zandarín et al., 2009). Sin embargo, esta segregación de material y agua disminuye su efectividad al aumentar el contenido de sólidos (Blight (1994), Rodríguez et al. (2009)). Simms et al. (2009) detalla un paso más allá el proceso de sedimentación señalando que al encontrarse la mezcla de relave en slurry completamente saturada aun no se desarrollan esfuerzos efectivos de tracción, estando la interacción entre partículas gobernada por su peso propio.

Luego del proceso de sedimentación, Simms et al. (2009) identifica dos procesos adi-

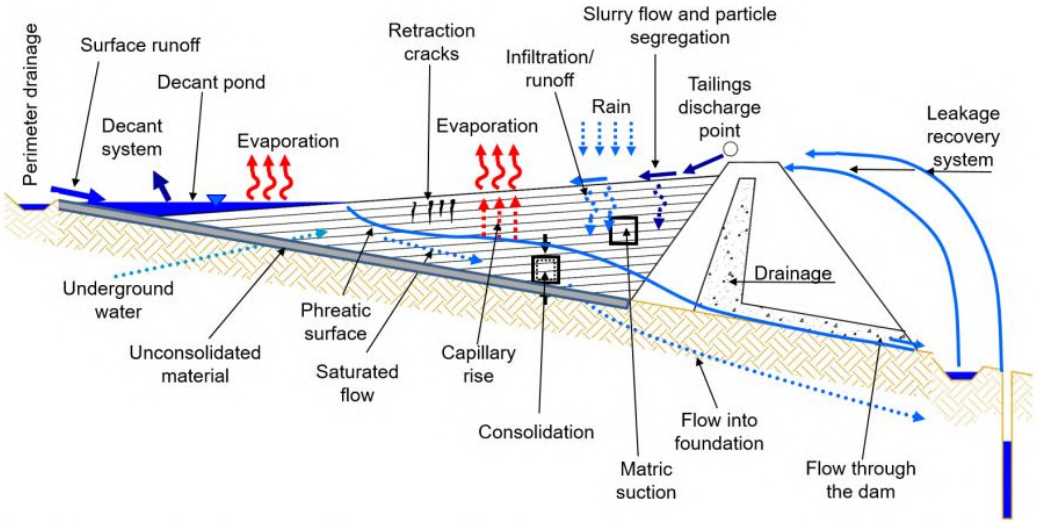


Figura 2.4: Esquema de Factores y Fenómenos que Afectan la Operación de un Depósito de Relaves (Rodríguez, 2019).

cionales que sufren los relaves: consolidación y desecación. La consolidación es un proceso dependiente del tiempo en el cual el suelo disminuye su volumen mientras aumenta el esfuerzo efectivo producto de la disipación del exceso de presión de agua en los poros. Sin embargo, no hay consenso sobre el punto exacto en el que el proceso de sedimentación se convierte en un proceso de consolidación (Hurtado, 2018). Por su parte, la desecación es el mecanismo natural mediante el cual la consolidación de la superficie de los relaves se incrementa aun más producto de la ocurrencia de dos mecanismos: contracción, y formación de grietas en superficie (Robinsky (1999), Simms et al. (2009)). Es por ello que durante la desecación puede reducirse considerablemente la relación de vacíos de los relaves frescos, aumentando así la capacidad de almacenamiento de los depósitos (Blight, 1988). A partir de lo anterior, se considera que el proceso de desecación está íntimamente ligado con la contracción del material, siendo controlado principalmente por la tasa de evaporación superficial en el depósito de relaves. Al sufrir los procesos anteriores, el relave pasa de un estado completamente saturado a uno parcialmente saturado, es decir, se desarrollan presiones negativas o succiones dentro de la red porosa del suelo, tal como se describió en la Sección 2.2 para el caso de suelos naturales finos.

Uno de los primeros estudios del comportamiento contractivo lo realizó Bronswijk (1988) en suelos naturales arcillosos, en el cual identificó tres fases en el proceso contractivo. Más tarde, Konrad and Ayad (1997) coincidieron con sus observaciones, identificando las siguientes tres etapas por las que transita el suelo:

- Etapa I: En la primera etapa, el suelo aun permanece saturado en una amplia gama de contenidos de agua, y la disminución del volumen del suelo es igual a la pérdida de humedad.
- Etapa II: La segunda etapa comienza cuando la tensión capilar alcanza la presión de entrada de aire del suelo (AEV). A medida que el aire entra progresivamente en

la red porosa del suelo, se produce una mayor pérdida de humedad y la fase líquida se vuelve cada vez más discontinua. En esta etapa, la pérdida de humedad es mayor que la disminución del volumen, y la curva de contracción se vuelve progresivamente horizontal, tal como se señala en la Figura 2.5.

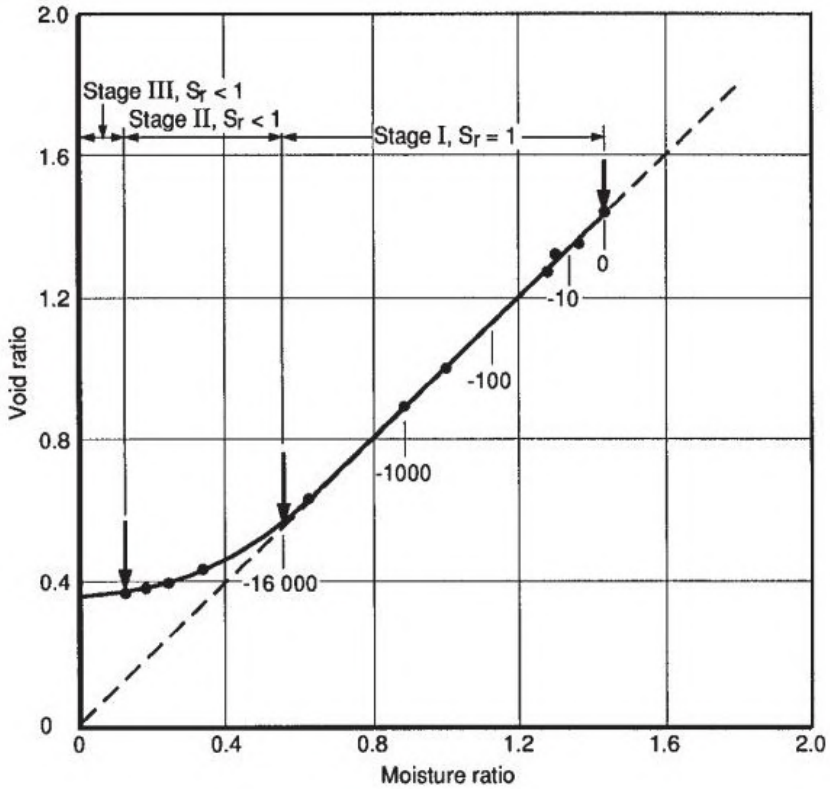


Figura 2.5: Curva de Contracción Típica de un Suelo Tipo Arcilla.

- Etapa III: En la tercera etapa, llamada Etapa de Contracción Cero, el suelo no muestra ningún cambio volumétrico adicional. La pérdida de humedad es igual al aumento en el volumen de aire del suelo.

Respecto al comportamiento de los relaves post-depositación, una de las primeras teorías fue propuesta por Abu-Hejleh and Znidarcic (1995), quienes plantearon cuatro fases consecutivas que corresponden cronológicamente a las fases que experimenta una capa de suelo blando en terreno: consolidación bajo compresión unidimensional, desecación bajo contracción unidimensional, propagación de grietas verticales y liberación de esfuerzos de tracción, y desecación bajo contracción tridimensional.

En el caso de un suelo cohesivo con un alto contenido de arcilla, la etapa de contracción inicial (Etapa I) es importante en comparación con las otras dos etapas. Simms (2021) concuerda con la descripción realizada por Konrad and Ayad (1997), describiendo que los relaves una vez depositados se deshidratan mediante sedimentación y consolidación. Dependiendo

del tipo de mineral, y del grado de humedad inicial de los relaves, las deformaciones en esta primera etapa tienden a ser grandes, con relaciones de vacíos que se reducen desde valores superiores a 2 (a veces tan altos como 5) a cerca de 1. Simultáneamente la capa superior comienza a desaturarse. Luego, con la adición de una nueva capa de relave fresco se manifestarán varios comportamientos, incluido el efecto de peso adicional en los relaves previamente desecados, la aceleración de la consolidación de la nueva capa debido a la rehumectación que ocurre en la capa inferior, y el potencial de colapso inducido por la humectación de las capas inferiores previamente desecadas. En la Figura 2.6 se esquematiza conceptualmente el progreso de la deshidratación de una determinada capa de relaves espesados o filtrados.

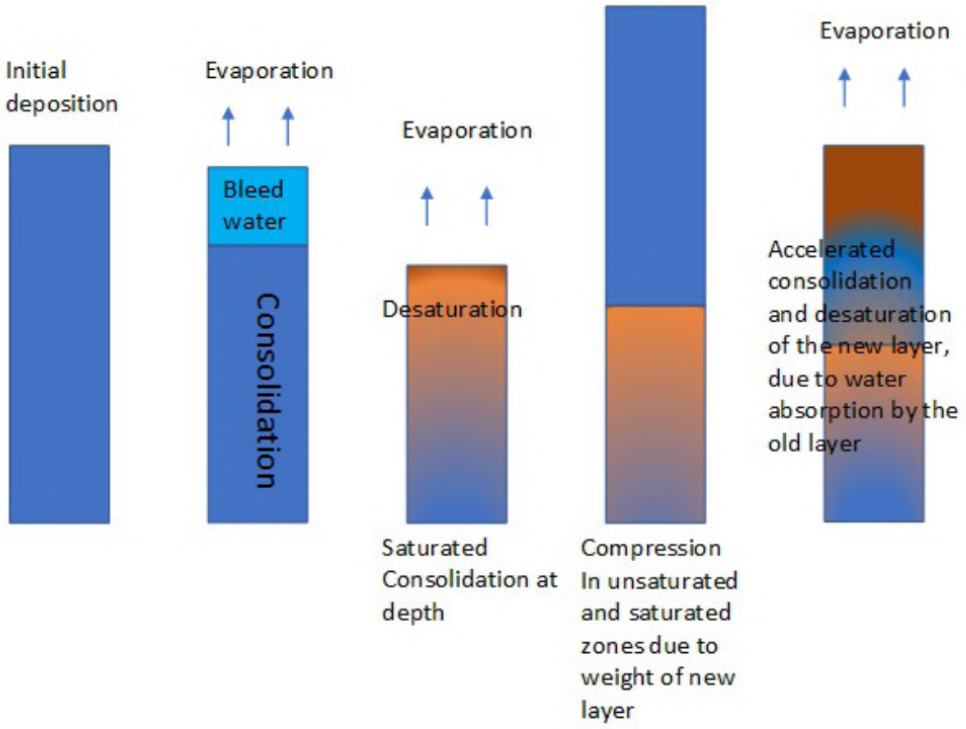


Figura 2.6: Fenómenos Post-depositación en Depósitos de Relaves con Depositación Multicapa (Simms, 2021).

Si bien se ha expuesto que el agrietamiento superficial en suelos finos se explica considerando la resistencia a la tracción, uno de los principales puntos en que difieren diferentes autores respecto al proceso de desecación corresponde al grado de saturación del suelo al momento de alcanzar el límite de contracción (LC), es decir, si el proceso de desecación se desarrolla en un estado saturado o parcialmente saturado. Aun no existe consenso en la literatura respecto a este punto, sin embargo, dada la teoría expuesta en la Sección 2.2 se espera que los suelos finos, en particular los relaves, sean capaces de desarrollar grietas por tracción en un estado parcialmente saturado, basado en observaciones de laboratorio y de campo.

De esta forma, al depositar los relaves en un estado completamente saturado, la sedimentación es el primer proceso en comenzar, seguida por la evaporación de agua superficial. El cambio volumétrico inicialmente es solo vertical (unidimensional), sin sufrir deformaciones horizontales o radiales. A medida que la capa de agua superficial se va evaporando, la fase líquida se va volviendo cada vez más discontinua, alcanzando el valor de entrada de aire (AEV), que marca el punto de inicio del estado parcialmente saturado del suelo. En este punto aun es observable sólo una contracción vertical. Al alcanzar un determinado valor de succión (ψ_{cr}), aparece la primera grieta, la cual define el inicio de la contracción horizontal. A partir de este punto disminuye la tasa de contracción vertical, mientras que la contracción horizontal va en aumento. La propagación de las grietas se va produciendo a medida que se alcanza la resistencia (σ_t) del suelo. Las grietas secundarias aparecerán entre dos grietas principales si la distancia entre ellas es lo suficiente para alcanzar la resistencia del suelo. El cambio volumétrico se detiene cuando el suelo alcanza el límite de contracción (LC). Sin embargo, tanto la evaporación como la succión matricial continúan desarrollándose más allá de este punto. Este proceso se esquematiza en la Figura 2.7.

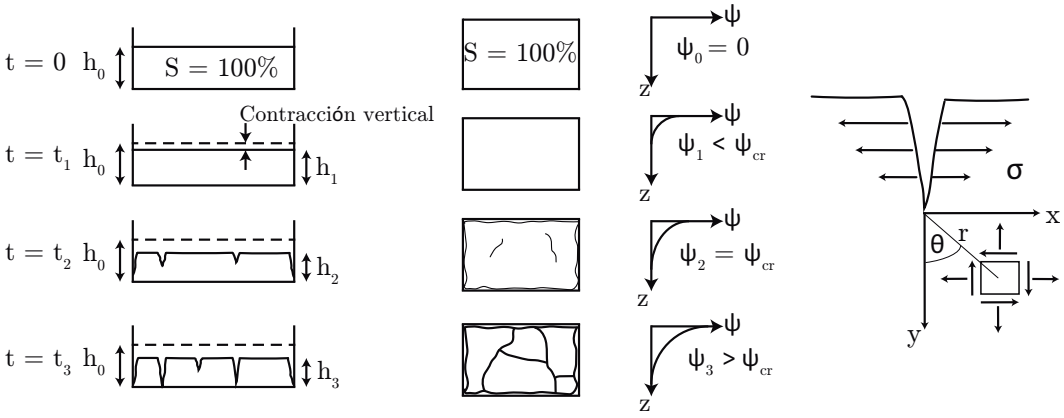


Figura 2.7: Ilustración Esquemática del Proceso de Agrietamiento. Modificado de Konrad and Ayad (1997).

Otro fenómeno de consideración en el proceso de desecación en suelos finos corresponde a la evaporación. Ésta desempeña un rol importante, por ejemplo, en relaves de grano relativamente fino con consolidación lenta, la evaporación puede ayudar a aumentar las tasas de depositación para lograr las densidades necesarias, mientras que los relaves desecados pueden tener mayor resistencia que los relaves no desecados a la misma densidad (Daliri et al., 2016). Sin embargo, por su parte, la evaporación también está influenciada por una gran cantidad de factores. De acuerdo a Pacheco and Oldecop (2011), en un suelo saturado sometido a evaporación la fase líquida pasa a un estado discontinuo en el que se sobrepasa el AEV, por lo que una zona de los relaves pasa a un estado parcialmente saturado (Zona No Saturada, ZNS), la cual pierde agua por evaporación hacia la atmósfera, a la vez que es alimentada por el ascenso capilar desde la superficie freática. A una determinada profundidad dentro de la ZNS se encuentra el frente de evaporación, tal como se señala en la Figura 2.8. Es en este frente de evaporación en el que ocurre el cambio de fase del agua de líquido a gas. Este cambio de fase está gobernado por la relación psicrométrica presentada en la

Ecuación 2.1.

$$R \cdot T \cdot Ln(HR) = -v \cdot (\psi + \psi_o) \tag{2.1}$$

Donde R corresponde a la constante de los gases, T a la temperatura absoluta, HR a la humedad relativa, v al volumen molar del agua (0.018 kg/mol), ψ a la succión matricial, y ψ_o a la succión osmótica determinada por las sales disueltas en el agua. Cuando se cumple la igualdad en la Ecuación 2.1, las fases líquida y gaseosa están en equilibrio. Por el contrario, cuando el primer término de la Ecuación 2.1 es menor que el segundo habrá evaporación. Ésta agrega masa de vapor al aire vecino al frente de evaporación, lo cual produce una elevación local de la HR. Para que este desequilibrio en la Ecuación 2.1 se mantenga y el proceso de desecación continue, ese vapor debe ser removido de la vecindad del frente de evaporación. El principal mecanismo por el cual esto puede ocurrir es por advección, que requiere de un movimiento de aire. Por ello, el viento tiene una influencia drástica en la tasa de evaporación, ya que provoca el reemplazo del aire vecino al frente de evaporación.

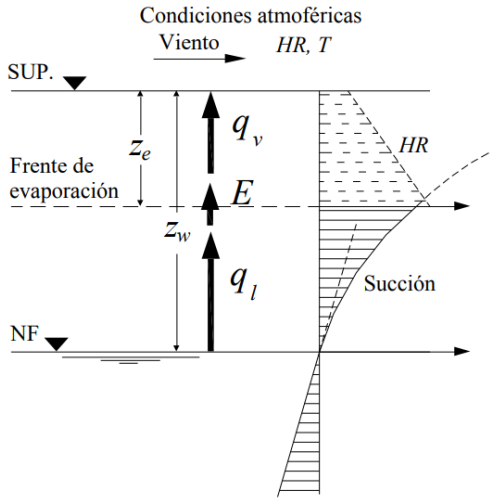


Figura 2.8: Esquema Transversal del Proceso de Secado-Evaporación de un Suelo (Pacheco and Oldecop, 2011).

Diversos autores han identificado distintas etapas durante el proceso de evaporación, tales como Fisseha et al. (2010) y Simms (2017). Quienes afirman que la evaporación es un parámetro crítico para el desempeño geotécnico y geoambiental en pilas de relaves. Clásicamente, la evaporación comienza a la tasa de PE, es decir, que la evaporación relativa (AE/PE) permanece igual a 1, lo que constituye la primera etapa de evaporación. Luego, AE/PE disminuye debido a un aumento en la succión total en la superficie del suelo, la que constituye la segunda etapa de evaporación. El comportamiento anterior puede ser modelado mediante la Ecuación 2.2 (Wilson et al., 1997).

$$\frac{AE}{PE} = \frac{e^{\frac{-\psi_t g \ v}{RT}} - HR}{1 - HR} \tag{2.2}$$

Donde AE corresponde a la tasa de evaporación real o medida, PE a la tasa evaporación potencial, HR a la humedad relativa, R corresponde a la constante de los gases (8.314 J/mol K), T a la temperatura absoluta, g a la aceleración de gravedad (m/s^2), y ψ_t a la succión total. La AE es una función de PE. Mientras ésta última es una función de parámetros climáticos, AE depende de las características hidrogeotécnicas de los relaves, como la compresibilidad, conductividad hidráulica, y la curva de retención de agua (SWRC).

Wilson et al. (1997) contrastó la Ecuación 2.2 con valores experimentales medidos para tres tipos de suelos: arena, limo y arcilla, los cuales se muestran en la Figura 2.9. Se puede comentar al respecto que la ecuación propuesta por Wilson predice razonablemente los valores experimentales para los suelos arenosos y limosos, no así para el suelo arcilloso.

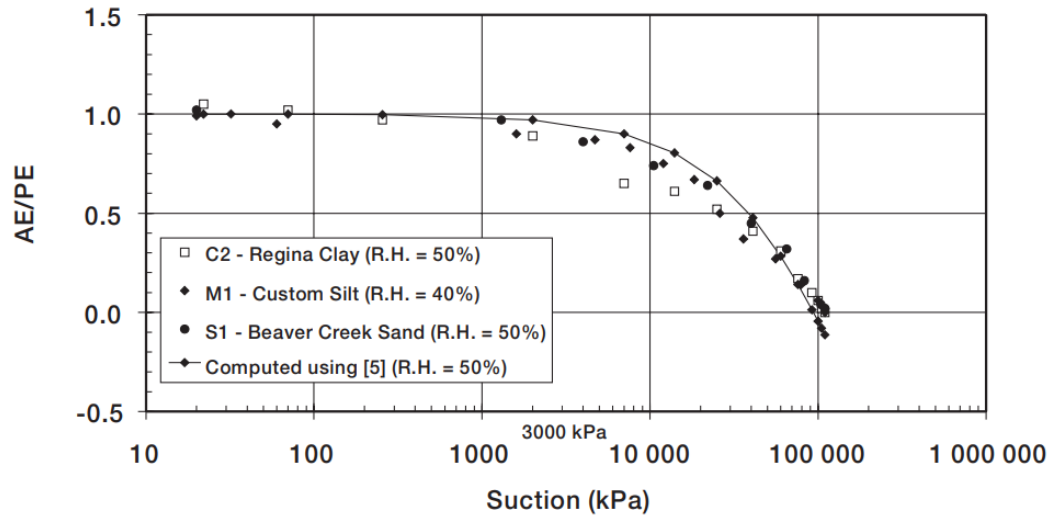


Figura 2.9: Comparación de las Tasas de Evaporación AE/PE versus la Succión Total para Tres Tipos de Suelos con la Curva Teórica de la Ecuación 2.2. Modificado de Wilson et al. (1997).

Varios autores han identificado factores que afectan las tasas de evaporación, tales como la salinidad y el agrietamiento. Para relaves de roca dura de baja plasticidad, la tasa de evaporación sigue la desecación clásica de suelos (Simms et al. (2007), Fisseha et al. (2010), Daliri et al. (2016)), donde la evaporación disminuye con el tiempo después de la depositación de relaves frescos. Esta disminución puede acelerarse debido a una alta salinidad, ya que la salinidad puede disminuir la evaporación en suelos naturales y relaves a través de al menos tres mecanismos: i) aumento del albedo debido al aumento de la reflectividad de los precipitados de sal, ii) supresión de la presión de vapor en la superficie debido a la succión osmótica inducida por una alta concentración iónica del agua de los poros, iii) y la

formación de una costra de sal que puede actuar como una barrera física al flujo de agua (Fujiyasu and Fahey, 2000). Por otra parte, el control de la evaporación puede ayudar a optimizar la depositación superficial, así cuando el clima lo permita, la evaporación puede usarse para acelerar la deshidratación a través de la depositación cíclica desde diferentes puntos del depósito (Qi and Simms, 2018). Por lo que fomentar la evaporación en una capa de relave fresco es deseable ya que la evaporación controla la desecación del material, y con ello induce un aumento tanto en la densidad como en la resistencia, pero una evaporación excesiva puede aumentar el riesgo de generación de flujo ácido si los relaves tienen potencial para generar flujo ácido (PAF) y permanecen parcialmente saturados por un periodo extenso de tiempo expuestos a condiciones ambientales. Tal como se señala en la Figura 2.10, al disminuir la relación de vacíos aumenta tanto la resistencia como la densidad del suelo, pero, como indica el índice relativo de difusión de oxígeno, el riesgo de la generación de flujo ácido aumenta una vez que se alcanza el AEV y el relave comienza a desaturarse significativamente.

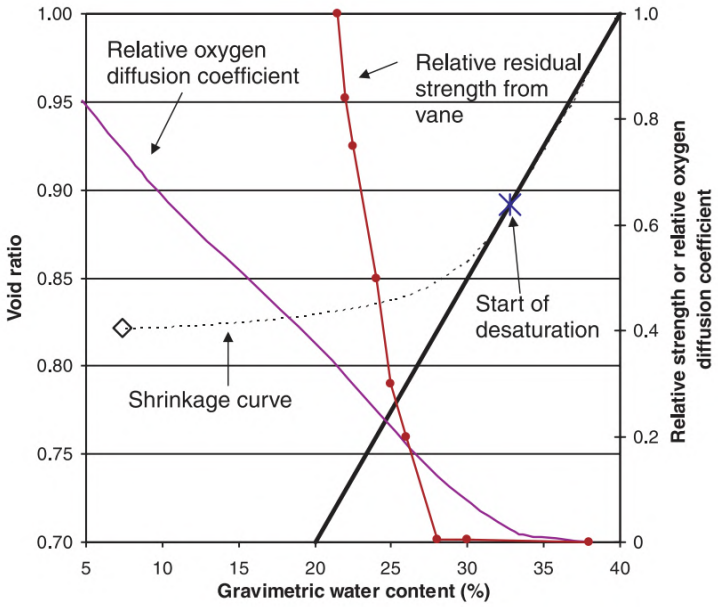


Figura 2.10: Ejemplo de la Curva de Contracción (Simms et al., 2007).

La generación de flujo o drenaje ácido se produce a través del transporte de oxígeno a los relaves. El oxígeno actúa como oxidante principal para disolver ciertos minerales sulfurados que son inestables en condiciones oxidantes. La disolución de algunos de estos minerales, siendo el más común la pirita (FeS2), da como resultado la generación de agua con un pH muy bajo, lo que a su vez conduce a la disolución de otros minerales, generando eventualmente agua con bajo pH. Esta agua es denominada drenaje o flujo ácido, y su generación y sus efectos han sido estudiados durante décadas (Simms, 2021). En términos del comportamiento no saturado, el parámetro clave es el grado de saturación, el cual gobierna el coeficiente efectivo de difusión de oxígeno dentro de los relaves. Existe un conjunto de diferentes ecuaciones para predecir la variación de la difusión del oxígeno con la saturación (Aachib et al., 2004), sin embargo todas se comportan bastante cerca de la relación pre-

sentada en la Figura 2.11. Simms (2021) afirma que en depósitos de relaves espesados o filtrados, la generación de flujo ácido parece ocurrir sólo si hay una cantidad suficiente de minerales generadores de ácido o si ocurre una desaturación significativa (S $<$ 0.8).

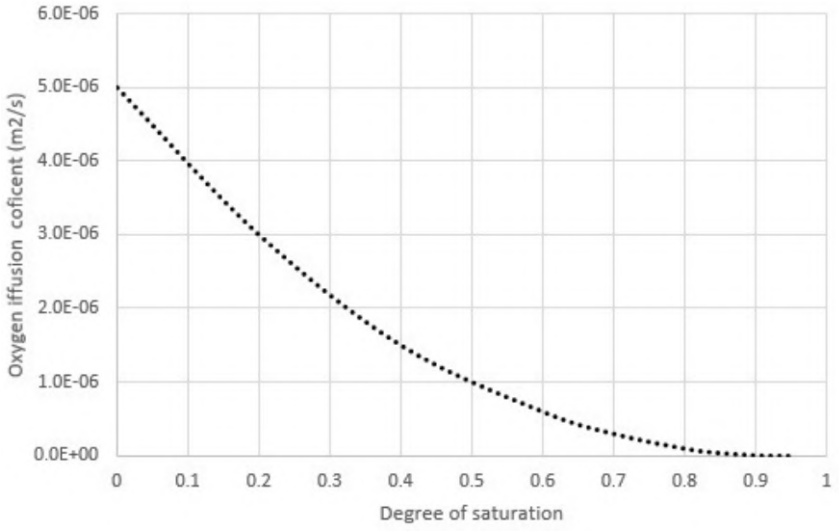


Figura 2.11: Variación del Coeficiente Efectivo de Difusión de Oxígeno con la Saturación usando el modelo de Millington-Quirk (Simms, 2021).

En resumen, con base en lo anterior, la desecación imparte resistencia adicional a los relaves al i) contribuir a una mayor densidad, y ii) aumentar el esfuerzo efectivo a través de la succión matricial, la cual se disiparía si los relaves se rehumedecen. Por lo tanto, la desecación es el parámetro clave que afecta la resistencia de los relaves.

2.4. Curva de Contracción

Establecido el hecho que la desecación en suelos finos conlleva un cambio volumétrico, el límite de contracción (LC) y la curva de contracción juegan un rol importante para la comprensión del comportamiento contractivo. Diversos autores concuerdan en la identificación de tres etapas por las que transita el suelo durante el proceso contractivo, las cuales se detallan en la Sección 2.3.

Por su parte, para la determinación experimental de la curva de contracción se requiere la medición del volumen y de la masa de agua contenida en el suelo a medida que la desecación progresa. Con ello se obtiene la relación entre la relación de vacíos y el contenido de agua gravimétrico. Fredlund (2000) propuso una relación para estimar la curva de contracción según la Ecuación 2.3:

$$e(w) = a_{sh}\left[\left(\frac{w}{b_{sh}}\right)^{c_{sh}} + 1\right]^{\left(\frac{1}{c_{sh}}\right)} \tag{2.3}$$

Donde: w corresponde al contenido gravimétrico de agua, a_{sh} corresponde a la relación

de vacíos mínima (e_{min}), a_{sh}/b_{sh} corresponde a la pendiente de la línea asintótica, c_{sh} a la curvatura de la curva de contracción, y a_{sh}, b_{sh} y c_{sh} son parámetros de ajuste de la Ecuación 2.3, los cuales se pueden obtener por medio de ajustes numéricos. Fredlund (2000) afirma además, que se cumple la siguiente relación entre los parámetros de ajuste y las propiedades masa-volumen del suelo, según se detalla en la Ecuación 2.4:

$$\frac{a_{sh}}{b_{sh}} = \frac{G_s}{S_0} \tag{2.4}$$

Donde: G_s corresponde a la gravedad específica de sólidos del suelo, y S_0 corresponde al nivel de saturación inicial de la muestra. Finalmente, se cumple que la curva de contracción tiende a una línea asintótica que está dada por la Ecuación 2.5. A medida que el nivel de saturación y el contenido gravimétrico de agua aumentan la curva de contracción se va acercando cada vez más a la línea asintótica.

$$e(w) = \frac{a_{sh}}{b_{sh}} w \tag{2.5}$$

2.5. Curva de Retención de Agua

Una herramienta indispensable para comprender el comportamiento no saturado en suelos lo constituye la Curva de Retención de Agua (SWRC), la cual proporciona una relación entre el contenido gravimétrico o volumétrico de agua y la succión. La SWRC se puede relacionar directamente con propiedades fundamentales de los suelos tales como la conductividad hidráulica, la resistencia al corte, el almacenamiento de agua, contenido de agua no congelado, calor específico, conductividad y difusión térmica (Fredlund, 2000). A su vez, la SWRC se caracteriza por tener una forma general relativamente conocida y ampliamente estudiada en la literatura. Diversos autores concuerdan en que la SWRC se puede dividir en tres zonas: zona de efecto de borde, zona de transición, y zona residual, tal como se esquematiza en la Figura 2.12. Dichas zonas están delimitadas por dos puntos característicos pertenecientes a la curva llamados Valor de Entrada de Aire (AEV), y el Valor de Succión Residual, respectivamente. El primero corresponde a la succión requerida para que el aire ingrese a los poros del suelo y se inicie de esta manera el proceso de desaturación, mientras que el segundo corresponde al contenido de agua para el cual la fase líquida deja de ser continua y los vacíos entre partículas se encuentran ocupados principalmente por aire.

La SWRC depende de la microestructura del suelo (forma de las partículas, distribución de los espacios vacíos entre partículas, mineralogía), la composición química del agua, y diversos factores tales como el historial de esfuerzos, cambios en la relación de vacíos, forma y orientación de los poros como resultado de un incremento de esfuerzos (Suazo et al., 2016). Dado lo anterior, la SWRC tendrá diferente forma y pendientes según el tipo de suelo (fino o grueso), presentando formas características según se trate de una arena, un limo o una arcilla, tal como se esquematiza en la Figura 2.13. Dicha forma se asocia principalmente al tamaño de las partículas de suelo y al tamaño de los poros vacíos. Además, el AEV de suelos gruesos es menor que para suelos finos, debido a la presencia de poros de mayor tamaño, donde el predominio de la capilaridad presente en la succión matricial genera un menor requerimiento de succión para iniciar el proceso de desaturación del suelo.

Adicionalmente, Simms (2021) afirma que en relaves la dependencia del AEV de la relación de vacíos es particularmente importante para el intercambio de agua entre los relaves

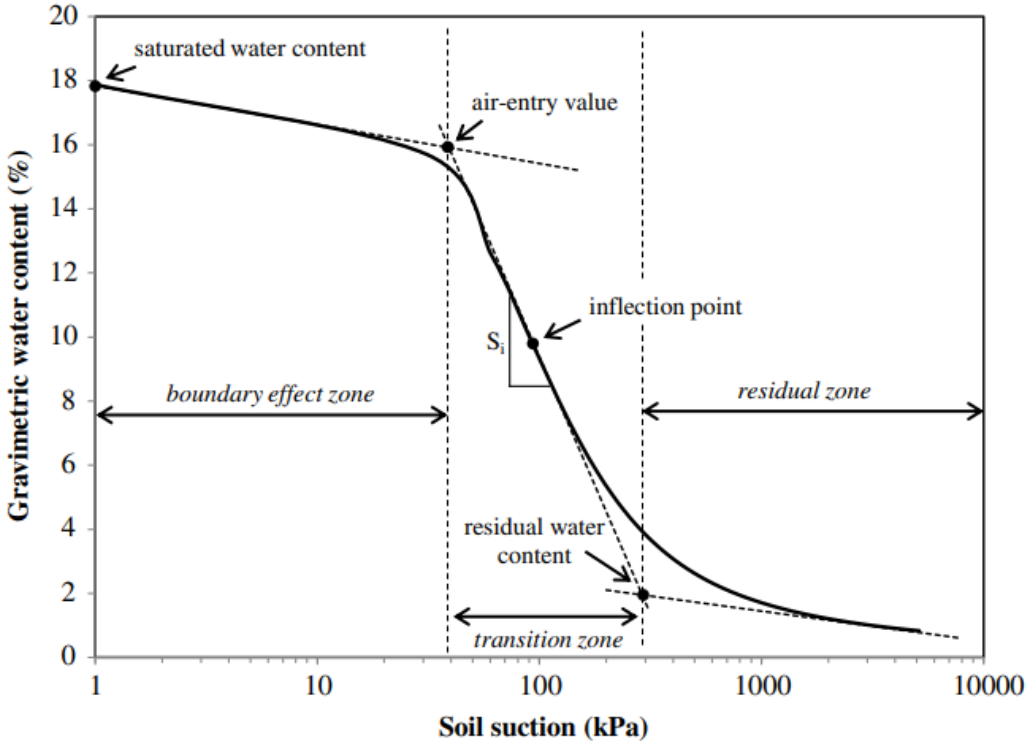


Figura 2.12: Estructura Típica de la SWRC.

frescos y los relaves anteriores ya desecados, tal como se esquematiza en la Figura 2.14. Así, tener relaves más frescos permitirá una mayor contribución de la evaporación al cambio de volumen en lugar de la desaturación, lo que permitirá una mayor resistencia y un menor riesgo de generación de flujo ácido.

Por otro lado, Musso (2018) realizó un estudio para la determinación de la SWRC en relaves multimetálicos de la industria minera chilena. A partir de ello, obtuvo que al disminuir el CS inicial, es decir, al aumentar el contenido de agua inicial en el relave fresco, la SWRC asciende verticalmente, dado que el aumento del contenido de agua inicial provoca un ascenso en la parte inicial de la curva, para luego ir tendiendo asintóticamente a una única SWRC, tal como se señala en la Figura 2.15. Lo anterior se puede explicar debido a que los poros iniciales en una muestra con mayor contenido de agua, tienen un mayor tamaño, por lo que son capaces de almacenar una mayor cantidad de agua. Luego, colapsan en la medida en que se drena el agua dentro de la matriz del relave, tendiendo a una misma curva para presiones altas, zona en la cual las propiedades capilares son irrelevantes en la succión, y las condiciones residuales controlan el comportamiento del suelo producto de la succión osmótica y fuerzas de atracción molecular.

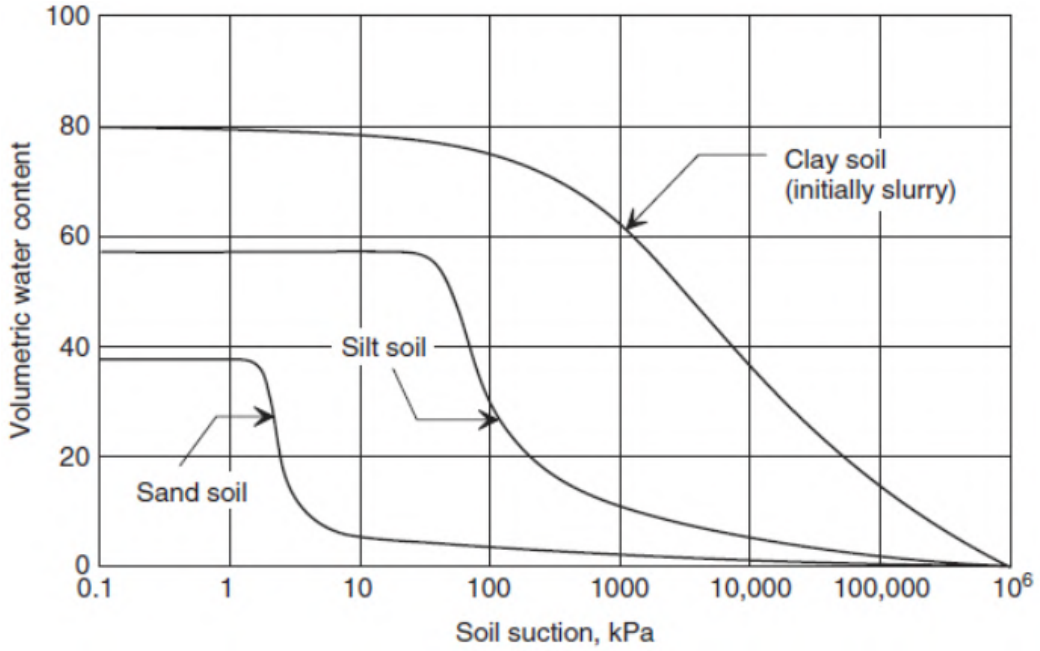


Figura 2.13: Estructura Típica de la SWRC Según Tipo de Suelo (Fredlund and Rahardjo, 1993).

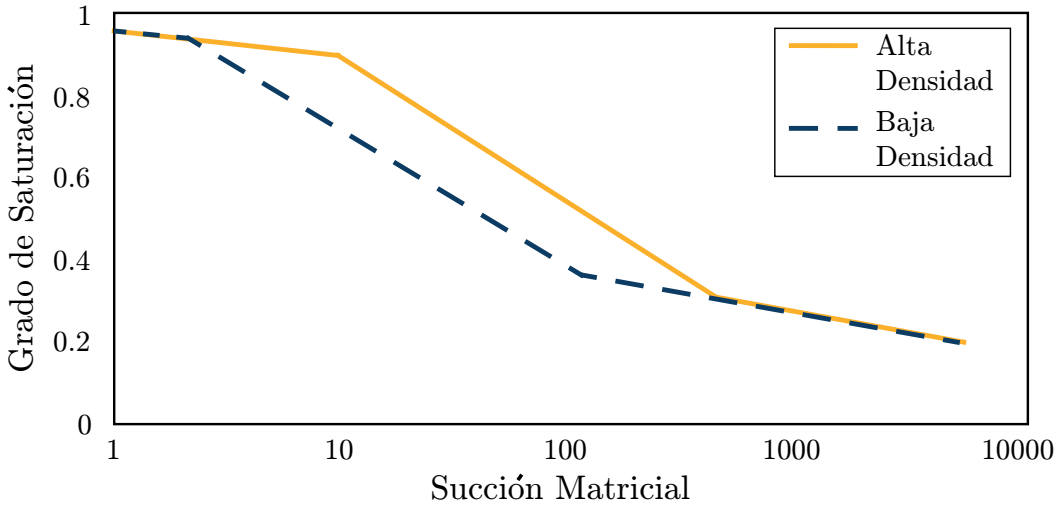


Figura 2.14: Influencia de la Densidad del Suelo en el Comportamiento de la SWRC. Modificado de Simms (2021).

2.6. Estudios Previos

Dado que el estudio del agrietamiento superficial en suelos es relativamente reciente en la ingeniería civil, los principales estudios de campo y de laboratorio que se han realiza-

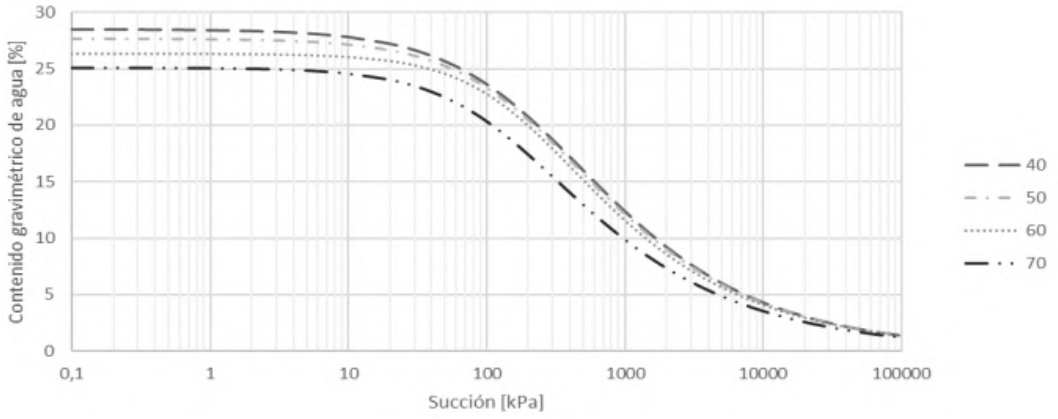


Figura 2.15: Influencia del Contenido de Sólidos Inicial de Relaves en el Comportamiento de la SWRC (Musso, 2018).

do ha sido durante las últimas dos décadas. Uno de los primeros ensayos de desecación en laboratorio fue realizado por Yesiller et al. (2000), quienes estudiaron el agrietamiento considerando ciclos de humectación y desecación en tres muestras compactadas de suelo arcilloso de baja plasticidad utilizado como cubierta impermeabilizante para vertederos. La desecación la realizaron en tanques de sección 1.9mx1.5m, con espesor de muestra de 0.5m, en un equipo especialmente adaptado con un sistema para simular la lluvia y ventiladores. Una de los principales hallazgos del estudio corresponde a que el patrón de agrietamiento se ve influenciado por el contenido de finos del suelo. Así, en general, en suelos con altos contenidos de finos se observaron succiones mayores, aumentos rápidos en la succión, y un alto nivel de agrietamiento. Respecto a los ciclos de humectación y secado, observaron que el agrietamiento fue mayor después de un ciclo de humectación en comparación con el agrietamiento obtenido después de un ciclo de compactación. Si bien al compactar las muestras de suelo se aleja de las condiciones en que son depositados los relaves, esta investigación constituye un buen primer acercamiento al estudio del agrietamiento en suelos finos.

Otro estudio relevante en suelos naturales corresponde a la investigación de Ávila (2004), quien realizó ensayos de desecación a muestras reconstituidas de un suelo arcilloso (IP = 30 %) de Bogotá bajo condiciones controladas de laboratorio. La desecación la realizó en bandejas cuadradas de 200mm de lado con base rugosa con hendiduras, con alturas de muestras de 5mm y 10mm, y en moldes pequeños y micro en forma de I para estudiar la resistencia a la tracción. Como resultado, el autor observó que el agrietamiento por desecación comienza a una humedad intermedia entre el LL y el LP del material, intervalo en el cual se generan las tensiones necesarias para que el material entre en rotura por tracción. De acuerdo a Abu-Hejleh and Znidarcic (1995), esta zona de rotura es una franja angosta en la que ocurren los mayores incrementos de succión, los que se reducen drásticamente en muy corta distancia. Ávila (2004) observó además que, la humedad de agrietamiento es proporcional a la humedad inicial de la muestra de suelo, e inversamente proporcional a la tasa de desecación. En la Figura 2.16 se presentan todos los resultados en términos de la humedad inicial y la humedad de agrietamiento donde se aprecia esta relación.

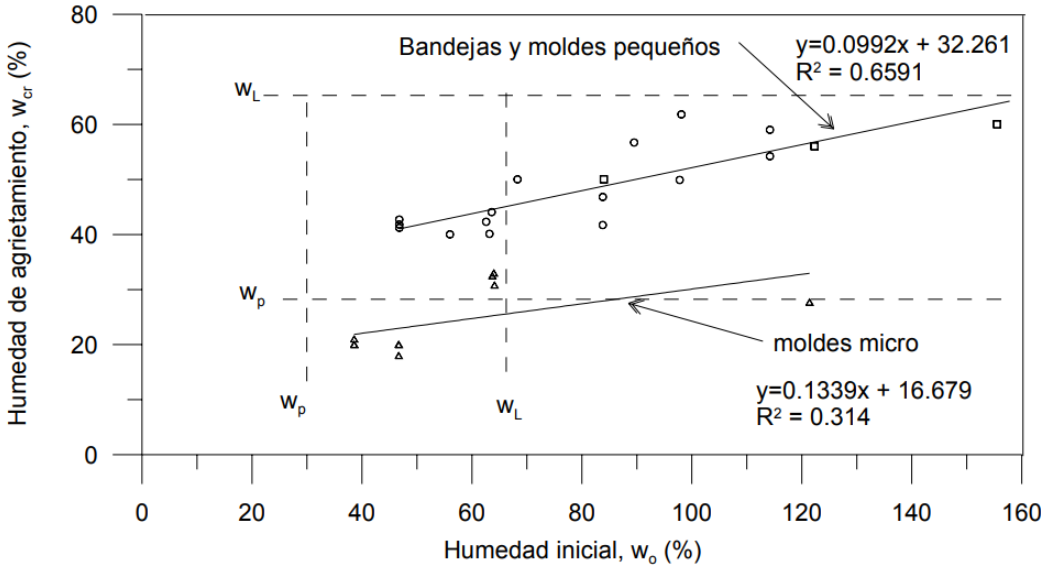


Figura 2.16: Datos Conjuntos de Humedad de Agrietamiento en Función de la Humedad Inicial (Ávila, 2004).

Por su parte, Rodriguez (2002) realizó uno de los primeros estudios de desecación en relaves. Para ello ensayó un relave de níquel y cobalto, depositado a una humedad inicial de 50 %, y con espesores o alturas de muestras de 4mm, 8mm y 16mm. Para la desecación utilizó bandejas circulares de 225mm de diámetro y base rugosa con hendiduras. El material se desecó a diferentes humedades relativas, comprendidas entre 60 % y 98 %. Si bien la humedad relativa ambiental se relaciona con la succión final en el suelo a través de la ley psicrométrica, Rodriguez (2002) no observó influencia de la humedad relativa en el patrón final de agrietamiento. Respecto a esto último, el autor identificó que las grietas se formaron con grados de saturación superiores al 85 %, independiente de las condiciones de humedad relativa y de la velocidad a la que se realice la desecación, y que la distancia entre grietas se relaciona linealmente con el espesor de la capa ensayada. En la Figura 2.17 se presentan fotografías del estado final de la desecación obtenidas por Rodriguez (2002).

Más tarde, Vogel et al. (2005) estudiaron el agrietamiento superficial en distintas mezclas de suelo arcilloso, centrándose en los aspectos geométricos del patrón de agrietamiento. Este estudio fue uno de los primeros en utilizar el procesamiento digital de imágenes para el análisis del agrietamiento por desecación. Para lo anterior, realizaron dos mezclas de arena (S) y bentonita (B) en una proporción de 1S:1B y 5S:1B, las cuales se desecaron en bandejas rectangulares de 24cmx30cm con espesores o altura de muestras de 5mm. Además, las muestras en desecación se iluminaron uniformemente con lámparas halógenas para inducir una temperatura constante. Así, observaron que el agrietamiento comenzó en lugares aleatorios dentro de la superficie en desecación, y que las grietas individuales se propagaban desde sus puntas. A partir de un determinado momento, las grietas en propagación se ramificaban típicamente en ángulos de 120˚, y aquellas grietas individuales que se intersectaban lo hacían típicamente en ángulos de 90˚, concluyendo a partir de estas observaciones que es probable que la ramificación de una grieta en desarrollo forme uniones en Y, mientras que la

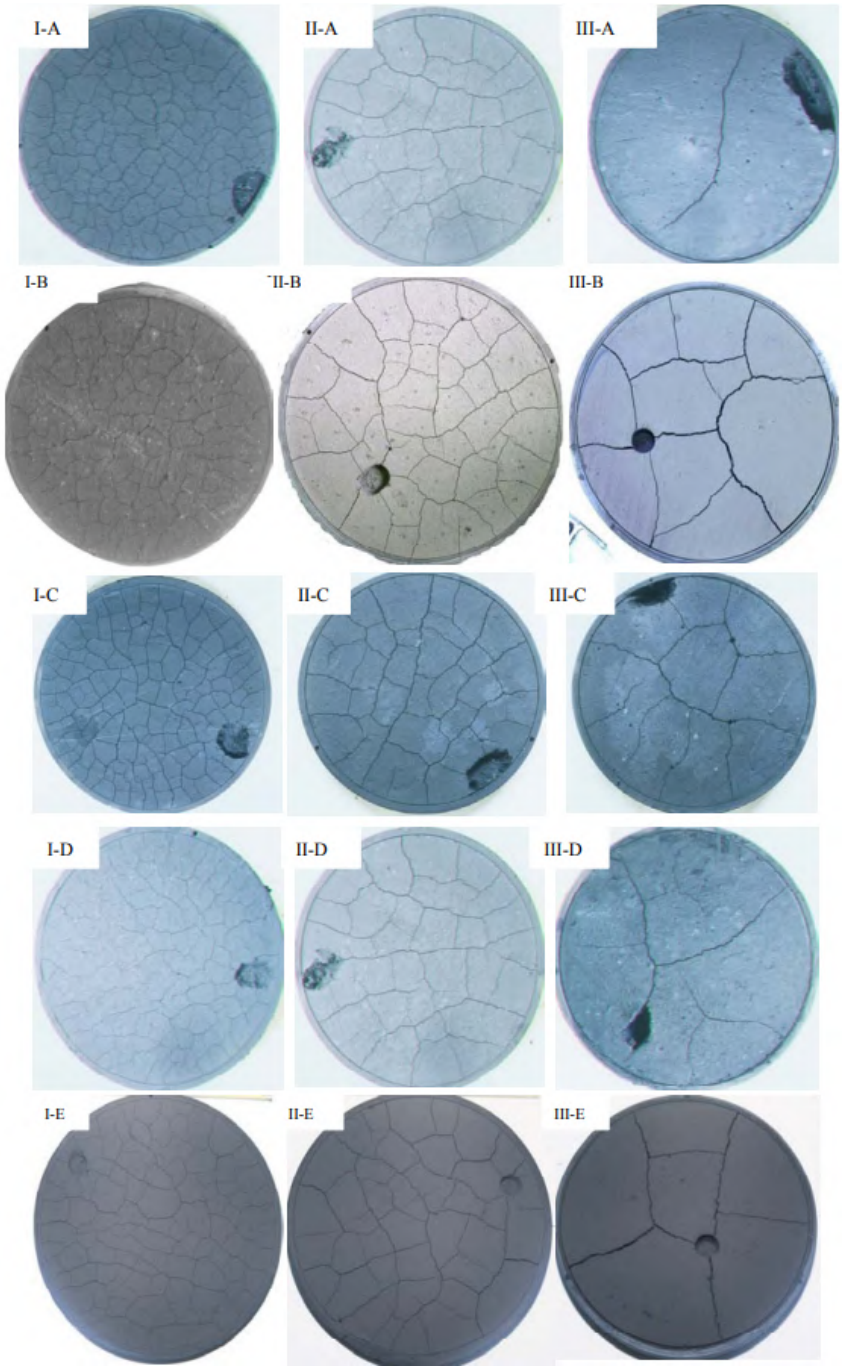
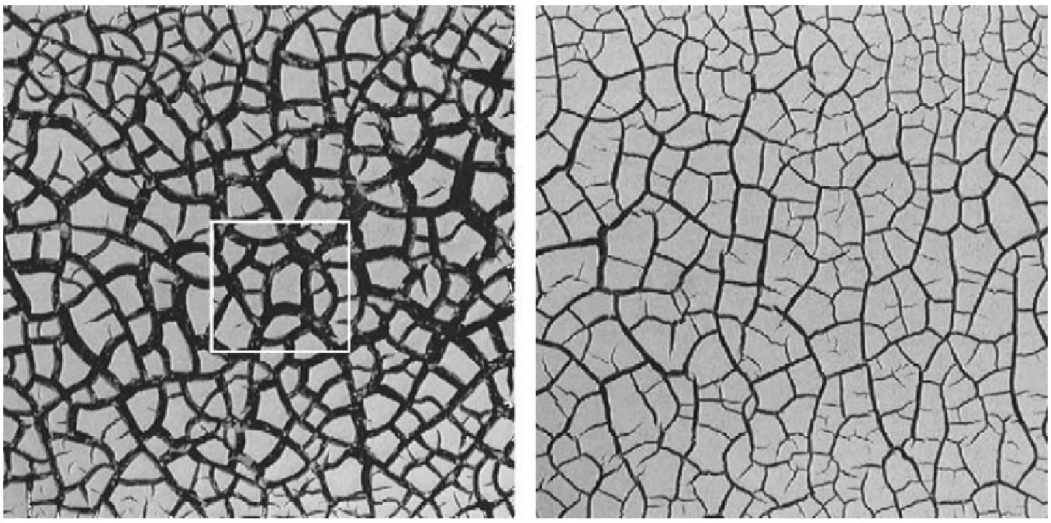


Figura 2.17: Agrietamiento de Tres Capas de Diferentes Espesores Desecadas en Laboratorio Bajo Diferentes Condiciones de Humedad Relativa (HR) y Temperatura Constante de 22°. I) 4mm, II) 8mm, y III) 16mm. A) HR = 97.8 %, B) HR = 75 %, C) HR = 60 %, D) HR = 15.6 %, y E) $HR_{laboratorio} = 60\,\%$ (Rodriguez, 2002).

coalescencia de dos grietas individuales formen uniones en T. Adicionalmente, al comparar el patrón de agrietamiento final en ambas muestras ensayadas, observaron que la muestra con menor contenido de arcilla (5S:1B) se agrieta menos que aquella con mayor contenido de arcillas. Lo anterior se aprecia mediante la baja densidad de área que las grietas alcanzaron al final del proceso de desecación, tal como se señala en la Figura 2.18.



a) b)

Figura 2.18: Patrón de Agrietamiento al Final del Proceso de Desecación donde a) Muestra 1 con 1S:1B, y b) Muestra 2 con 5S:1B (Vogel et al., 2005).

Parte de los estudios anteriores mencionados se enfocaron al caso de suelos ya agrietados, sin considerar el proceso de agrietamiento como tal, es decir, formación y propagación de grietas. En este sentido, Lakshmikantha et al. (2006) realizaron pruebas de desecación en una arcilla limosa de baja plasticidad (CL), en dos series de pruebas con diferentes tamaños, condiciones de borde y preparadas a un contenido de agua inicial de 26 %. Tanto la masa como la propagación de grietas fue monitoreada mediante la captura de fotografías a intervalos regulares. La primera serie de ensayos se realizaron en moldes circulares similares a los ocupados por Rodriguez (2002), con el fin de extender dicha investigación e incorporar el análisis del patrón de agrietamiento en probetas de alturas 4mm, 8mm y 16mm. Adicionalmente, se varió la rugosidad de la base de las bandejas de desecación entre lisa, con surcos circulares y con una rejilla cuadrada. En sus resultados observaron que existe una relación entre el patrón de agrietamiento, el tamaño de la muestra (relación área/altura), y las condiciones de borde. Al aumentar el espesor del suelo en desecación observaron que aumenta el ancho y la separación entre grietas. Por su parte, aquellos ensayos con base lisa resultaron con un menor ancho y separación entre grietas, y por lo tanto, resultaron en un mayor número de bloques poligonales que una superficie rugosa, tal como se observa en la Figura 2.19. Su estudio concluye que el tamaño y la relación de aspecto de la muestra tienen, además, una fuerte influencia en la pérdida total de humedad y la tasa de pérdida de humedad.

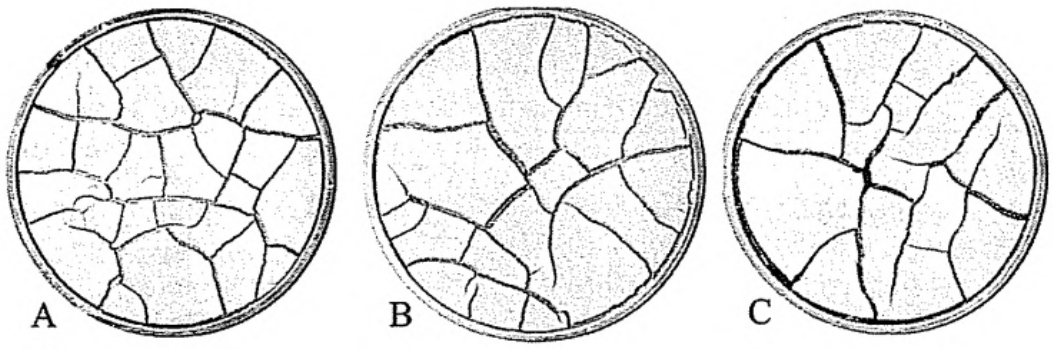


Figura 2.19: Patrón de Agrietamiento Obtenido para Muestras de 8 mm de Espesor, con a) Base Lisa, b) Base con Surcos Circulares, y c) Base con Rejilla Cuadrada (Lakshmikantha et al., 2006).

Por su parte, Innocent-Berdard (2013) investigó el comportamiento evaporante de relaves espesados provenientes de una planta petrolífera en Alberta, con CS incial de 50 % y 55 %. Utilizó bandejas rectangulares de sección de 69cmx98cm, y midió la pérdida de masa por evaporación, propagación de grietas, succión total y humedad de los relaves. El autor observó que la alta salinidad de los relaves detiene la evaporación debido a la precipitación de sales en la superficie causando un aumento en la succión total, mientras que el agrietamiento facilitó la desecación a través de la exposición del material subyacente con niveles de succiones menores que la superficie evaporante horizontal superior. Más tarde, Daliri et al. (2016) llevó a cabo ensayos de desecación en condiciones similares a Innocent-Berdard (2013) con el fin de extender la investigación y estudiar la resistencia al corte de los relaves espesados de oro, la cual se instrumentó en toda su altura para medir evaporación, drenaje, humedad, contracción vertical y succión matricial. En la Figura 2.20 se presenta la caja de desecación utilizada para dichos ensayos. El material fue depositado en cinco capas con espesores entre 14cm y 18cm, y con una humedad inicial de 38 %. De dichos ensayos se observó que los valores totales de succión se correlacionan con el contenido de agua del relave, y que la deshidratación de la capa fresca depositada disminuye a medida que aumenta el número de capas. Sin embargo, respecto al agrietamiento, no se detectó una influencia clara de las grietas en las tasas de evaporación, lo que contrasta con los resultados de Innocent-Berdard (2013).

Por otro lado, Fujiyasu et al. (2000) realizaron uno de los primeros estudios en terreno de la influencia del agrietamiento superficial en la evaporación en un relave arcilloso depositado en slurry. Para ello, monitorearon la velocidad de evaporación de la superficie del relave por un periodo de 6 meses, lo cual se comparó con la evaporación de una bandeja clase A ubicada cerca del área de estudio. De las mediciones realizadas, observaron que las grietas tienen una influencia significativa en la velocidad de evaporación una vez que la superficie del depósito comenzó a desaturarse.

Si bien el estudio del agrietamiento en suelos naturales y relaves ha avanzado significativamente en las últimas décadas, existen variables que los trabajos aquí mencionados no han abordado. Por ejemplo, los estudios de Ávila (2004) no evaluaron la influencia del

Figura 2.20: Caja de Desecación Instrumentada Desarrollada por Daliri et al. (2016).

agrietamiento en la evaporación, mientras que el foco de investigación de Rodriguez (2002) no permitió caracterizar el progreso o mecanismo de agrietamiento de los materiales. Por su parte, los ensayos realizados por Daliri et al. (2016) y Innocent-Berdard (2013) no permitieron identificar el patrón de agrietamiento de los relaves en terreno, a la vez que la precipitación de sales en superficie no permitió medir la influencia del agrietamiento en la evaporación. Con excepción de Innocent-Berdard (2013), los ensayos no consideraron la medición de la pérdida de volumen debido a las grietas, lo que pudiese ser significativo en la predicción de curvas de almacenamiento en depósitos de relaves. Finalmente, el estudio realizado por Lakshmikantha et al. (2006) considera variables relevantes del fenómeno en suelos naturales, como lo son la relación de aspecto de los ensayos de laboratorio y el patrón de agrietamiento. Lo anterior, permite definir un punto de partida para el análisis de estos fenómenos en diversos tipos de relaves en desecación.

2.7. Procesamiento Digital de Imágenes

2.7.1. Introducción

En la constante interacción del ser humano con el mundo alrededor, la visión cumple un rol fundamental, siendo uno de los sentidos más avanzados, por lo que las imágenes desem-

peñan un gran papel en la percepción humana. El desarrollo tecnológico que ha sido capaz de desarrollar la humanidad ha permitido percibir el mundo no sólo a través de los sentidos, sino también mediante dispositivos que permiten capturar, mejorar y analizar el mundo real en una imagen digital. Sin embargo, a diferencia de los humanos, que están limitados a la banda visual del espectro electromagnético (EM), los dispositivos que permiten capturar imágenes cubren casi todo el EM, desde los rayos gamma hasta las ondas de radio, cuyos rangos de frecuencia y longitud de onda se esquematizan en la Figura 2.21.

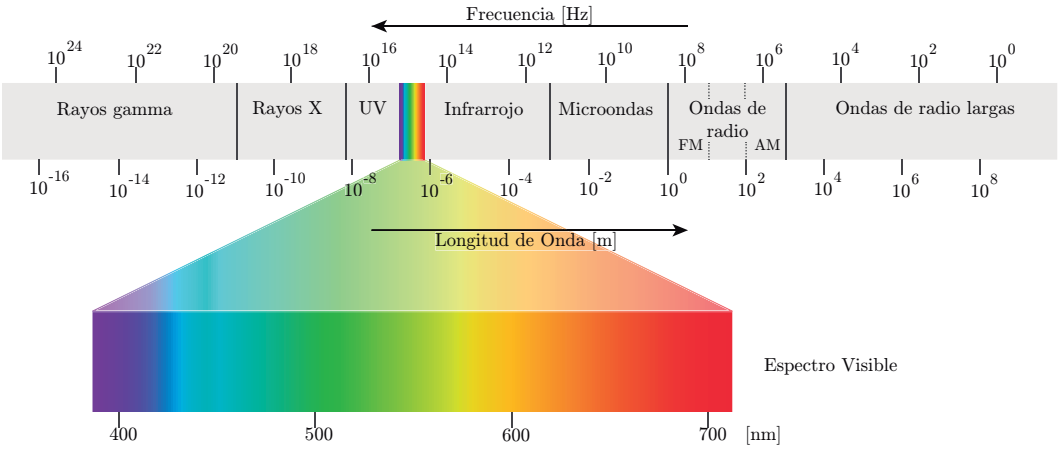


Figura 2.21: Diagrama del Espectro Electromagnético.

En la década de 1980, el procesamiento de imágenes digitales estaba reservado sólo para aquellos con acceso a computadoras de gran poder de cálculo e instalaciones costosas, por lo que estaba limitado, en gran parte, a aplicaciones satelitales y militares. Sin embargo, hoy en día con la masificación de las computadoras personales y el acceso a internet casi en cada hogar, se puede disponer y aplicar el procesamiento digital de imágenes hasta en un nivel de aficionado. Es aquí donde converge la necesidad de resolver un problema con las herramientas tecnológicas disponibles.

Los dispositivos de captura pueden generar o capturar imágenes desde fuentes que los humanos no están acostumbrados a asociar con imágenes, como ultrasonido, microscopía electrónica e imágenes generadas por computadora. Por lo que, el procesamiento de imágenes digitales abarca un amplio y variado campo de aplicaciones. Sin embargo, en la literatura no existe consenso general sobre los límites de los campos asociados, es decir, dónde se detiene el procesamiento de imágenes y comienzan otras áreas como el análisis de imágenes y la visión por computadora.

Una buena clasificación de los campos asociados es la presentada por Gonzalez and Woods (2008), quienes proponen tres tipos de procesos en el continuo desde el procesamiento de imágenes en un extremo, hasta la visión por computadora en el otro: procesos de **bajo**, **medio** y **alto nivel**, los cuales se resumen en la Figura 2.22. Los procesos de bajo nivel se caracterizan porque tanto la entrada como la salida son imágenes, mientras que los procesos de nivel medio se caracterizan porque sus entradas son imágenes, pero sus salidas son atri-

butos extraídos de esas imágenes, tales como bordes, contornos o identificación de objetos individuales. Finalmente, los procesos de alto nivel implican "dar sentido" a un conjunto de objetos identificados, es decir, realizar funciones cognitivas asociadas normalmente con la visión.

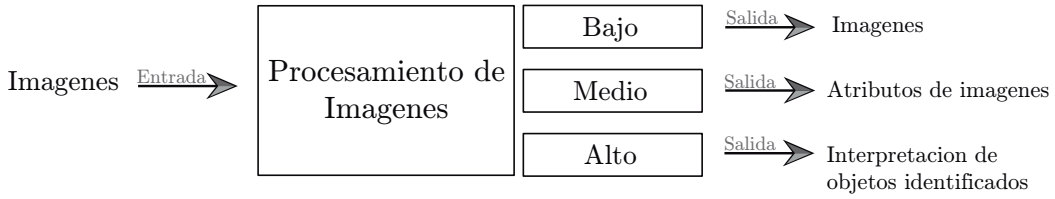


Figura 2.22: Límites Para los Campos Dentro del Procesamiento Digital de Imágenes Propuesto por Gonzalez and Woods (2008).

Dado lo anterior, se entiende el procesamiento digital de imágenes como el conjunto de procesos cuyas entradas y salidas son imágenes, incluyendo a aquellos procesos que extraen atributos de imágenes y los que permiten el reconocimiento de objetos individuales. En otras palabras, corresponde a un conjunto de técnicas que se pueden aplicar a imágenes digitales con el objetivo de mejorar la calidad, resaltar alguna característica o facilitar la búsqueda de información. Entre las aplicaciones más comunes del procesamiento de imágenes se encuentra la reconstrucción y corrección de imágenes, creación de modelos en 3D a partir de fotografías parcialmente superpuestas, y extracción de información a partir de imágenes. Es así como existe una variedad de campos relacionados, tales como la Inteligencia Artificial, Visión por Computadora, Codificación de Imágenes, Ingeniería Óptica, Gráficos Computarizados, entre otros.

2.7.2. Formación de Imagen Digital

Para tomar una imagen con algún dispositivo de captura, por ejemplo una cámara fotográfica, se debe tener en consideración la sensibilidad del dispositivo, la cual se mide mediante la Función de Sensibilidad, propia de cada dispositivo de captura. Dicha función determina cuán sensible es capturando el rango de longitud de onda, (λ), presente en la luz reflejada. El resultado corresponde a la Función de Imagen, que determina la cantidad de luz reflejada que es capturada en las coordenadas de la cámara. Para generar una imagen "a color" se necesitan tres funciones de imagen, una por cada color primario, es decir, en las longitudes de onda roja, verde y azul. Así, se define la Estructura RGB, un modelo de color basado en la síntesis aditiva que permite representar un color mediante la mezcla por adición de los 3 colores de luz primarios. Ahora, para trabajar las imágenes capturadas mediante procesos computacionales se debe discretizar la función de imagen, resultando en imágenes matriciales o también llamadas Mapas de Bits de resolución estática, tal como se esquematiza en la Figura 2.23. Así, las imágenes quedan formadas por un conjunto de pixeles ordenados, donde para cada uno de los cuales se guarda información sobre brillo, color, intensidad, entre otros. Dado lo anterior, una imagen digital a color está formada por varios canales, cada uno de los cuales recoge una escala de grises para un color primario (Figura 2.24). En este aspecto, el formato RGB posee tres canales que almacenan la escala

de grises correspondientes al rojo, verde y azul respectivamente.

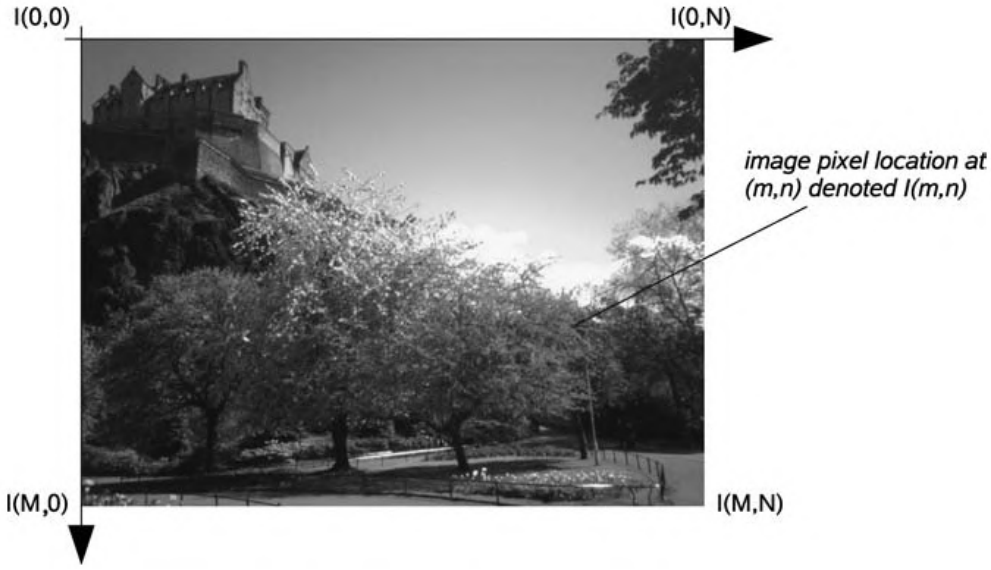


Figura 2.23: Espacio Cartesiado 2D de una Imagen Digital de Dimensiones MxN (Solomon and Breckon, 2011).

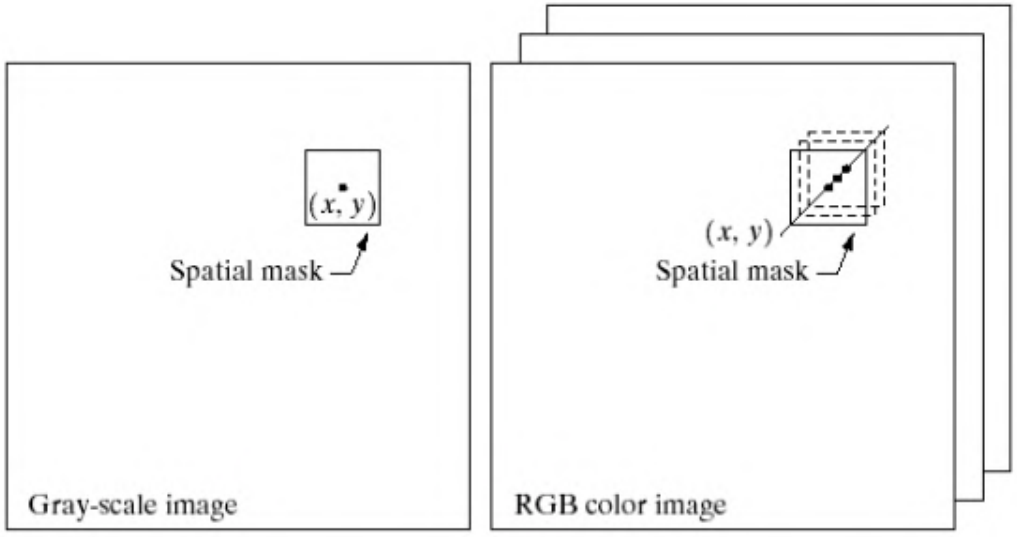


Figura 2.24: Representación Espacial de Imágenes en Escala de Grises, y en Color en Formato RGB (Gonzalez and Woods, 2008).

Ahora bien, para muchas aplicaciones no es necesario trabajar con las imágenes en formato RGB, es decir, se puede prescindir de información y lograr así una eficiencia en términos

de recursos computacionales. Para esto, se pueden utilizar las imágenes en Escala de Grises, interpretándose nuevamente como una matriz, pero esta vez de NxM elementos con valores enteros. El valor en escala de grises de cada pixel estrictamente contiene tres datos, uno para cada color primario, sin embargo esos 3 datos son idénticos, por lo que se representan como un valor individual.

Es importante destacar además, la Profundidad de Color o Profundidad de Bits de una imagen, la cual corresponde a la capacidad que tiene un pixel de almacenar datos que describen su color, es decir, la cantidad de tonos. Así, en una imagen de 1 bit por pixel cada pixel sólo puede tomar 2 valores, 0: negro ó 1: blanco, es decir, $2^1 = 2$ colores. Del mismo modo, una imagen de 2 bits por pixel tiene $2^2 = 4$ colores, y así sucesivamente. En la Figura 2.25 se ilustra la escala de tonos según la cantidad de bits.

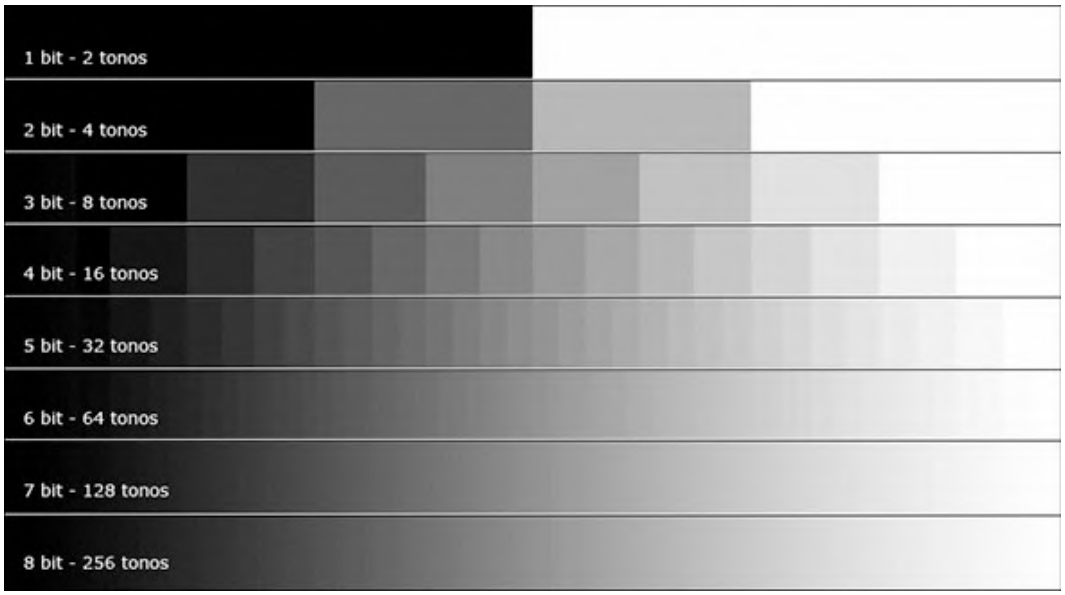


Figura 2.25: Escala Representativa de la Profundidad de Bits de una Imagen.

Típicamente se tienen imágenes de 8, 16 y 32 bits. En el caso de las imágenes de 8 bits, se pueden representar 256 tonos de gris ($2^8 = 256$ colores). Al representar una imagen de 8 bits de forma matricial se tiene una matriz del tipo mostrado en la Ecuación 2.6.

$$[A] = \begin{bmatrix} A(0,0) & A(0,1) & ... & A(0,M-1) \\ \vdots & & & \vdots \\ A(N-1,0) & & ... & A(N-1,M-1) \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

Con $A(i,j) \in \{0,...,255\}$.

La interpretación digital indica que cada pixel de la imagen tiene el valor $A(i,j)$. Por lo tanto, una imagen se puede trabajar con operaciones matriciales, es decir, se puede calcular de una imagen o una región de ella el promedio de los valores que toma cada pixel, su

varianza, desviación estándar, entre muchos otros. Además, se puede obtener el histograma de la imagen, el cual permite cuantificar el número de pixeles que presentan el mismo valor $A(i,j)$, donde se destaca que:

$$\sum_{l=0}^{255} h_A(l) = \text{Número de pixeles en } [A] \tag{2.7}$$

Donde h_A: histograma de la matriz $[A]$.

2.7.3. ImageJ

Para obtener información a partir del análisis de una imagen existen diversas herramientas, entre las que se encuentra el software **ImageJ**, el cual es un programa de análisis y procesamiento digital de imágenes de dominio público, basado en Java (Schneider et al., 2012). ImageJ tiene propiedades que lo hacen interesante y de gran utilidad, principalmente debido al hecho de que puede definirse como un sistema colaborativo, es decir, un sistema que va creciendo gracias a la contribución de múltiples participantes que aportan con sus complementos o plugins. Muchos de estos plugins han sido desarrollados por investigadores como biólogos o médicos, por lo que las aplicaciones de dicho software abarcan una gran cantidad de áreas, como por ejemplo (Abramoff et al., 2004) :

- Función y dinámica de células y orgánulos.
- Imágenes de calcio y transducción de señal.
- Imagenología dental.
- Diferenciación de tumores y medición del movimiento de los tejidos blandos.
- Imágenes del tejido cerebral y del tejido graso.
- Neurociencia.
- Simulación de cirugía craneofacial.
- Simulación de patrones de crecimiento celular.
- Telediagnóstico y servidores de imágenes.
- Medición de geometría osea (Doube et al., 2010).

En la Figura 2.26 se presenta un ejemplo de aplicación del procesamiento digital de imágenes en el estudio de la función celular de células humanas realizado por Carpenter et al. (2006) utilizando ImageJ.

Si bien el hecho de que muchos complementos sean desarrollados por investigadores sin una formación específica en informática puede plantear dudas sobre la integridad del software, se ha comprobado matemáticamente que el software es suficientemente fiable para el procesamiento digital de imágenes (Díaz de Greu de Pedro, 2014). Por lo tanto, para el análisis de fotografías de la superficie de relaves mineros el software parece ser una herramienta gran utilidad.

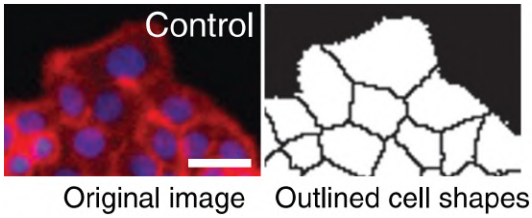


Figura 2.26: Identificación de Forma y Textura en Células Humadas Mutadas (Carpenter et al., 2006).

2.7.3.1. Descripción de ImageJ

ImageJ está disponibe para cualquier sistema operativo que tenga instalado un entorno de ejecución Java 8 o posterior, lo que incluye, pero no está limitado a (Schneider et al., 2012):

- Windows XP, Vista, 7 o 8 con Java instalado desde java.com
- Mac OS X 10.8 "Mountain Lion" o posterior con Java instalado desde java.com
- Ubuntu Linux 12.04 LTS o posterior con OpenJDK 8 instalado

Además, ImageJ se distribuye como una aplicación portable, es decir, no es necesario ejecutar un instalador, solo se debe descargar y descomprimir. Permite, entre otros, realizar acciones como (Ferreira and Rasband, 2012):

- Mostrar, editar, analizar, procesar, guardar e imprimir imágenes de 8 bits, 16 bits y 32 bits.
- Puede leer múltiples formatos de imágenes, incluyendo TIFF, GIF, JPEG, PNG, BMP, DICOM, PGM y FITS.
- Es compatible con *stacks* e *hyperstacks*, es decir, series de imágenes que comparten una sola ventana.
- Puede calcular estadísticas de valores de área y píxeles de secciones de imágenes seleccionadas por el usuario.
- Puede procesar una gran cantidad de imágenes simultáneamente, sólo está limitado por la memoria disponible en el equipo en que se ejecute.
- Permite ampliar sus capacidades mediante módulos en forma de macros, scripts o complementos.

ImageJ es un programa con una interfaz de usuario compacta, amigable e intuitiva, la cual está compuesta por sólo una barra de menú que contiene todos los comandos de menú, una barra de herramientas, una barra de estado y una barra de progreso, la cual se muestra en la Figura 2.27. Esto permite facilitar la implementación de análisis de información de cualquier campo de la ingeniería en ImageJ.

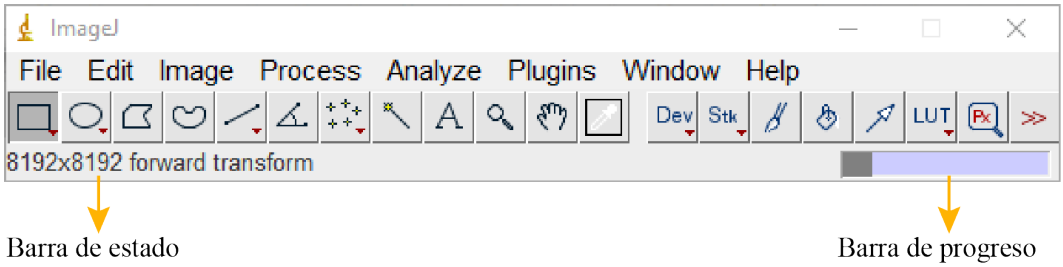


Figura 2.27: Interfaz Gráfica de ImageJ

2.7.3.2. Filtros

Dadas las características del agrietamiento superficial en relaves, para el desarrollo de este trabajo las herramientas que permiten suavizar y filtrar imágenes para diferenciar el "fondo" de objetos o formas que estén en primer plano se vuelven de particular interés; además de aquellas que permiten identificar bordes de figuras, analizar y medir parámetros de contornos cerrados identificados dentro de cada figura. A continuación, se describen brevemente las principales herramientas que cumplen con estas finalidades.

I) Smooth: Permite desenfocar una imagen o parte de ella reemplazando cada pixel por el promedio de su vecindad 3x3, tal como se ejemplifica en la Figura 2.28.

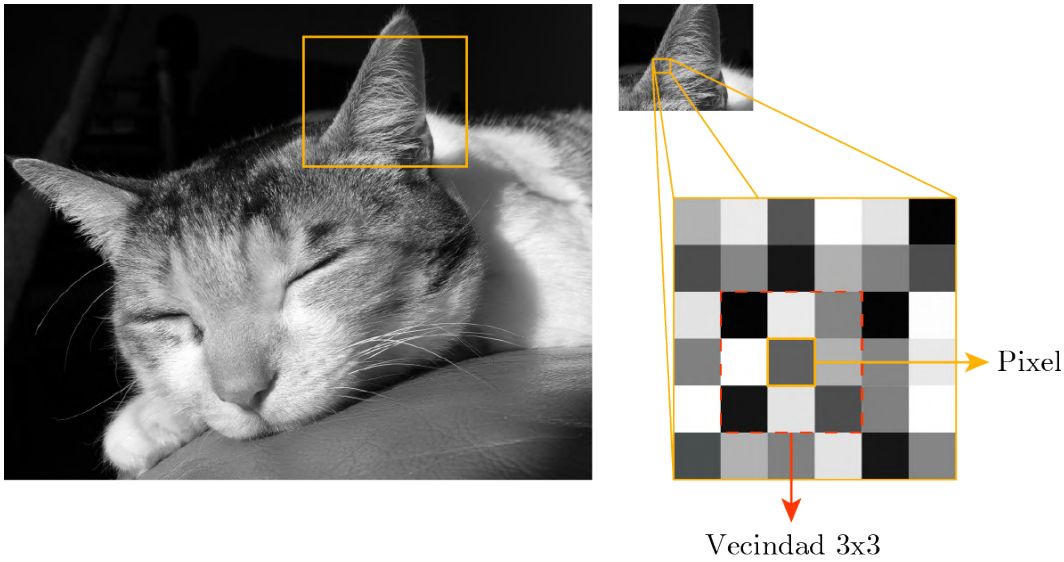


Figura 2.28: Ejemplo de Vecindad 3x3 en una Imagen en Escala de Grises.

II) Sharpen: Permite aumentar el contraste y acentuar los detalles, sin embargo puede provocar efectos no deseados, como aumentar el ruido. Utiliza para ello factores de ponderación para reemplazar cada pixel con un promedio ponderado de la vecindad 3x3. Dichos factores de ponderación se muestran en la matriz 2.8.

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 12 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

III) Mean: Al igual que el filtro Smooth, el filtro Mean permite desenfocar o suavizar una imagen o parte de ella reemplazando cada pixel por el promedio de su vecindad nxn, con la ventaja que permite definir el tamaño n de dicha vecindad, al cual se le conoce como radio.

IV) Median: El filtro Median puede ser de gran utilidad para eliminar ciertos tipos de ruidos en la imagen, para lo cual remueve aquellos pixeles que tienen un valor mucho más alto o mucho más bajo que los pixeles de su vecindad nxn, lo que generalmente se denomina ruido de sal y pimienta. La ventaja del filtro Median es que mantiene los bordes en las imágenes, ya que no introduce valores nuevos como el filtro Mean.

V) Find Maxima: Esta función determina los máximos locales en una imagen y crea una imagen binaria del mismo tamaño con los máximos identificados. Para imágenes en RGB selecciona los máximos de luminancia, la cual corresponde a la media ponderada o no ponderada de los colores, mientras que para imágenes en escala de grises selecciona los máximos detectados en el rango que corresponda a la imagen (8, 16 o 32 bits).

VI) Fourier Transform: La Transformada de Fourier es una representación matemática que permite la edición y procesamiento en el dominio de frecuencias de una imagen, es decir, en vez de usar las coordenadas espaciales descritas en secciones previas, en el espacio de Fourier, el argumento es la frecuencia. Cada posición corresponde al peso que tiene una determinada frecuencia en la imagen. El algoritmo más utilizado por los programas que permiten el procesamiento digital de imágenes corresponde al llamado Fast Fourier Transform (FFT). Para este trabajo, el filtro de mayor utilidad corresponde al filtro Pasabanda o *Bandpass Filter*, el cual permite eliminar las frecuencias altas y bajas de una imagen, es decir, las que estén fuera de un rango previamente definido.

En la Figura 2.29a) se muestra una imagen codificada en RGB en formato .png a la cual se le aplican los filtros descritos anteriormente. En las Figuras 2.29b) y 2.29c) se puede apreciar que, mientras la herramienta *smooth* desenfoca la imagen, *sharpen* acentúa los detalles haciendo parecer más definidos los bordes. En 2.29d), *find maxima* identifica los máximos locales de la imagen, arrojando una máscara binaria construida con dichos puntos. Y finalmente en 2.29e), *bandpass filter* elimina las frecuencias extremas "homogeneizando" la imagen.

Todos estos filtros se pueden aplicar sin problemas a imágenes en escala de grises.

2.7.3.3. Segmentación

De acuerdo al objetivo principal del procesamiento digital de imágenes establecido en este trabajo, la segmentación se vuelve una herramienta primordial para diferenciar el "fondo" de la imagen de aquellos objetos o figuras que estén en primer plano, ya que la segmentación permite dividir una imagen digital en varias partes o regiones denominadas Segmentos.

(a) Imagen original en RGB

(b) Smooth

(c) Sharpen

(d) Find Maxima

(e) Bandpass Filter

Figura 2.29: Imagen en RGB Procesada con los Filtros Descritos

Esta división se basa generalmente en características determinadas de los pixeles. Así, los algoritmos de segmentación se basan en propiedades básicas de los valores del nivel de gris, tales como:

- Discontinuidad: Basándose en cambios bruscos del nivel de intensidad se puede diferenciar los bordes de las regiones dentro de una imagen.
- Similitud: Se divide la imagen basándose en la búsqueda de zonas que tengan valores similares, conforme a criterios predefinidos.
- Umbralización: Corresponde a un método básico para diferenciar un objeto del fondo de la imagen mediante el método de binarización.

ImageJ permite realizar la umbralización de imágenes mediante la herramienta llamada Threshold. Esta herramienta permite seleccionar de forma automática o interactiva los valores de umbral inferior y superior en imágenes en escala de grises, logrando así diferenciar los objetos de interés del "fondo". Incluye 17 métodos de umbralización para la detección de bordes, cuyos detalles escapan del alcance de este trabajo (Landini, 2018b).

En una imagen en escala de grises, ya sea en 8, 16 o 32 bits, entrega como resultado una nueva imagen con valores binarios, es decir, una máscara que sólo presenta valores 0 (negro) y 255 (blanco). También, incluye una opción para imágenes en RGB decodificadas en 24 bits, donde los rangos de umbral se pueden establecer manualmente o en función de los componentes de valor de pixel de una sección definida por el usuario. Sin embargo, este comando no es necesario para los objetivos y necesidades de este trabajo. Para la aplicación de la herramienta de umbralización, se puede seleccionar manualmente para cada imagen el valor de umbral más idóneo, o se puede automatizar mediante una rutina implementada

en código. Sin embargo, al automatizar la umbralización, dado que es un método de umbralización global, la herramienta disponible aplica el mismo valor de umbral a la imagen completa, y a todas las imágenes en que se ejecute, lo cual puede llevar a que se reconozcan erróneamente los objetos de interés. Lo anterior se puede solucionar con un complemento de ImageJ llamado Auto Local Threshold, el cual se puede aplicar a imágenes de 8 bits y utiliza varios métodos de umbralización locales. Esto quiere decir que el umbral se calcula para cada píxel de acuerdo con las características de la imagen dentro de una vecindad de radio r (con unidades en pixeles) a su alrededor (Landini, 2018a).

En la Figura 2.30 se ejemplifica el resultado obtenido al aplicar este complemento en una imagen en escala de grises de 8 bits, utilizando el Método de Otsu (Otsu, 1979) con radio $r = 1$ pixel, en donde se puede apreciar en la Figura 2.30a) la imagen original en 8 bits, y en 2.30b) la máscara binaria obtenida.

(a) Imagen original en 8 bits (b) Auto Local Threshold - Método de Otsu

Figura 2.30: Imagen en 8 Bits Procesada con el Método de Umbralización de Otsu

2.7.3.4. Macros

Dado lo anterior, ImageJ es prácticamente ilimitado debido a la disponibilidad de complementos (plugins) y macros escritos por los usuarios. El lenguaje de programación de macros es amigable y fácil de usar, por lo que no se requiere conocimiento de Java. Por ejemplo, una macro puede identificar la cantidad de células en una imagen identificando los máximos locales como se ejemplifica en el código siguiente.

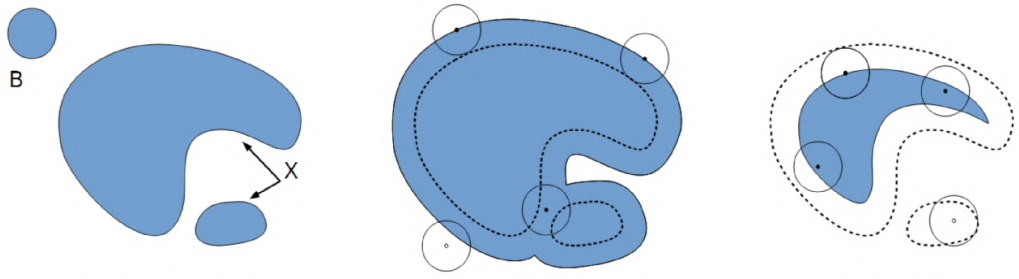
```
// ------------------------------------------------------------------
// Ejemplo de Código en Macro
// ------------------------------------------------------------------
  run("Cell Colony (31K)");    // Abre la imagen a analizar
  getRawStatistics(nPixels, mean, min, max, std, histogram);  // Obtiene el
    histograma de la imagen y la estadística del valor de sus pixeles
  run("Find Maxima...", "noise=&std output=[Point Selection] light"); //
    Identifica los máximos locales en una imagen
  getSelectionCoordinates(xCoordinates, yCoordinates);  // Obtiene las
    coordenadas de los máximos locales identificados
  print("count="+ xCoordinates.length); // Abre un cuadro de diálogo con la
    cantidad de máximos locales y sus coordenadas
// ------------------------------------------------------------------
```

2.7.3.5. Complementos

Otra herramienta de utilidad en ImageJ son los complementos o plugins, los cuales son programas externos escritos comúnmente en lenguaje Java, que ofrecen capacidades de pro-

cesamiento de imágenes adicionales que no están disponibles en el núcleo de ImageJ. Una vez implementado un complemento, no se distingue del programa mismo. Así, los complementos han transformado a ImageJ de un programa de procesamiento de imágenes a un marco que se puede utilizar para desarrollar soluciones aplicadas a un sinnúmero de áreas científicas y de la ingeniería.

Dada la versatilidad del procesamiento de imágenes, muchas de las herramientas desarrolladas como complementos para una aplicación en particular pueden ser aplicadas a diversos campos de la ciencia y la ingeniería. Así, una de las herramientas de gran utilidad en este estudio corresponde a los Filtros Morfológicos implementados por Legland et al. (2016). Esta herramienta fue incorporada como complemento al código fuente de ImageJ, pensado en el análisis y procesamiento de imágenes de muestras biológicas. Estos filtros permiten definir una metodología para describir formas por medio de unidades base, las cuales incluyen cuadrados, elipses, círculos y octógonos. Con ellos, se pueden aplicar técnicas de crecimiento y erosión, es decir, unir, intersectar o separar pixeles. Por ejemplo, con un filtro morfológico de dilatación cada punto de la imagen se compara con la unidad base definida. Si la unidad base centrada en el punto intersecta la estructura de interés, se obtiene un conjunto más grande que el original. Por el contrario, un filtro morfológico de erosión compara si el punto de la imagen está contenida dentro del conjunto original, obteniendo un conjunto más pequeño que el original, tal como se ejemplifica en la Figura 2.31.



(a) Binary set X and structuring element B

(b) Dilation of X by B

(c) Erosion of X by B

Figura 2.31: Principio de Análisis de Filtros Morfológicos, usando una estructura base circular (B) (Legland et al., 2016).

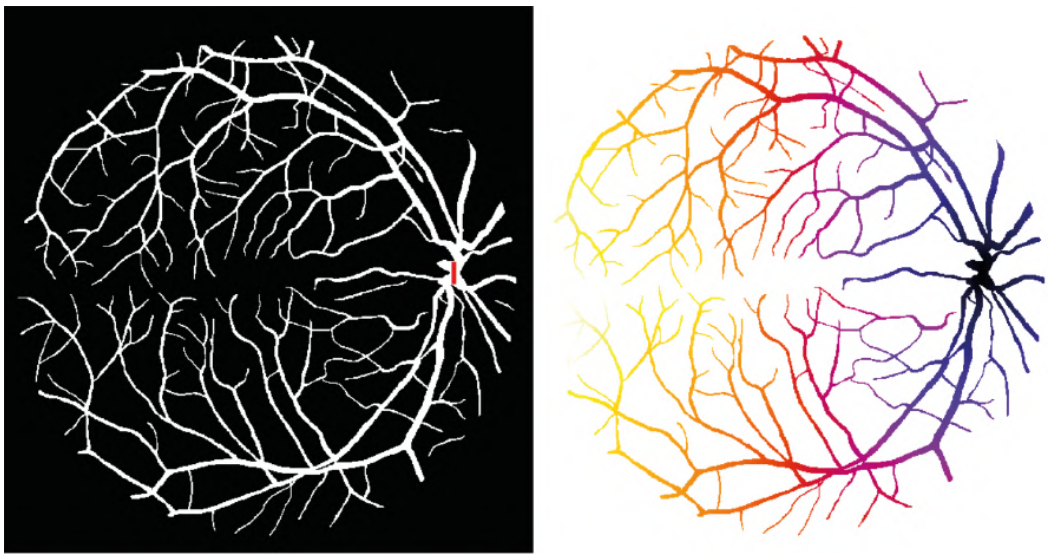
Ahora bien, dadas las características del agrietamiento en relaves, y dependiendo de la forma, ancho y separación de las grietas formadas, para el análisis de imágenes los bloques poligonales formados por las grietas constituyen estructuras curvilíneas muy delgadas, por lo que aplicar filtros comunes puede resultar difícil debido al pequeño tamaño de las estructuras. Lo anterior, puede resultar en la eliminación de la estructura de interés al aplicar un filtro de dilatación o erosión, o en la reducción del espesor de la estructura de interés. Por ello, el filtro direccional se transforma en una herramienta alternativa, ya que permite utilizar como base una unidad o elemento orientado en una dirección determinada. Por ejemplo, puede utilizar un segmento de línea de una longitud dada, y realizar operaciones morfológicas para varias orientaciones de la unidad base, tal como se esquematiza en la Figura 2.32.

Otra herramienta de gran utilidad implementada por Legland et al. (2016) correspon-

a) b) c) d) e)

Figura 2.32: Ejemplo de Aplicación de Filtro Direccional. a) Imagen Original Representando Células con Microscopía Concofal, b) Resultado Usando una Unidad Base en una Dirección (Dirección Horizontal), c) Unidad Base en una Dirección (Dirección Vertical), d) Unidad Base en dos Direcciones (Horizontal y Vertical), y e) Unidad Base en cuatro Direcciones (Horizontal, Vertical y Diagonales). Modificado de Legland et al. (2016).

de a la Transformada de Distancia Geodésica, la cual permite restringir la propagación de distancias a una región o máscara específica. Por ejemplo, en una red vascular permite identificar la distancia entre dos puntos mientras permanece dentro de la misma red, tal como se esquematiza en la Figura 2.33. Ello lo realiza calculando la distancia desde un marcador binario dado, identificado en rojo en la Figura 2.33a), mientras se restringe la propagación de la distancia dentro de una máscara binaria.



a) b)

Figura 2.33: Cálculo del Mapa de Distancia Geodésica sobre una Imagen Binaria. a) Imagen Original con el Marcador Destacado en Rojo, b) Resultado del Mapa de Distancia Geodésica donde Colores Cálidos Representan Distancias Largas y Colores Fríos Distancias Cortas. Modificado de Legland et al. (2016).

El marcador utilizado para medir las distancias puede ser un punto o una línea como en

el ejemplo anterior, o se puede utilizar otra imagen como marcador. Esto se puede realizar con la herramienta Geodesic Distance Map, la cual calcula la distancia entre cada pixel del primer plano de una imagen de máscara binaria y el pixel más cercano de una imagen marcador, mientras permanece dentro de la partícula representada por la imagen de máscara.

Se destaca la gran similitud que puede llegar a tener la imagen de la Figura 2.33a) que corresponde a una red vascular, con el agrietamiento observado en suelos finos. Por ello, este complemento puede ser de gran utilidad al aplicarlo al procesamiento de imágenes de agrietamiento en suelos finos y/o relaves mineros, permitiendo obtener parámetros de interés tales como el ancho y distancia de grietas.

Capítulo 3

METODOLOGÍA

EN la presente investigación se llevó a cabo una extenso plan de pruebas experimentales con el objetivo de ampliar el conocimiento acerca del agrietamiento superficial en relaves y su relación con diversos procesos que dichos materiales experimentan en terreno. Los ensayos han sido definidos con el fin de simular las condiciones ambientales y de depositación existentes en las faenas mineras del norte de Chile, y así poder cuantificar variables que definen el comportamiento en desecación, tales como el nivel de agrietamiento superficial, contenido de agua, tasas de evaporación y características geométricas resultantes de la depositación.

En este capítulo se describe la caracterización de los materiales utilizados en el estudio, en conjunto con el banco experimental implementado, el plan de trabajo y la metodología empleada.

3.1. Caracterización de Materiales

En esta investigación se estudió en laboratorio el comportamiento bajo desecación de tres relaves finos provenientes de la extracción de hierro y cobre de tres faenas mineras diferentes ubicadas en el norte de Chile, los cuales se han denominado Relave n°1 o MR1, Relave n°2 o MR2 y Relave n°3 o MR3 (Figura 3.1).

Las tres muestras fueron extraídas durante campañas a terreno a los depósitos de relaves. Una vez en el laboratorio, los materiales se desecaron en horno a temperatura constante de 110 $\pm$ 5°C y luego, se disolvieron manualmente los bloques grandes extraídos para obtener una muestra homogénea sin grumos o terrones. Dichas muestras se almacenaron en recipientes de plástico herméticos a una humedad constante de 1 $\pm$ 0.2 %. Tanto los ensayos de caracterización de los relaves como los ensayos de desecación se realizaron con material de dichas muestras.

a) b) c)

Figura 3.1: Relaves Utilizados en el Estudio, a) MR1 (hierro), b) MR2 (hierro) , y c) MR3 (cobre).

3.1.1. Propiedades Índice

El relave MR1 utilizado en este programa experimental corresponde a un relave de tipo integral de color marrón, sin olor ni materia orgánica. Mediante análisis por cribado e hidrómetro se determinó su distribución granulométrica, arrojando un contenido de finos del 86 %, y 14 % de arenas. Con un índice de plasticidad de 5 % el relave clasifica según USCS como una Arcilla Limosa de baja plasticidad (CL-ML). Por su parte, el relave MR2 corresponde a un relave de tipo integral de color gris, sin olor ni materia orgánica. El análisis granulométrico arrojó un contenido de finos del 95 % y un 5 % de arenas. Presenta además, una plasticidad levemente superior a MR1, con un valor de IP = 13 %. Así, clasifica como una Arcilla de baja plasticidad (CL). Respecto al relave MR3, corresponde a un relave de tipo integral de color gris, sin olor ni materia orgánica. Con un porcentaje de finos del 74 % y nula plasticidad, clasifica según USCS como un Limo Inorgánico (ML). En la Figura 3.2 se presentan las curvas granulométricas y en la Figura 3.3 la carta de plasticidad para los tres relaves. Mientras que en la Tabla 3.1 se resumen las propiedades índice de los relaves estudiados.

Tabla 3.1: Resumen de Caracterización y Clasificación de Relaves en Estudio.

ID	LL	LP	IP	USCS	Grava	Arena	Finos	Gs
	%	%	%		%	%	%	-
MR1	25	20	5	CL - ML	0	14	86	3.020
MR2	31	18	13	CL	0	5	95	3.018
MR3	-	-	NP	ML	0	27	74	2.754

Por último, en la Figura 3.4 se presentan las curvas de retención de agua para los tres relaves en estudio, las cuales fueron determinadas en laboratorio para muestras en slurry preparadas a un CS inicial de 65 %. Para ello, se realizaron pruebas en cámara de presión

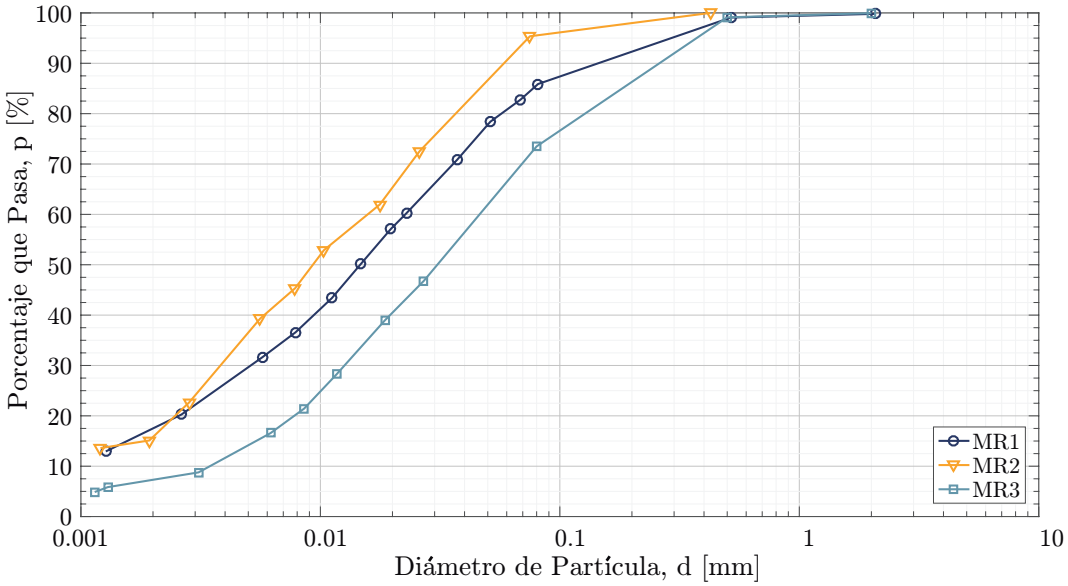


Figura 3.2: Curvas Granulométricas de Relaves.

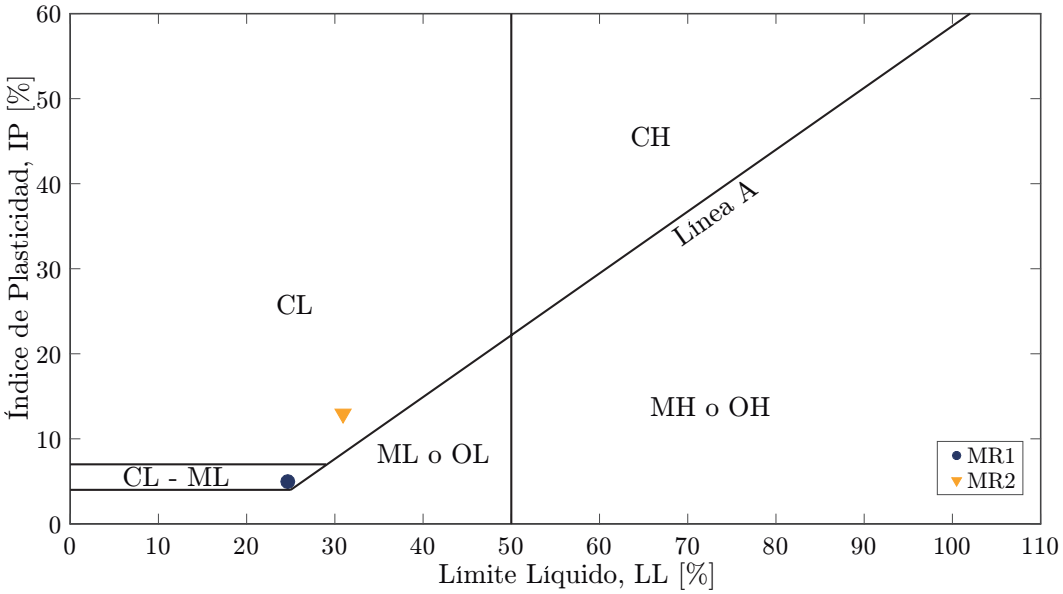


Figura 3.3: Carta de Plasticidad de Relaves.

utilizando platos cerámicos porosos, y aplicando la técnica de traslación de ejes. Para cubrir un amplio rango de presiones se utilizaron dos platos porosos, uno para presiones menores a 500kPa, y otro para presiones entre 500 y 1500kPa. Las curvas se obtuvieron a partir de la medición de cuatro puntos equiespaciados en una escala logarítmica, esto es, a 30, 100, 400 y 1500kPa. Con ello, las curvas se obtuvieron mediante ajuste del método de Fredlund

and Xing (1994). Finalmente, en la Tabla 3.2 se presentan los valores obtenidos para AEV para cada relave en estudio.

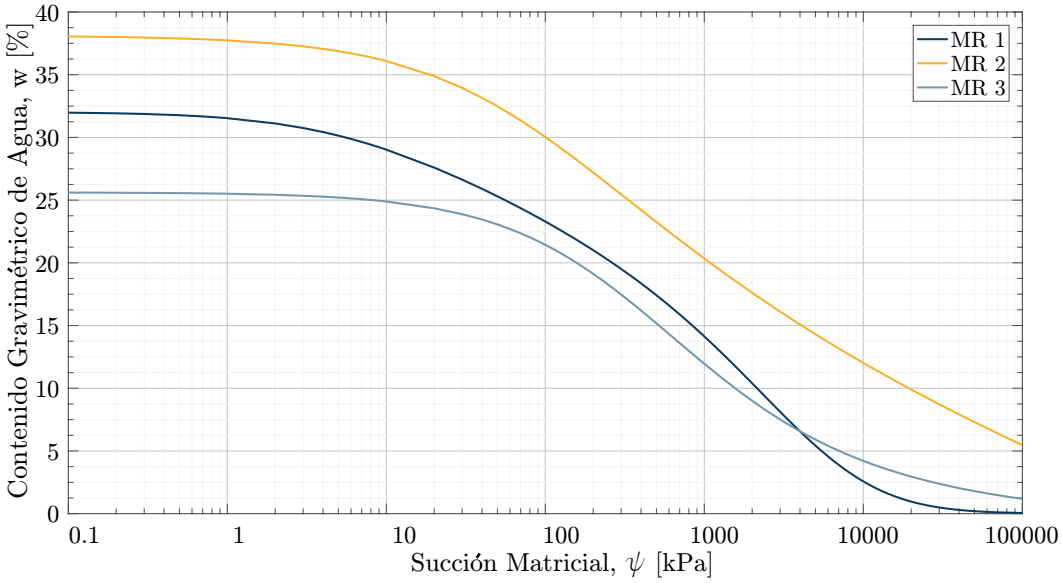


Figura 3.4: Curva de Retención de Agua (SWRC).

Tabla 3.2: Valor de Entrada de Aire para Relaves en Estudio.

ID	ψ
	kPa
MR1	10.85
MR2	17.80
MR3	23.00

3.1.2. Curva de Contracción

Para determinar el Límite de Contracción (LC) se aplicó el procedimiento descrito en ASTM D 4943 - 02 a tres muestras del relave MR1 en slurry a contenidos de sólidos inicial de 80 %, 70 % y 66 %, utilizando para ello el set de la Figura 3.5. Adicionalmente, se midió la Curva de Contracción para los tres relaves utilizando una metodología experimental que permitió medir los cambios de humedad y de volumen en las muestras. Seis muestras del relave MR1 fueron preparadas en slurry a CS inicial de 80 %, 70 % y 64 %, del relave MR2 se prepararon siete muestras a CS inicial de 70 %, 64 % y 55 %, y del relave MR3 se prepararon cinco muestras a CS inicial de 79 %, 72 % y 62 %.

Figura 3.5: Set Utilizado para Determinar el Límite de Contracción Acorde al Procedimiento Descrito en ASTM D 4943 - 02 (Gilson Company Inc.).

Las muestras se dejaron desecar a temperatura ambiente para permitir un secado lento sin agrietamiento, facilitando así la medición del cambio volumétrico al no existir contracción por grietas, tal como se esquematiza en la Figura 3.6. Para ello, se utilizaron moldes metálicos de 5cm de diámetro y 1.5cm de alto, tal como se muestra en la Figura 3.7. Para evitar el roce entre el material y las paredes de los moldes, previo a la depositación del relave se cubrió las paredes y la base de los moldes metálicos con vaselina, permitiendo así la contracción de los relaves sin restricciones. Una vez comenzada la desecación, se registró periódicamente la masa y el volumen de las muestras. De acuerdo a lo sugerido por Zhang et al. (2018), las mediciones de masa y volumen se realizaron al menos tres veces por hora, por al menos 7 días o hasta que el cambio volumétrico se detuvo.

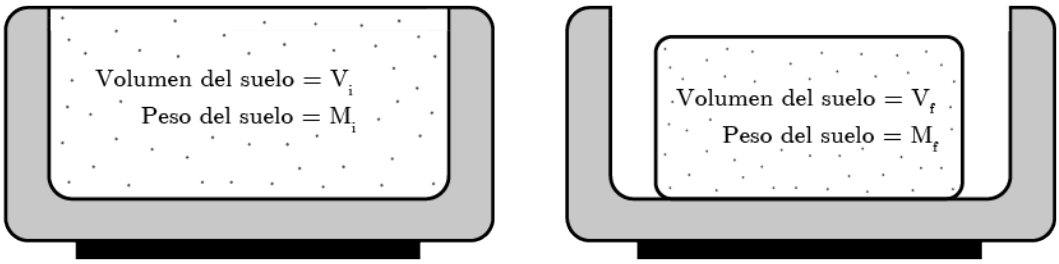


Figura 3.6: Esquema del Cambio Volumétrico Observado en Muestras en Desecación para Curva de Contracción.

3.2. Preparación de Muestras

Por su parte, para los ensayos de desecación, las muestras se prepararon en estado slurry a un contenido de sólidos determinado utilizando un mezclador eléctrico portátil. El material se mezcló durante 20 minutos a una velocidad baja para evitar la entrada de aire a la mezcla.

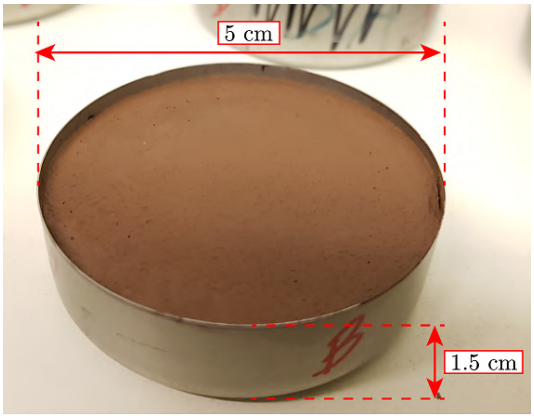


Figura 3.7: Muestra en Desecación para la Medición de la Curva de Contracción del Relave MR1.

La depositación en las bandejas de desecación se realizó mediante vertido gravitacional. De esta forma, se obtuvieron muestras homogéneas, saturadas, fácilmente reproducibles, y que además, permiten simular la condición de depositación en terreno.

Al depositar las muestras en las bandejas se registró la masa y el volumen inicial. Además, el grado de saturación (S) se determinó al inicio de cada preparación de acuerdo a la Ecuación 3.1:

$$S = \frac{w \cdot G_s}{e} \tag{3.1}$$

Donde w corresponde al contenido de humedad y e a la relación de vacíos. Por su parte, la relación de vacíos inicial se determinó a partir de relaciones volumétricas dado que el volumen inicial de cada muestra es conocido.

Luego de vertida la mezcla en las bandejas de desecación, las muestras se dejaron consolidar bajo su peso propio durante 45 minutos. Al término de esta etapa se dio inicio a la desecación de las muestras en el banco experimental detallado en la Sección 3.3.

3.3. Banco Experimental

En laboratorio, se implementó un banco experimental consistente en una estructura metálica de dos niveles. En el primer nivel se ubican las bandejas con las muestras en desecación, mientras que en el segundo nivel se encuentra la instrumentación utilizada, la cual comprende el sistema de monitoreo fotográfico, ventiladores, y sensores de humedad y temperatura. Las bandejas en desecación utilizadas son de sección cuadrada de 20x20cm de área. Junto al relave en desecación, periódicamente se midió la evaporación potencial. Considerando los resultados de Lakshmikantha et al. (2006), se utilizaron bandejas de base lisa para evitar el efecto de la rugosidad en el patrón de agrietamiento. En la Figura 3.8 se presenta un diagrama del banco experimental utilizado, mientras que en la Figura 3.9 se

presenta una fotografía del banco ya implementado.

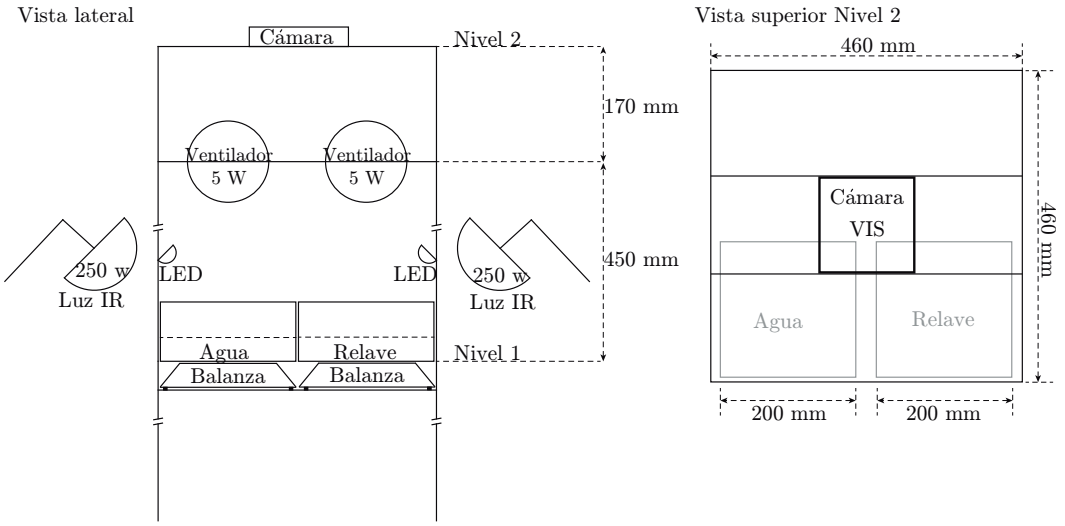


Figura 3.8: Esquema del Banco Experimental Implementado en Laboratorio.

Las condiciones de terreno se simularon mediante lámparas con luz infrarroja de 250W, y ventiladores de 5W de potencia sobre cada bandeja, alcanzando en promedio 35°C. La humedad ambiental no fue registrada, ya que según lo demuestran los resultados de Rodriguez (2002) ésta no influye en el patrón de agrietamiento. Sin embargo, la humedad ambiental dentro del laboratorio durante los ensayos de desecación se mantuvo sin variaciones importantes. La evaporación de agua se midió a través de la pérdida de masa de las bandejas registrando periódicamente su peso. Tanto lámparas como ventiladores se mantuvieron encendidos durante todo el ensayo, de forma de mantener la temperatura constante sobre las muestras.

El progreso de la desecación fue monitoreado periódicamente mediante imágenes capturadas en el rango visible (VIS) utilizando una tarjeta Raspberry Pi 3 mediante el módulo de cámara V2 con un sensor Sony IMX219 de 8 megapixeles. La tarjeta Raspberry Pi 3 permite controlar el módulo de la cámara y almacenar las fotografías capturadas. Utilizando un ordenador de escritorio se conectó la tarjeta Raspberry Pi 3 mediante una señal WiFi, permitiendo desde el ordenador dar la instrucción a la tarjeta de ejecutar el código de comandos para comenzar la captura periódica de fotografías, sin necesidad de instalar cableado de comunicación entre ambos dispositivos. La comunicación se realizó mediante la utilización de PuTTY, un cliente SSH de licencia liberada. La descarga de las imágenes desde la tarjeta Raspberry Pi 3 al ordenador de escritorio se realizó también mediante la conexión WiFi. Del mismo modo, se instalaron tres sensores de humedad y temperatura ambiental DHT22 a la tarjeta Raspberry Pi3 controlados mediante WiFi desde el ordenador. En la Figura 3.10 se esquematiza el sistema de monitoreo fotográfico implementado.

El código construido para ejecutar la captura y almacenamiento periódico de fotografías de la desecación se realizó en lenguaje Python, como también el código para el registro de

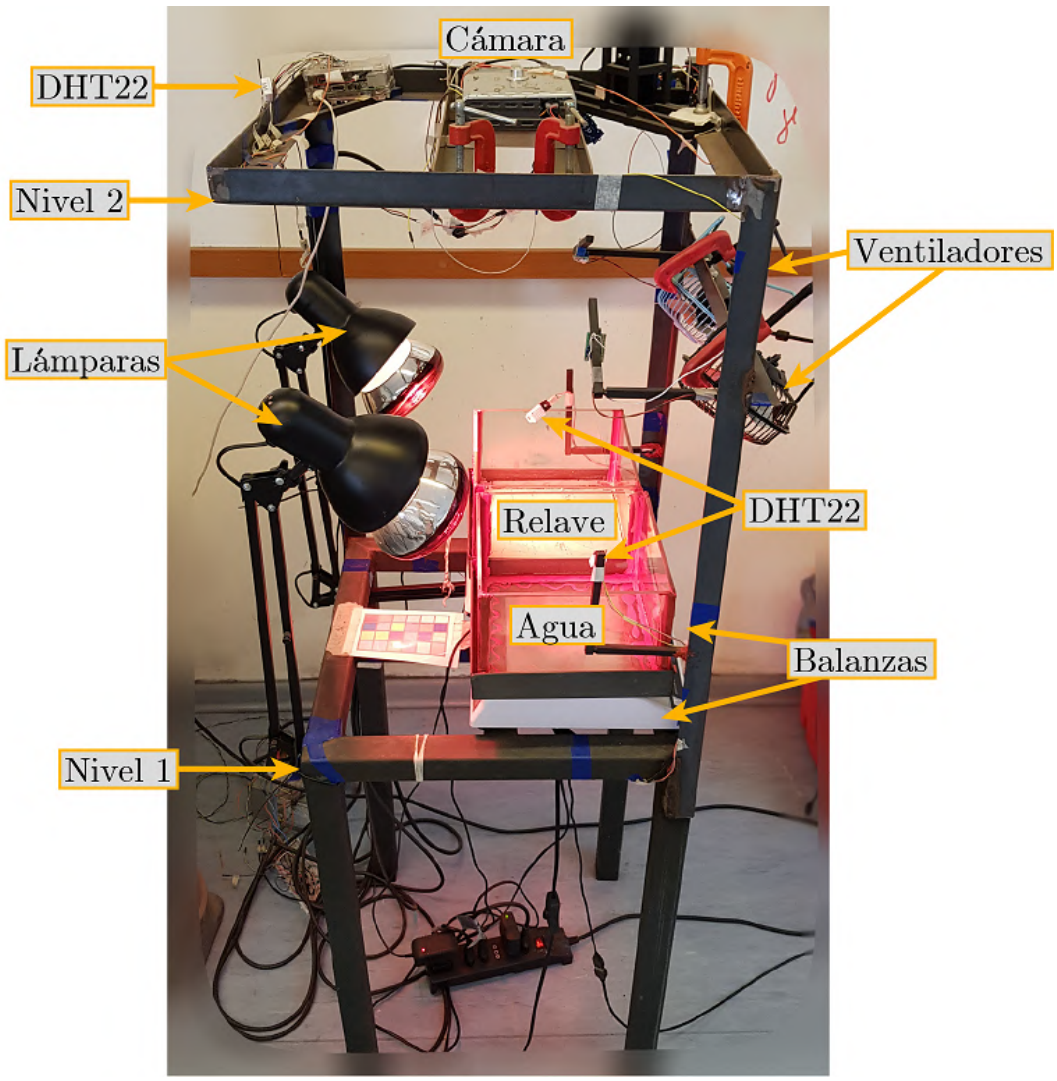


Figura 3.9: Banco Experimental Implementado en Laboratorio.

la temperatura ambiental. Ambos se pueden encontrar en el Anexo B.

3.4. Programa Experimental

El programa experimental se diseñó y se ejecutó en laboratorio, consistente en tres rondas de ensayo por cada tipo de relave. Estas pruebas tienen por objetivo estudiar variables relevantes del proceso de agrietamiento bajo desecación y que podrían dominar la respuesta contractiva de relaves de grano fino. A continuación, se describe el programa experimental y se indica el propósito de cada conjunto de pruebas:

i) Ensayos una capa: Se ejecutaron ensayos de desecación para los relaves MR1, MR2 y

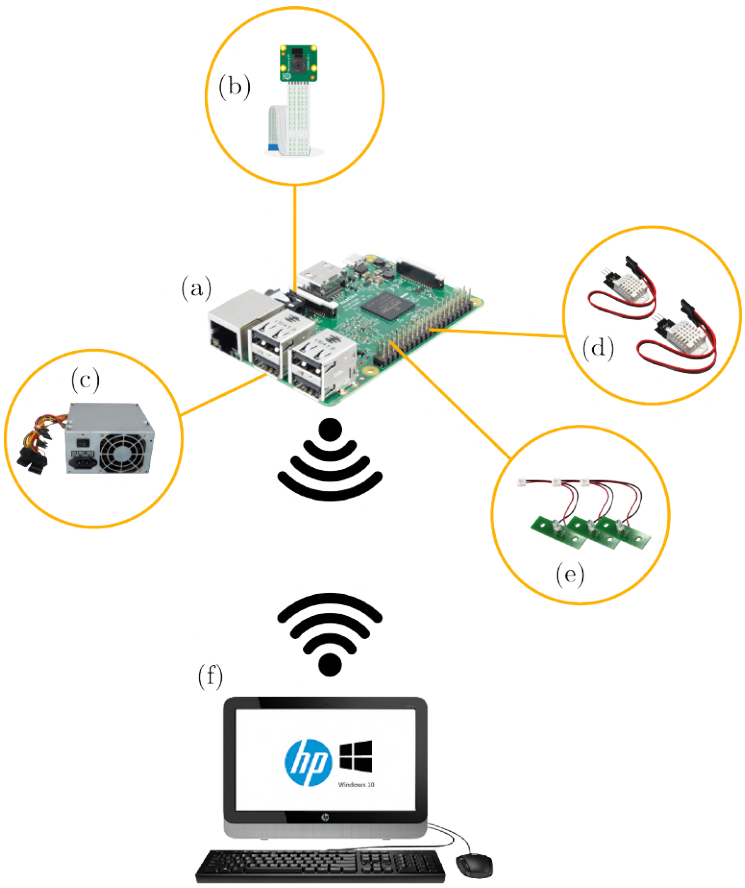


Figura 3.10: Sistema de Monitoreo Fotográfico, donde a)Tarjeta Raspberry Pi 3, b) Módulo de Cámara V2, c) Fuente de Alimentaciónd de 12 V, d) Sensores DHT22, e) Luces Led, y f) Ordenador de Escritorio.

MR3, a un contenido de sólidos inicial de 70 %, 64 % y 70 %, respectivamente. Para cada caso se varió la altura o espesor de la capa depositada con el objetivo de evaluar la influencia de la geometría y las condiciones de contorno en el proceso de desecación. En las Tablas 3.3, 3.4 y 3.5 se resumen los ensayos realizados para cada material, detallando el espesor inicial h, la relación de aspecto AHR, el nivel de humedad inicial w, y el contenido de sólidos inicial CS.

II) Ensayos multicapa: Los ensayos multicapa tienen como objetivo evaluar la influencia en el patrón de agrietamiento de una capa fresca de relave depositada sobre una ya desecada y agrietada. Para ello, primero se desecó una capa de relave fresco según lo descrito en el punto anterior, pero en este caso hasta alcanzar una humedad de 16 % en MR1 y MR2. De esta forma se asegura que el patrón de agrietamiento se desarrolla completo al encontrarse bajo la humedad correspondiente al LC. Una vez alcanzado este punto se depositó sobre la capa ya desecada una capa fresca de relave, y se dejó consolidar de acuerdo a lo descrito en la Sección 3.2. Tal como se describe en las Tablas

Tabla 3.3: Resumen de Programa de Ensayos de Una Capa para Relave MR1.

ID	h	AHR	$w_{inicial}$	$CS_{inicial}$
	mm	cm^2/cm	%	%
MR1-5	7.0	572	43	70
MR1-6	5.8	694	43	70
MR1-7	29.0	138	43	70
MR1-8	10.1	396	44	69
MR1-9a	6.3	638	43	70
MR1-10a	6.6	609	44	70
MR1-11a	7.5	534	43	70
MR1-12a	6.0	664	43	70
MR1-13a	5.8	695	43	70
MR1-14a	5.9	676	43	70
MR1-15a	6.5	618	43	70

Tabla 3.4: Resumen de Programa de Ensayos de Una Capa para Relave MR2.

ID	h	AHR	$w_{inicial}$	$CS_{inicial}$
	mm	cm^2/cm	%	%
MR2-1	7.4	541	57	64
MR2-2	13.2	302	58	63
MR2-3	6.2	644	56	64
MR2-4	8.4	479	56	64
MR2-5	13.2	304	56	64
MR2-6a	6.1	655	57	64
MR2-7a	6.1	656	57	64
MR2-8a	5.6	710	57	64
MR2-9	21.3	188	56	64

3.6 y 3.7, se ensayaron muestras de 2 y 3 capas.

III) Ensayos con variación del contenido de sólidos inicial: Finalmente, dado que durante la operación de los depósitos de relaves puede variar el contenido de sólidos con que éstos son depositados, se realizaron ensayos de desecación para los relaves MR1 y MR2 de

Tabla 3.5: Resumen de Programa de Ensayos de Una Capa para Relave MR3.

ID	h	AHR	$w_{inicial}$	$CS_{inicial}$
	mm	cm^2/cm	%	%
MR3-1	15	267	43	70
MR3-2	30	133	43	70

Tabla 3.6: Resumen de Programa de Ensayos multicapa para Relave MR1.

ID	h	AHR	h_{acum}	AHR_{total}	$w_{inicial}$	$CS_{inicial}$
	mm	cm^2/cm	mm	cm^2/cm	%	%
MR1-9a	6.3	638	6.3	638	43	70
MR1-9b	6.9	580	13.2	304	43	70
MR1-10a	6.6	609	6.6	609	44	70
MR1-10b	7.3	551	13.8	289	44	70
MR1-11a	7.5	534	7.5	534	43	70
MR1-11b	8.1	494	15.6	257	47	68
MR1-12a	6.0	664	6.0	664	43	70
MR1-12b	6.0	667	12.0	333	43	70
MR1-12c	5.9	677	17.9	223	43	70
MR1-13a	5.8	695	5.8	695	43	70
MR1-13b	6.0	664	11.8	340	43	70
MR1-13c	6.0	663	17.8	225	43	70
MR1-14a	5.9	676	5.9	676	43	70
MR1-14b	6.3	635	12.1	331	43	70
MR1-14c	5.9	677	18.0	222	43	70
MR1-15a	6.5	618	6.5	618	43	70
MR1-15b	6.9	581	13.4	299	43	70
MR1-15c	7.0	570	20.4	196	43	70

una capa, pero variando el contenido de sólidos inicial, entre 75 % y 56 % para MR1, y entre 64 % y 44 % para MR2. El detalle del programa realizado se presenta en las Tablas 3.8 y 3.9.

Tabla 3.7: Resumen de Programa de Ensayos de multicapa para Relave MR2.

ID	h	AHR	h_{acum}	AHR_{total}	$w_{inicial}$	$CS_{inicial}$
	mm	cm^2/cm	mm	cm^2/cm	%	%
MR2-6a	6.1	655	6.1	655	57	64
MR2-6b	7.8	510	14.0	287	57	64
MR2-7a	6.1	656	6.1	656	57	64
MR2-7b	8.0	503	14.1	285	57	64
MR2-7c	7.3	547	21.4	187	56	64
MR2-8a	5.6	710	5.6	710	57	64
MR2-8b	8.0	497	13.7	292	57	64
MR2-8c	7.8	512	21.5	186	57	64

Tabla 3.8: Resumen de Programa de Ensayos con Variación de Sólidos Inicial para Relave MR1.

ID	h	AHR	$w_{inicial}$	$CS_{inicial}$
	mm	cm^2/cm	%	%
MR1-16	6.1	658	33	75
MR1-17	5.8	684	53	65
MR1-18	6.5	615	66	60
MR1-19	6.9	581	80	55
MR1-20	6.3	638	54	65
MR1-21	6.4	621	66	60
MR1-22	6.8	588	82	55
MR1-23	7.0	576	54	65
MR1-24	6.6	610	67	60
MR1-25	7.1	566	82	55

3.5. Campaña a Terreno

Previo a la ejecución del programa experimental en laboratorio, se realizó una campaña a terreno al depósito de relaves del cual se extrajeron las muestras MR1. En esta oportunidad se realizó un mapeo de la superficie del depósito utilizando para ello un vehículo aéreo no tripulado (UAV) o dron, modelo Phantom 4 Pro (Figura 3.11), con el cual se tomaron fotografías del patrón de agrietamiento superficial desde una altura de 50m en forma de ase-

Tabla 3.9: Resumen de Programa de Ensayos con Variación de Sólidos Inicial para Relave MR2.

ID	h	AHR	$w_{inicial}$	$CS_{inicial}$
	mm	cm^2/cm	%	%
MR2-10	6.3	632	67	60
MR2-11	6.8	585	79	56
MR2-12	7.2	559	92	52
MR2-13	7.0	569	109	48
MR2-14	7.0	570	128	44
MR2-15	6.9	582	79	56
MR2-16	6.4	621	67	60
MR2-17	7.0	569	109	48
MR2-18	7.1	561	92	52
MR2-19	7.0	573	128	44

gurar una buena resolución del patrón de agrietamiento presente en terreno. Las fotografías se capturaron en formato RGB, con una resolución de 4864x3648 pixeles.

Figura 3.11: Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV) o dron, Phantom 4 Pro, Utilizado en Terreno.

Las fotografías capturadas permiten identificar claramente el patrón de agrietamiento

del relave, cubriendo cada una un área de 72mx97m aproximadamente. En la Figura 3.12 se presenta una de las fotografías capturadas en el depósito del relave MR1.

Dado que las superficies de los depósitos de relaves tienden a cubrir grandes áreas, las capas de relave depositado resultan con bajos espesores. Por lo tanto, las relaciones de aspecto área/volumen (AHR) tienden a ser altas, generalmente $AHR > 400\ cm^2/cm$. Por esta razón, para el estudio de la influencia del AHR en el patrón de agrietamiento se ensayaron muestras con relaciones de aspecto entre 138 cm^2/cm y 800 cm^2/cm.

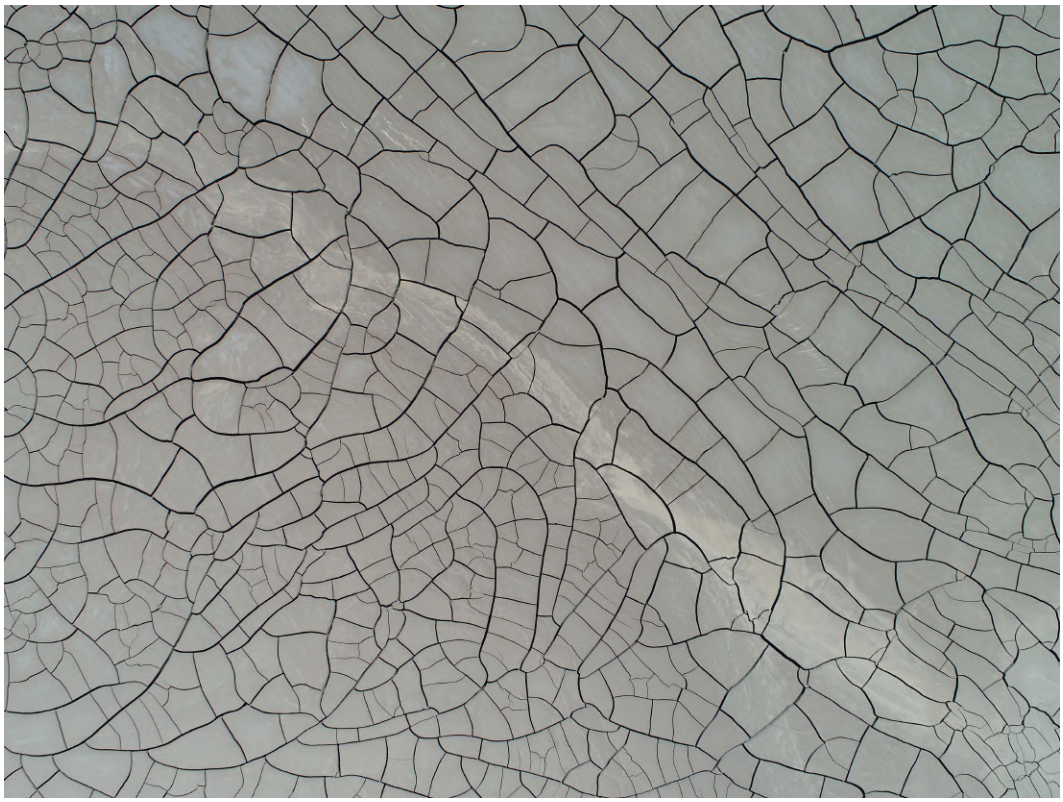


Figura 3.12: Agrietamiento Superficial en un Depósito de Relaves del Norte de Chile, del cual se Extrajo las Muestras MR1.

Debido a la pandemia causada por el COVID-19, no fue posible extender las investigaciones de campo relacionadas con los materiales en estudio. Por lo tanto, queda abierta una rama significativa de investigación relacionada al agrietamiento superficial en relaves mineros.

Capítulo 4

PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES EN IMAGEJ

DE acuerdo a los objetivos planteados en la Sección 1.3, el propósito de utilizar el procesamiento digital de imágenes en la presente investigación nace a partir del desarrollo exponencial que ha tenido en los últimos años, aplicado a diferentes disciplinas, evidenciando un gran potencial para la extracción y análisis de información en el área de la geotecnia minera. Dado lo anterior, el principal objetivo esperado del procesamiento de imágenes en el presente trabajo consiste en identificar y separar el área agrietada del área no agrietada de las fotografías de la superficie de relaves en desecación. Y a partir de dichos resultados, extraer información relevante para el análisis.

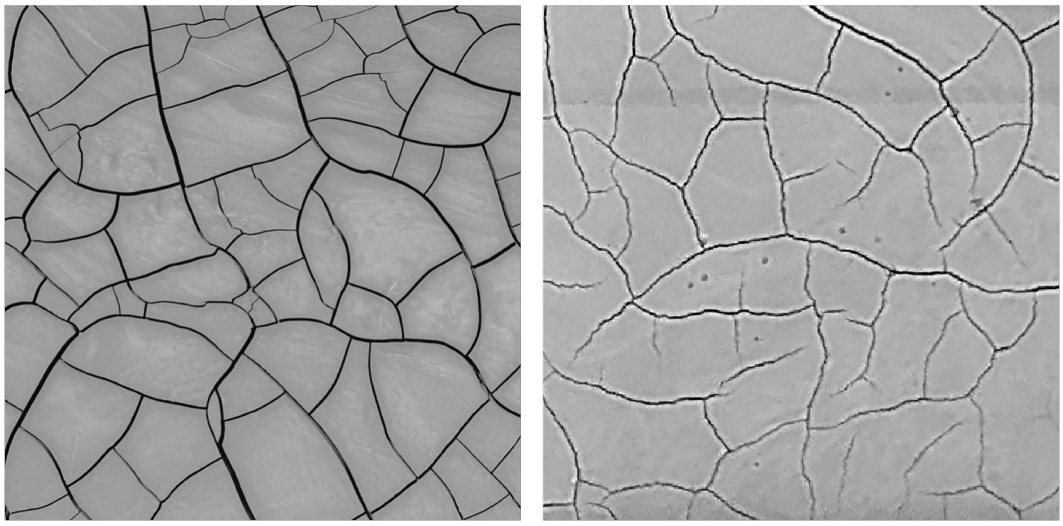
4.1. Descripción de Fotografías

Tal como se muestra en la Figura 4.1, las fotografías a analizar se caracterizan principalmente por tener un rango acotado de colores, distinguiéndose claramente el área agrietada del área no agrietada o fondo de la imagen. De acuerdo a lo descrito en la Sección 2.7.3.3, la herramienta más idónea para lograr esta diferenciación corresponde a la Umbralización, en la cual el objetivo es obtener una imagen de salida en la cual los pixeles sólo puedan tener dos valores: negro (0) o blanco (255), es decir, una Máscara Binaria.

El procesamiento de imágenes se puede optimizar al trabajar las imágenes en escala de grises, siendo suficiente una profundidad de 8 bits. Así, en vez de analizar las imágenes en formato RGB con tres canales (rojo, verde y azul), el análisis se realiza solo a una matriz de 256x256 pixeles, permitiendo ahorrar recursos computacionales y acelerando el proceso.

4.2. Procesamiento Digital de Imágenes Implementado

En la Figura 4.2 se presenta el paso a paso seguido para el procesamiento digital de las imágenes capturadas del patrón de agrietamiento en laboratorio. La rutina de análisis implementada consta de 9 pasos, donde en el primero se transforman las imágenes a co-



a) b)

Figura 4.1: Patrón de Agrietamiento Observado en a) Terreno, y b) Laboratorio.

lor en formato RGB a escala de grises, tal como se muestra en las Figuras 4.2a) y 4.2b). Luego, se aplica un filtro Median con radio variable para eliminar las imperfecciones que puedan haber en la superficie no agrietada del relave, por ejemplo, en laboratorio pueden crearse sombras que afecten la identificación de las grietas, mientras que en terreno, pueden existir imperfecciones como descascaramiento de la superficie, y/o precipitación de sales. Para lo anterior, el filtro Median es de gran utilidad al permitir eliminar el "ruido" no deseado en la imagen. La fotografía con el filtro Median aplicado se presenta en la Figura 4.2c).

Al homogeneizar la imagen en escala de grises se puede identificar claramente mediante el histograma de valores de los pixeles las zonas correspondientes al fondo no agrietado, y al área agrietada, tal como se señala en la Figura 4.3a). Sin embargo, el fondo no agrietado aun cubre un rango amplio de valores. Dado lo anterior, es necesario reducir el rango de valores asignados al fondo no agrietado. Para ello, una buena herramienta es trabajar en el dominio de las frecuencias, eliminando las frecuencias altas y bajas mediante un filtro pasabanda. En la Figura 4.2d) se presenta la imagen resultante al aplicar el filtro pasabanda limitando frecuencias altas y bajas a la imagen en escala de grises. El histograma resultante se presenta en la Figura 4.3b), el cual permite apreciar que se reduce significativamente el rango de valores que adopta el fondo no agrietado y el área agrietada.

Una vez que los pixeles correspondientes al fondo no agrietado se han homogeneizado y diferenciado de los pixeles correspondientes al área agrietada, se procede a aplicar un método de umbralización para así obtener así una máscara binaria. En este caso, se utilizó el método Median con radio variable dado que arrojó los resultados más satisfactorios. En la Figura 4.2e) se presenta la máscara binaria obtenida luego de la umbralización. En ella, en color negro se representa el fondo no agrietado con valor 0, mientras que en blanco se representa el área agrietada con valor 255. El resultado obtenido, si bien permite diferenciar

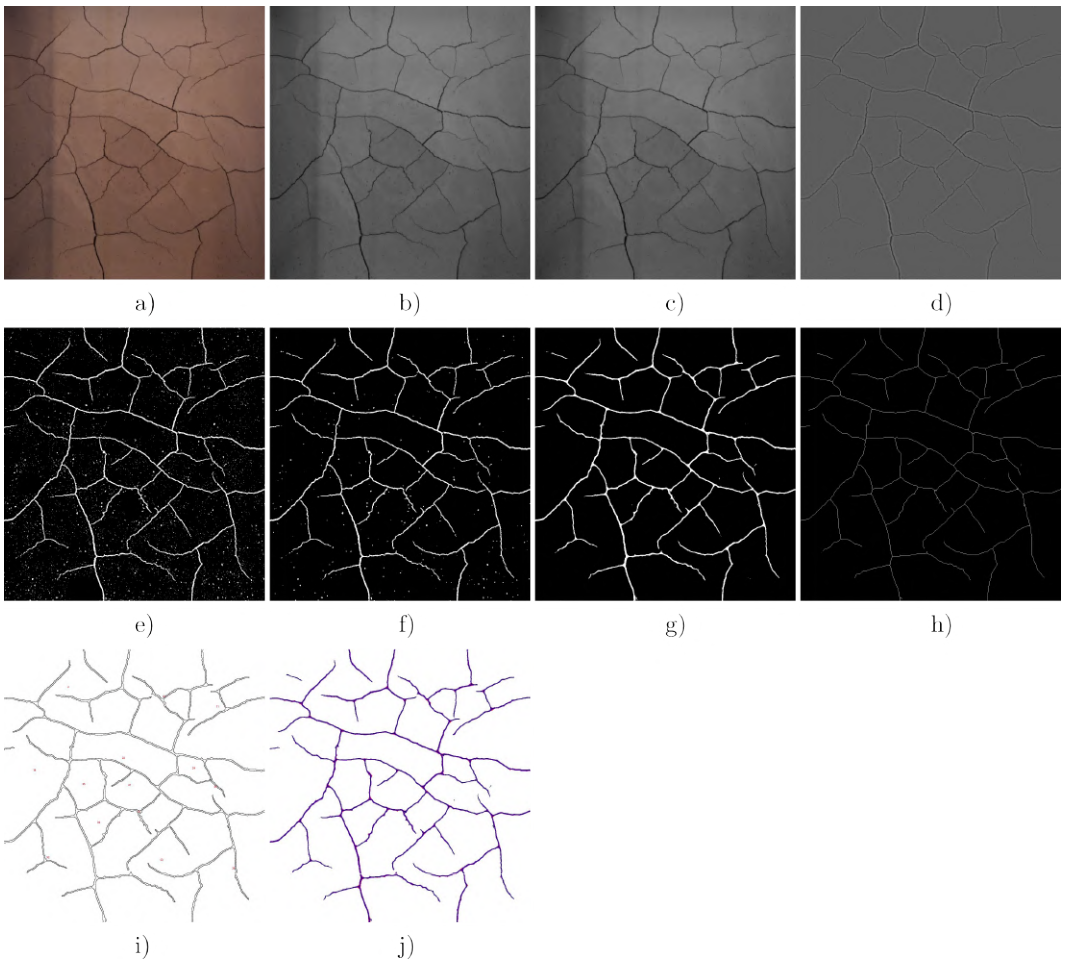


Figura 4.2: a) Imagen Original en Formato RGB, b) Imagen en Escala de Grises de 8 bit, c) Imagen en Escala de Grises con Reducción de Ruido Utilizando el Filtro Median, d) Imagen Resultante de Filtrar Altas y Bajas Frecuencias con Filtro Pasabanda, e) Máscara Binaria, f) Máscara Binaria con Reducción de Ruido Utilizando un Filtro Median, g) Máscara Binaria Optimizada con un Filtro Morfológico, h) Máscara Esqueleto, i) Bloques Poligonales, y j) Ancho de Grietas.

satisfactoriamente las grietas del área no agrietada, mantiene ruido dentro de la imagen, el cual no es posible eliminar solo con el filtro pasabanda. Dado lo anterior, se utiliza la herramienta Despeckle de ImageJ, el cual corresponde a un filtro Median que actúa en la vecindad 3x3 de cada pixel de la imagen. Es especialmente útil ya que, en general, los filtros Median son buenas herramientas para eliminar el ruido de "sal y pimienta", tal como se ejemplifica en la Figura 4.2f).

Finalmente, la máscara binaria se refina utilizando un filtro morfológico de radio variable, basado en un criterio de tamaño. De esta forma se logra diferenciar los pixeles correspon-

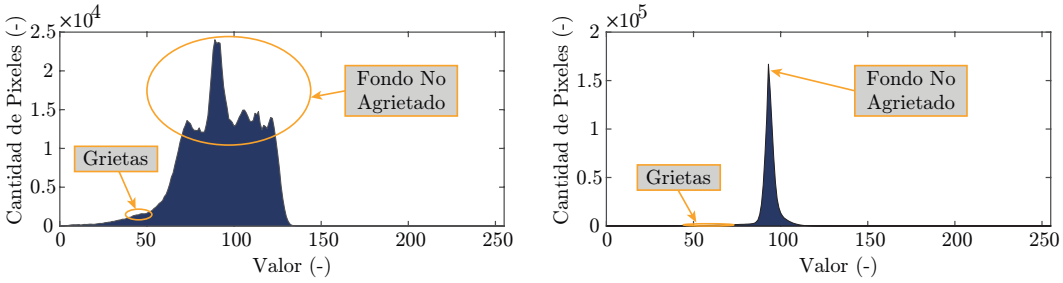


Figura 4.3: a) Histograma de Imagen en Escala de Grises, Figura 4.2c), y b) Histograma de Imagen con Filtro Pasabanda, Figura 4.2d).

dientes a las grietas, de aquellos pixeles correspondientes al ruido remanente que es necesario eliminar. El resultado de aplicar este filtro se presenta en la Figura 4.2g). Esta imagen corresponde a la salida principal del procesamiento digital de imágenes de esta investigación.

La importancia de esta imagen radica en que se puede utilizar como input para obtener información adicional del patrón de agrietamiento. Es así como, por medio de un algoritmo de remoción de pixeles se puede obtener el "esqueleto" de las grietas, es decir, la ruta del patrón de agrietamiento con ancho de un pixel, tal como se muestra en la Figura 4.2h). A partir de esta imagen, por ejemplo, se puede conocer la longitud de las grietas a medida que avanza el proceso de desecación. La máscara binaria de la Figura 4.2g) permite además, obtener el número de bloques poligonales que se forman debido a la intersección de las grietas. Ello se logra utilizando la herramienta "Analyze Particle" de ImageJ, la cual escanea la imagen para identificar los elementos cerrados mediante la detección de bordes, y así medir en cada uno aspectos geométricos tales como área, perímetro, razón de aspecto, entre otros, tal como se muestra en la Figura 4.2i).

Finalmente, interesa determinar una medida para definir el ancho de las grietas. Para ello, se utiliza la herramienta "Geodesic Distance Map" descrita en la Sección 2.7.3.5. Dicha herramienta obtiene el mapa geodésico de la imagen calculando la distancia que hay desde la línea central de cada grieta o "esqueleto" (Figura 4.2h)) hasta los bordes de cada grieta, tal como se ejemplifica en la Figura 4.4.

4.3. Automatización

Una de las ventajas que entrega el uso de ImageJ es que permite automatizar las rutinas para el procesamiento digital de imágenes. Así, los 9 pasos descritos en la sección anterior para obtener la máscara binaria del agrietamiento se puede aplicar en forma automática a un conjunto de imágenes ubicadas en un directorio determinado, y guardar las salidas, sean imágenes o algún otro tipo de archivo (por ejemplo, archivos de texto en formato .txt), en algún otro directorio indicado. Así, el procesamiento digital de imágenes se optimiza y permite ahorrar recursos computacionales, convirtiéndose en una herramienta de gran utilidad.

Para lo anterior, se desarrolló el siguiente código:

a) b) c)

Figura 4.4: a) Sección de Grieta en 8bit, b) Línea Central de la Grieta o “Esqueleto” Usada como Marcador, c) Mapa Geodésico de la Sección de Grieta Obtenido como Resultado.

```
// ------------------------------------------------------------------------
// Ejemplo de Código en Macro para Automatizar el Procesamiento Digital de Imágenes
// ------------------------------------------------------------------------
  extension = ".jpg"; // Señala la extensión de los archivos a analizar
  dir1 = getDirectory("Choose Source Directory "); // Indica el directorio donde se encuentran las imágenes a analizar
  dir2 = getDirectory("Choose Destination Directory "); // Indica el directorio de salida, es decir, donde se guardarán los resultados del análisis
  setBatchMode(true);
  n = 0; // Las siguientes líneas inician un bucle para identificar y leer cada una de las imágenes almacenadas en el directorio indicado
  processFolder(dir1);

  function processFolder(dir1) {
     list = getFileList(dir1);
     for (i=0; i<list.length; i++) {
          if (endsWith(list[i], "/"))
              processFolder(dir1+list[i]);
          else if (endsWith(list[i], extension))
             processImage(dir1, list[i]);
      }
  }

  function processImage(dir1, name) {
     open(dir1+name);
     print(n++, name);

  //
    ------------------------------------------------------------------------
                                Detalle del código
 //
    ------------------------------------------------------------------------

     selectWindow("Log"); // Selecciona el archivo a guardar
       saveAs("Text", dir2+name); // Guarda el archivo seleccionado en el directorio indicado
  }
// ------------------------------------------------------------------------
```

El detalle de los códigos implementados para el procesamiento digital en ImageJ se encuentra en el Anexo C.

4.4. Medición del Nivel de Agrietamiento

Una vez definido el procesamiento digital de imágenes a implementar, bajo la hipótesis de que existe una correlación entre el nivel de humedad y el patrón de agrietamiento, se definen diferentes medidas para cuantificar el nivel de agrietamiento observado. En esta investigación se han planteado cuatro índices:

4.4.1. Índice I

Se define el Índice I como el porcentaje de área agrietada, el cual corresponde al Factor de Intensidad de Agrietamiento (CIF) propuesto por Miller et al. (1998). En este estudio el el Índice I es calculado a partir de la máscara binaria, como la mostrada en la Figura 4.2g), donde los pixeles negros (con valor 0) corresponden al área no agrietada, mientras que los pixeles blancos (con valor 255) corresponden al área agrietada, tal como se describe en la Ecuación 4.1.

$$I_1 = \frac{\text{Número de Pixeles Blancos}}{\text{Número Total de Pixeles}} \ [\%] \tag{4.1}$$

4.4.2. Índice II

El Índice II se obtiene a partir de la línea central o esqueleto de las grietas, es decir, a partir de la máscara binaria obtenida donde las grietas tienen ancho de 1 pixel, tal como la imagen mostrada en la Figura 4.2h). Para evaluar el Índice II se utiliza la relación de pixeles a centrímetros correspondiente, permitiendo definir el segundo Índice como la razón entre la longitud total de grietas y el área total, tal como se indica en la Ecuación 4.2.

$$I_2 = \frac{\text{Longitud de Grietas}}{\text{Área Total}} \ \left[\frac{cm}{cm^2}\right] \tag{4.2}$$

4.4.3. Índice III

El Índice III tiene como finalidad estimar el ancho promedio de las grietas. Para ello se utiliza el mapa geodésico obtenido de la superposición de imágenes entre la máscara binaria (Figura 4.2g)) y la máscara esqueleto (Figura 4.2h)). Esta herramienta permite asignar un valor a cada pixel según su distancia al centro de la grieta perpendicular a la dirección de propagación. En la Ecuación 4.3 se presenta la definición del Índice III, donde $counts(j)$ corresponde al número de pixeles que están a una distancia j desde el centro de la grieta, ponderando $counts(j)$ por $j+1$ para incluir el pixel central de la grieta, dividido por el número total de pixeles.

$$I_3 = \frac{\Sigma(j+1) \cdot counts(j)}{\Sigma counts(j)} \ [-] \tag{4.3}$$

4.4.4. Índice IV

Finalmente, el Índice IV se define como la razón entre el número de bloques poligonales formados por la intersección de grietas, y el área total en desecación, de acuerdo a la Ecuación 4.4.

$$I_4 = \frac{\text{Número de Bloques Poligonales}}{\text{Área Total}} \left[\frac{1}{cm^2}\right] \tag{4.4}$$

Capítulo 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

EN este capítulo se presentan y analizan los resultados de los ensayos de desecación realizados en laboratorio a los tres relaves en estudio MR1, MR2 y MR3.

5.1. Límite de Contracción

Tal como se describió en la Sección 2.4, el Límite de Contracción (LC) juega un rol importante en la desecación de suelos finos. Por ello, en este estudio se determinó inicialmente el LC de acuerdo al código ASTM D 4943 - 02 para el relave MR1. Se realizaron 6 probetas a contenidos de sólidos inicial de 80 %, 70 % y 66 %, con lo cual se obtuvieron valores para LC de 19.6 %, 22.3 % y 26.2 %, respectivamente. Sin embargo, estos valores se encuentran muy cercanos al LL del material, lo cual puede deberse a que el procedimiento descrito en la normativa ASTM D 4943 - 02 supone que los suelos alcanzan el LC en un estado completamente saturado, suposición que en condiciones de desecación en relaves puede no cumplirse. Por ello, se midió la curva de contracción de los tres relaves en estudio de acuerdo al procedimiento experimental descrito en la Sección 3.1.2.

Las Figuras 5.1, 5.2 y 5.3 muestran los resultados obtenidos para los distintos moldes ensayados de cada material. En líneas negras segmentadas se presenta el ajuste de los datos experimentales medidos al modelo planteado por Fredlund (2000), mientras que en línea roja segmentada se presenta la curva asintótica teórica o línea de saturación. Como se puede apreciar, la metodología experimental desarrollada para medir la curva de contracción resulta satisfactoria, ya que permite reproducir con cierto nivel de confianza los resultados en moldes diferentes para las muestras preparadas a un mismo CS inicial. Además, las curvas obtenidas concuerdan con lo esperado de acuerdo a lo descrito en la literatura. Esto es, se pueden identificar en las curvas las tres etapas descritas por Konrad and Ayad (1997).

Una primera observación que se puede realizar respecto a las curvas de contracción obtenidas consiste en la relación de vacíos de las muestras. Esto dado que para los tres materiales ensayados se obtuvo que a mayor CS inicial menor es la relación de vacíos al final de la desecación, lo cual es concordante con lo esperado, ya que aquellas muestras

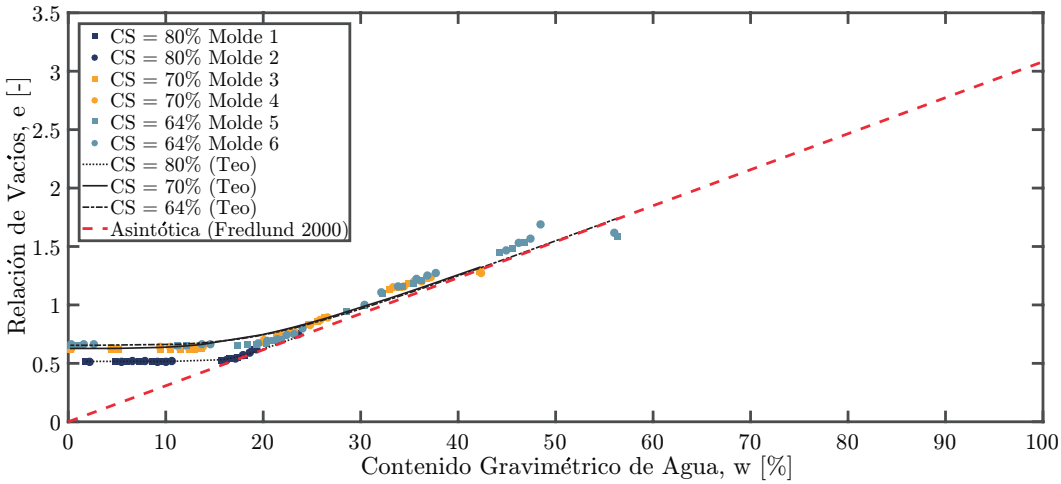


Figura 5.1: Curva de Contracción para Relave MR1.

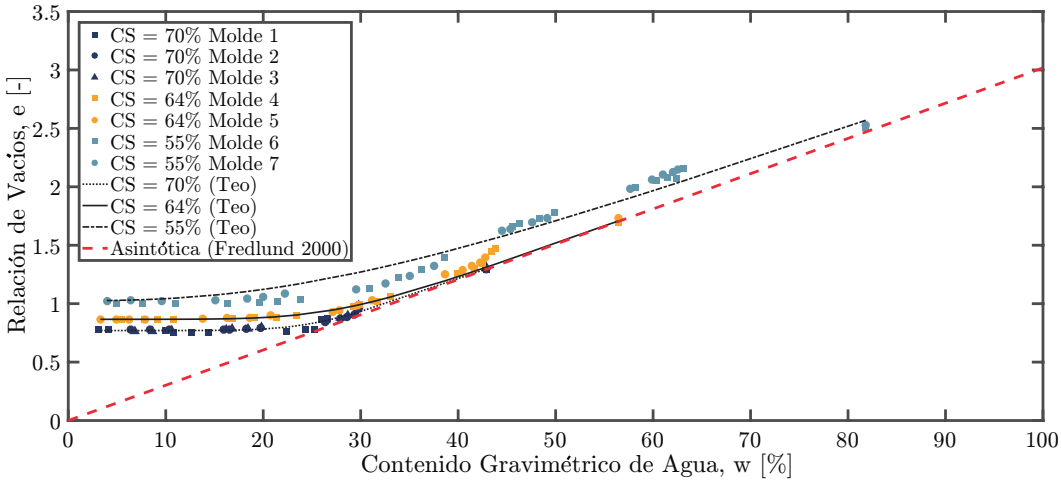


Figura 5.2: Curva de Contracción para Relave MR2.

preparadas a un mayor CS inicial presentan un menor contenido de agua, y con ello una menor relación de vacíos final. En la Figura 5.4 se presenta la relación inversamente proporcional obtenida entre la variación porcentual de la relación de vacíos respecto del CS inicial, mientras que en línea segmentada se presenta la tendencia de ajuste lineal para cada ensayo.

Por su parte, el ajuste de los datos experimentales a la expresión propuesta por Fredlund (2000) para la estimación de la curva de contracción se realizó aplicando el método de Mínimos Cuadrados. A partir de las curvas obtenidas, se aprecia en los tres relaves que aquellas muestras preparadas a un mayor CS inicial presentan un mejor ajuste que aquellas preparadas a un menor CS inicial. Sin embargo, todas las muestras tienden a la línea asintótica teórica partiendo en estado completamente saturado hasta alcanzar el AEV, independiente del CS inicial.

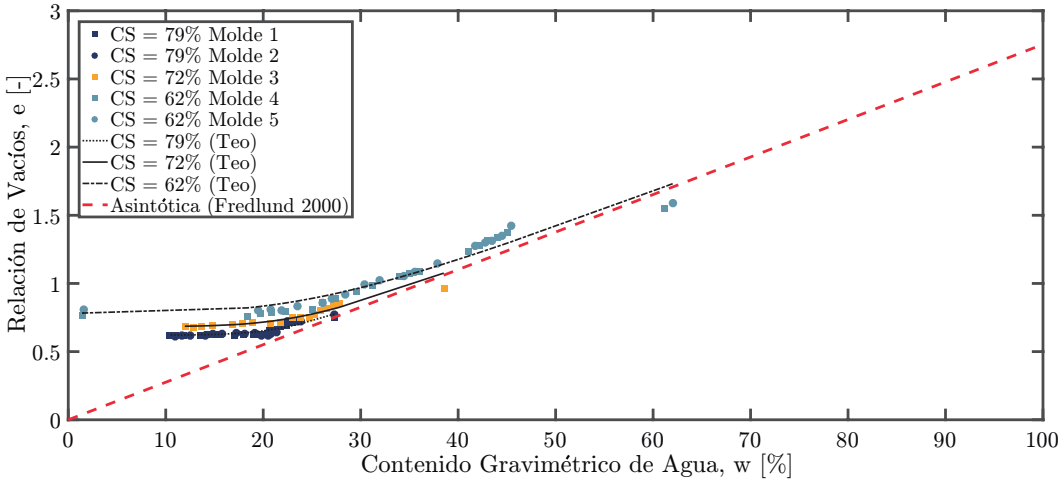


Figura 5.3: Curva de Contracción para Relave MR3.

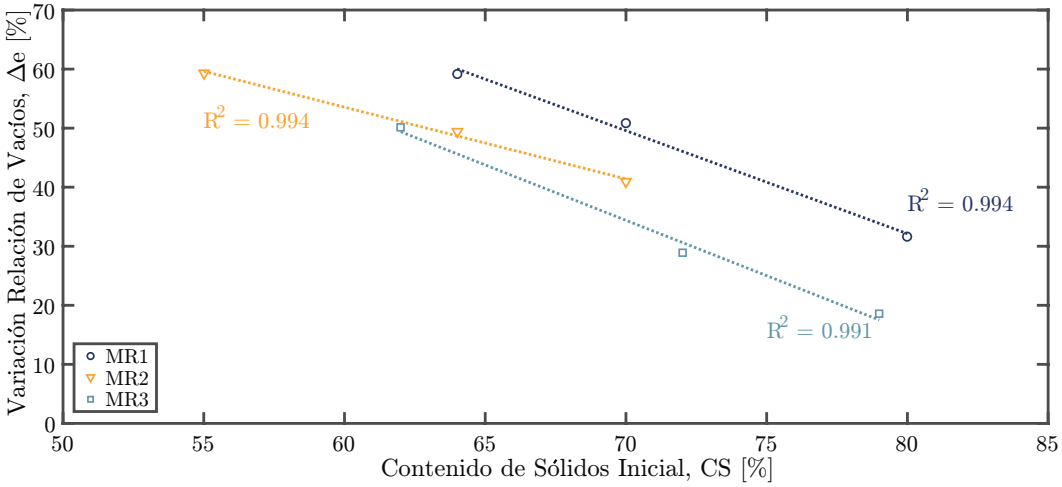


Figura 5.4: Variación Porcentual de la Relación de Vacíos para Relaves MR1, MR2 y MR3 en Ensayos de Determinación de la Curva de Contracción.

Adicional a la curva de contracción que permite observar la evolución de la relación de vacíos en los suelos respecto del contenido de humedad, resulta de interés estudiar de forma independiente tanto la deformación axial (vertical) como la deformación radial (horizontal) sufrida por las muestras en desecación. En las Figuras 5.5, 5.6 y 5.7 se presenta la evolución obtenida para las deformaciones axiales y radiales respecto del contenido de agua para los relaves MR1, MR2 y MR3, respectivamente. En ellas, se observa que, en los tres relaves en estudio, la relación tanto para la deformación axial como la deformación radial se caracteriza por una forma bilineal, con un primer tramo de pendiente negativa a altos niveles de humedad, y un segundo tramo con pendiente cercana a cero a menores niveles de humedad.

Además, en todas las muestras la deformación axial comenzó a niveles de humedad más altos en comparación con la deformación radial, la cual comenzó a niveles de humedad menores. Sin embargo, en el relave MR3 la deformación radial observada fue considerablemente menor a aquella ocurrida en los relaves MR1 y MR2, obteniendo para MR3 una deformación radial máxima de 0.04 para las muestras a menor CS inicial y cercana a cero para las muestras preparadas a mayor CS inicial, versus 0.15 y 0.19 obtenida para MR1 y MR2 a altos CS inicial, respectivamente. Dicha diferencia en el comportamiento de los relaves puede explicarse por las características geotécnicas de los materiales en estudio. Mientras MR1 y MR2 son suelos con un alto contenido de finos, y un determinado nivel de plasticidad, el relave MR3 es un suelo más grueso sin plasticidad (NP), en el cual casi el 100 % del cambio volumétrico observado se debe únicamente a la deformación axial.

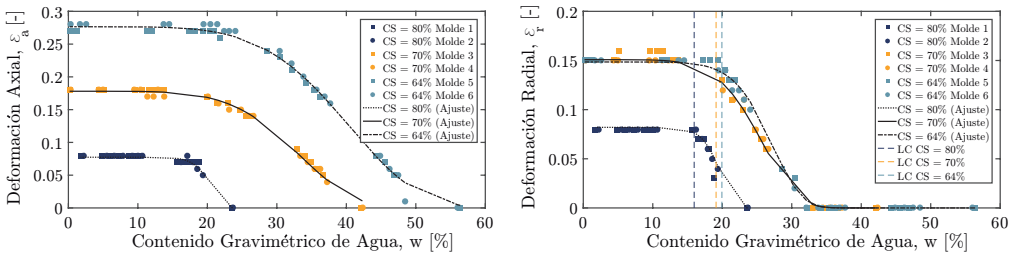


Figura 5.5: a) Contracción Vertical en Relave MR1, b) Contracción Radial en Relave MR1.

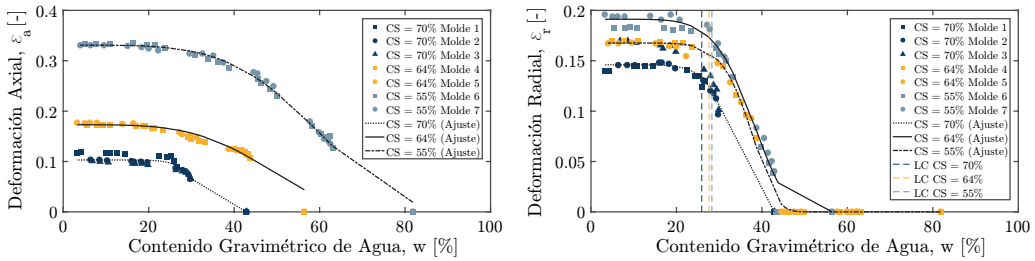


Figura 5.6: a) Contracción Vertical en Relave MR2, b) Contracción Radial en Relave MR2.

Adicionalmente, se destaca que la contracción horizontal continúa aumentando a niveles de humedad bajos en los cuales la contracción vertical ya se ha detenido, lo cual es concordante con la teoría de desecación presentada en el Capítulo 2. Dado lo anterior, para esta investigación se define el Límite de Contracción (LC) para relaves finos plásticos como el contenido de agua en el cual la deformación radial se detiene, y por lo tanto, ya no experimenta cambios volumétricos. Gráficamente, se define el LC como la humedad en la cual se intersectan los dos tramos de la deformación radial bilineal descrita anteriormente. Para los relaves MR1 y MR2 se presentan los LC obtenidos para cada CS inicial en las Figuras 5.5b) y 5.6b).

En la misma línea, dado el comportamiento bilineal observado para las deformaciones axiales y radiales, se plantea un modelo de ajuste para cada curva según las Ecuaciones 5.1

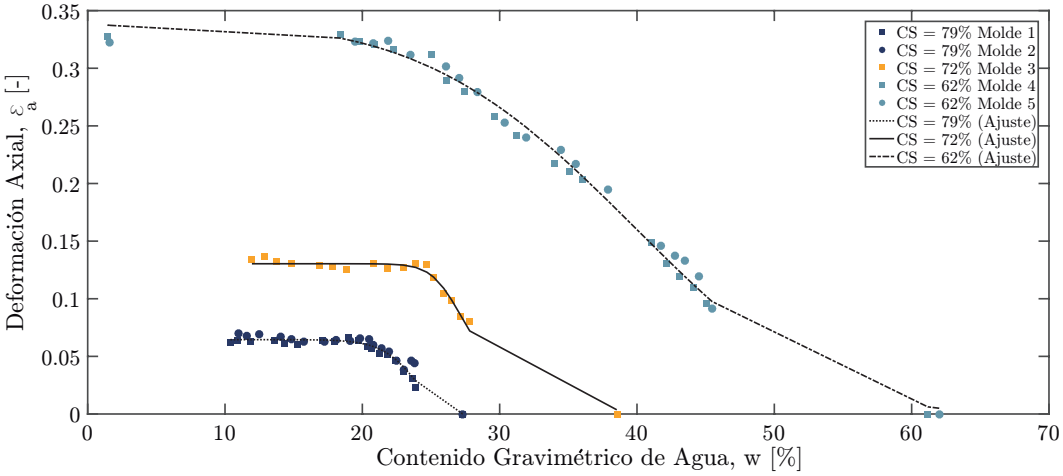


Figura 5.7: Contracción Vertical en Relave MR3.

y 5.2. Como se aprecia en las figuras anteriores, el modelo se ajusta de forma satisfactoria independiente del CS inicial:

$$\varepsilon_a(w) = \frac{p}{\left[\left(\frac{w}{q}\right)^r + 1\right]^{\frac{g}{r}}} \tag{5.1}$$

$$\varepsilon_r(w) = \frac{s}{\left[\left(\frac{w}{t}\right)^u + 1\right]^{\frac{d}{u}}} \tag{5.2}$$

Donde: w corresponde al contenido gravimétrico de agua, p corresponde a la deformación axial máxima, s corresponde a la deformación radial máxima, g, q, y r son parámetros de ajuste de la Ecuación 5.1, y d, t, y u son parámetros de ajuste de la Ecuación 5.2, los cuales se pueden obtener por medio de ajustes numéricos.

En la Figura 5.8 se presenta el LC obtenido para los relaves MR1 y MR2 respecto al CS inicial. Como se puede apreciar, en ambos casos se obtiene que a mayor CS inicial menor resulta el LC. Por su parte, el relave MR2 presenta un LC mayor al relave MR1 independiente del CS inicial. Esto se puede explicar dado que el relave MR2 tiene un mayor contenido de finos y una plasticidad levemente mayor que el relave MR1, por lo que tiene una mayor capacidad de retener agua. A pesar de la diferencia anterior, en ambos casos el LC tiende a un valor constante a medida que disminuye el CS inicial.

Dado lo anterior, para los ensayos de desecación de MR1 y MR2 a CS inicial constante, se tienen los valores presentados en la Tabla 5.1.

Finalmente, en las Figuras 5.9, 5.10 y 5.11 se presenta el Grado de Saturación (S) y la Densidad Seca (ρ_s) para MR1, MR2 y MR3, respectivamente. El nivel de saturación varía en las muestras desde 100 % hasta cercano a 0 % durante los ensayos. Además, se aprecia que, en general, a mayor CS inicial mayor es el grado de saturación con que el relave alcanza el LC.

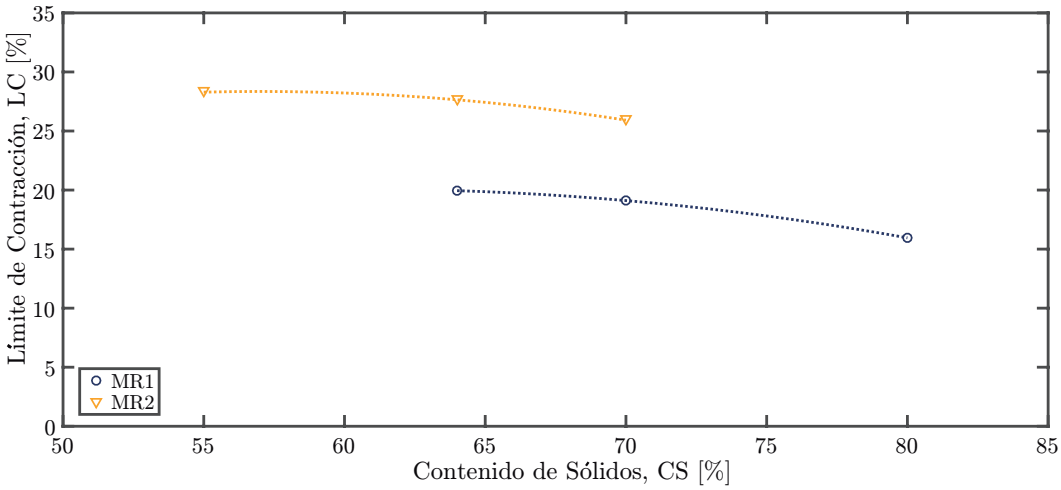


Figura 5.8: Variación del Límite de Contracción Respecto al Contenido de Sólidos Inicial en Relaves MR1 y MR2.

Tabla 5.1: LC Definido para Relaves MR1 y MR2.

ID	CS inicial	LC
	%	%
MR1	80	16.0
	70	19.1
	64	19.9
MR2	70	25.9
	64	27.6
	55	28.3

Al igual que las deformaciones axial y radial, el grado de saturación puede ser ajustado de acuerdo al siguiente modelo:

$$S = \frac{w \cdot G_s}{a_{sh}\left[\left(\frac{w}{b_{sh}}\right)^{c_{sh}} + 1\right]^{\left(\frac{1}{c_{sh}}\right)}} \tag{5.3}$$

Donde: S corresponde al grado de saturación, w corresponde al contenido gravimétrico de agua, G_s es la gravedad específica de sólidos, y a_{sh}, b_{sh} y c_{sh} corresponden a los parámetros de ajuste presentados en la Ecuación 2.3. A partir de lo anterior, se observa que los relaves en estudio alcanzaron el LC con un grado de saturación entre 80 % y 95 %.

Respecto a las densidades secas, se aprecia que a mayor CS inicial se obtiene una mayor

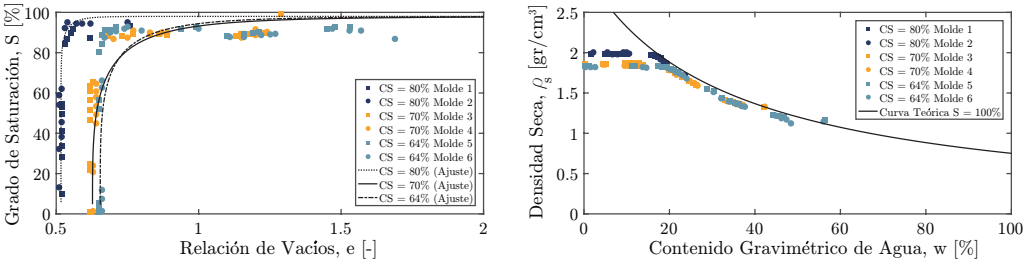


Figura 5.9: a) Grado de Saturación en Relave MR1, b) Densidad Seca en Relave MR1.

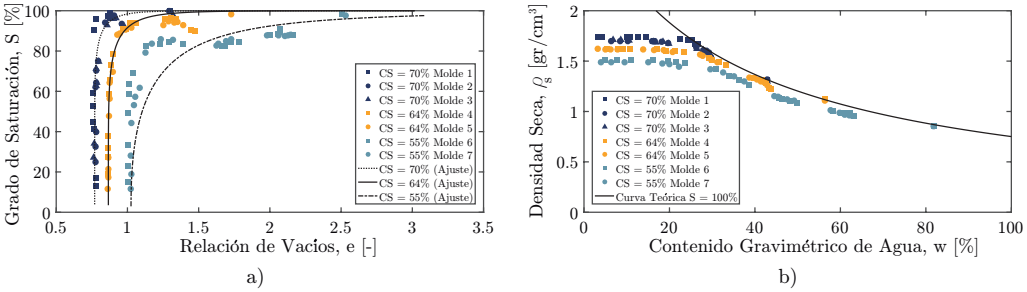


Figura 5.10: a) Grado de Saturación en MR2, b) Densidad Seca en Relave MR2.

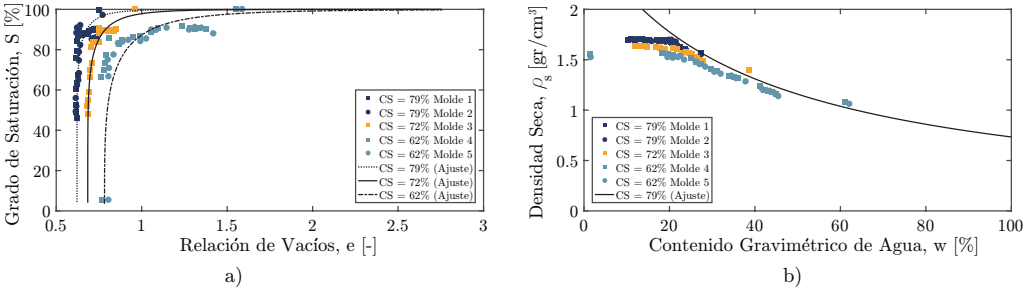


Figura 5.11: a) Grado de Saturación en MR3, b) Densidad Seca en Relave MR3.

densidad seca al final de la desecación, lo cual coincide con las observaciones realizadas a partir de la relación de vacíos final de las muestras. En las Figuras 5.9b), 5.10b) y 5.11b) se presenta en línea negra continua la curva teórica de saturación máxima (Ecuación 5.4). En ella se puede ver que aquellas muestras con un CS inicial menor resultan con una densidad seca final menor, y alcanzan el LC a una humedad mayor. Respecto al grado de saturación, la observación coincide con lo observado en las Figuras 5.9a), 5.10a) y 5.11a), es decir, a mayor CS inicial mayor es el grado de saturación con que se alcanza el LC.

$$\rho_s = \frac{G_s \cdot \rho_w}{1 + \frac{w \cdot G_s}{S_{100\,\%}}} \tag{5.4}$$

Donde: ρ_s corresponde a la densidad seca de los relaves, ρ_w corresponde a la densidad del agua, w corresponde al contenido gravimétrico de agua, y S corresponde al grado de saturación.

5.2. Comportamiento de Relaves Post-Depositación

Una vez definido el LC para cada material en estudio se procede a analizar los resultados correspondientes a los ensayos de desecación en relaves. En esta sección se analizan los resultados de los relaves MR1, MR2 y MR3 cuyas muestras se prepararon a un mismo CS inicial, es decir, a 70 %, 64 % y 70 %, respectivamente, y a distintos espesores de la capa de relave depositado.

En términos generales, en todos los ensayos de desecación se observó que una vez depositado el relave en slurry, las muestras sufrieron inicialmente un proceso de sedimentación, en el cual las partículas más finas tendieron a quedar en superficie junto a una delgada capa de agua, mientras que las partículas más pesadas tendieron a quedar en el fondo. Dado el alto CS con que se realizaron los ensayos, esa sedimentación se presentó de forma leve, es decir, tanto la segregación de partículas como el espesor de la capa de agua superficial fueron pequeños comparados con el espesor total de la capa de relave fresco depositado. Luego, comenzó el proceso de consolidación, en el cual se observó que la totalidad del cambio volumétrico de la muestra se debió a una contracción vertical. Finalmente, una vez que la desecación avanzó disminuyendo progresivamente el nivel de humedad de la muestra, comenzó el agrietamiento superficial, extendiéndose desde la superficie de la capa de relave hacia abajo. Este punto marca el inicio de la contracción horizontal. Estas observaciones coinciden con lo esperado según la teoría expuesta por Konrad and Ayad (1997).

Si bien, el comportamiento anterior fue observado de forma similar tanto en el relave MR1 como en el relave MR2, en el relave MR3 el comportamiento varió sustancialmente. Las muestras de MR3 se prepararon en las mismas condiciones que las muestras de los relaves MR1 y MR2, sin embargo, el comportamiento contractivo observado fue considerablemente diferente al observado en los relaves MR1 y MR2. En la Figura 5.12a) se presenta la evolución del ensayo MR3-1 AHR = 267, mientras que en la Figura 5.12b) se presenta la evolución del ensayo MR3-2 AHR = 133. Ambos se prepararon a un CS inicial de 70 %, en slurry completamente saturados. Como se puede apreciar, en ambos casos la primera fotografía a la izquierda permite identificar una fina capa de agua superficial producto del proceso de sedimentación, la cual permite incluso reflejar la iluminación ambiental del laboratorio. Por su parte, la fotografía central presenta las muestras en proceso de desecación a una humedad inferior al LL del relave MR3. Como se aprecia, no existe contracción horizontal (agrietamiento) en las muestras, por lo que el proceso de desecación se extendió para el relave MR3. Finalmente, las fotografías de la derecha presentan las muestras luego de una semana de desecación para MR3-1, y tres semanas de desecación para MR3-2, respectivamente. En ellas se puede apreciar que efectivamente el relave MR3 no sufrió deformación horizontal, siendo el cambio volumétrico experimentado únicamente debido a la contracción vertical. Esto coincide con las observaciones realizadas en los ensayos a menor escala para determinar la curva de contracción, en la cual los moldes del relave MR3 preparados a altos CS inicial prácticamente evidenciaron contracción horizontal nula. Este comportamiento puede explicarse dadas las características geotécnicas de MR3, el cual es un material con un menor

porcentaje de finos en comparación a MR1 y MR2, y sin plasticidad.

Otra observación que se destaca respecto a los resultados de MR3 corresponde a la capa de sal que precipitó en superficie durante el proceso de desecación. Dicha capa de sal fue precipitando continuamente a medida que disminuía el contenido de agua de las muestras, y, como se puede apreciar en MR3-2 resultó ser más gruesa que aquella observada en MR3-1. Esto puede deberse al tiempo de desecación que se dió a cada muestra (una semana versus tres semanas).

La costra de sal formada en superficie pudo también aportar a evitar la contracción horizontal en la muestra de relave y a disminuir las tasas de evaporación, de acuerdo a los mecanismos expuestos en la Sección 2.3. Lamentablemente, durante la desecación de las muestras de MR3 no fue posible medir en laboratorio la tasa de evaporación potencial, como sí pudo realizarse posteriormente para los relaves MR1 y MR2.

a)

b)

Figura 5.12: Proceso de Desecación Observado en relave MR3, a) MR3-1 AHR = 267, b) MR3-2 AHR = 133.

Dados los resultados anteriores, no se realizaron pruebas adicionales al relave MR3, por lo que el análisis presentado en las secciones siguientes se refiere a los resultados del proceso de agrietamiento en los relaves MR1 y MR2.

Respecto a la geometría del agrietamiento observado en los relaves MR1 y MR2, en la Figura 5.13 se presenta el agrietamiento final obtenido en dos de los ensayos de MR1 y MR2, respectivamente. A partir de ellos se aprecia que el mecanismo de agrietamiento observado coincide con lo esperado teóricamente, de acuerdo a lo descrito en la Sección 2.2, es decir, la primera grieta aparece en un estado parcialmente saturado, y se propaga tanto en dirección horizontal como vertical desde la superficie hacia abajo. Se distingue también la presencia de grietas principales y secundarias, observándose claramente la similitud con la Figura 2.3. Esto último concuerda con el mecanismo de esfuerzos de tracción como gatillante del agrietamiento en suelos finos.

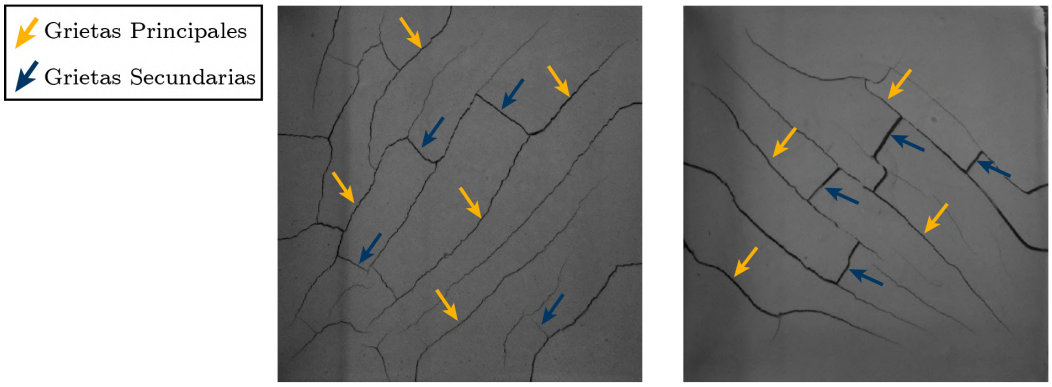


Figura 5.13: Geometría del Agrietamiento Observado en los Ensayos de Desecación en Laboratorio: a) MR1-15a, b) MR2-7a.

5.3. Patrón de Agrietamiento y Relación de Aspecto

Una de las variables de mayor influencia en los resultados de agrietamiento en relaves corresponde al AHR de las muestras. En la Figura 5.14 y Figura 5.15 se presenta la evolución del agrietamiento para tres ensayos de MR1 y tres de MR2. En ella se puede ver que a mayor AHR, es decir, menor espesor de la capa de relave, se obtiene un mayor número de grietas más delgadas, mientras que a menor AHR, es decir, a mayor espesor de la capa se presenta un menor número de grietas más gruesas. Además, el AHR está directamente relacionado con las condiciones de contorno impuestas. Esto es, para un AHR más cercano a los observados en terreno, como en las Figuras 5.14b), 5.14c), 5.15b) y 5.15c), la primera grieta se abre en un punto medio de la bandeja de desecación, sin dependencia de los bordes. En cambio, en aquellos ensayos con un bajo AHR, las condiciones de contorno condicionan el patrón de agrietamiento abriéndose la primera grieta desde el borde, tal como se puede apreciar en las Figuras 5.14a) y 5.15a). Este comportamiento se observó en la totalidad de los ensayos de desecación realizados en los relaves MR1 y MR2.

La misma relación se observó para los ensayos multicapa realizados. En las Figuras 5.16 y 5.17 se presenta el agrietamiento final de tres ensayos multicapa para MR1, y dos para MR2. En ellas se puede observar que el inicio del agrietamiento en la capa 2 no tiene rela-

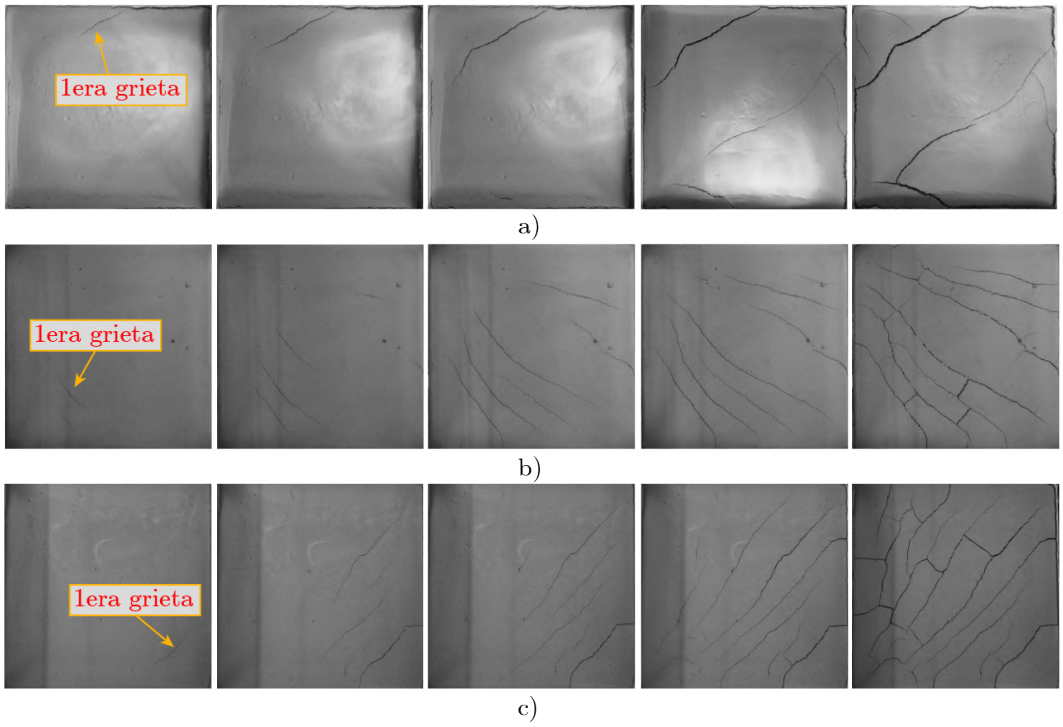


Figura 5.14: Proceso de Agrietamiento Observado en MR1, a) MR1-7 AHR = 138, b) MR1-5 AHR = 572, c) MR1-15a AHR = 618.

ción aparente con el patrón de agrietamiento desarrollado en la capa 1. Del mismo modo, el inicio del agrietamiento en la capa 3 no parece estar relacionado con el agrietamiento en la capa 2. Además, se aprecia que, al incorporar una segunda y luego una tercera capa, el patrón de agrietamiento en cada capa se vió afectado por el AHR acumulado resultante, es decir, al desecar una masa de relave más gruesa, aún si está compuesta por dos o tres capas desecadas hasta el LC por separado, se mantiene la observación que a menor AHR se obtienen menos grietas más anchas y a mayor AHR se obtienen más grietas más delgadas. Esto se puede apreciar más claramente en las Figuras 5.18 y 5.19. En ellas se presenta en a) la distancia promedio entre grietas, mientras que en b) se presenta el ancho promedio de grietas, para MR1 y MR2, respectivamente. En amarillo se señalan los valores obtenidos en ensayos de una capa, mientras que en azul oscuro se presentan los datos incluyendo los resultados de los ensayos multicapa considerando el AHR de la capa 2 y capa 3 acumulado, esto es, considerando la altura de la capa inferior.

Como se puede apreciar, al aumentar el AHR disminuye la distancia promedio entre grietas y el ancho promedio de grietas. Dicha tendencia se mantiene en ensayos multicapa, lo cual se debe a que al depositar una capa de relave fresco sobre una que ya ha superado su LC, la capa inferior absorbe una cantidad significativa de agua de la capa fresca en un corto periodo de tiempo, lo cual permite que al iniciar el proceso de desecación, ambas capas se comporten como una única masa evaporante.

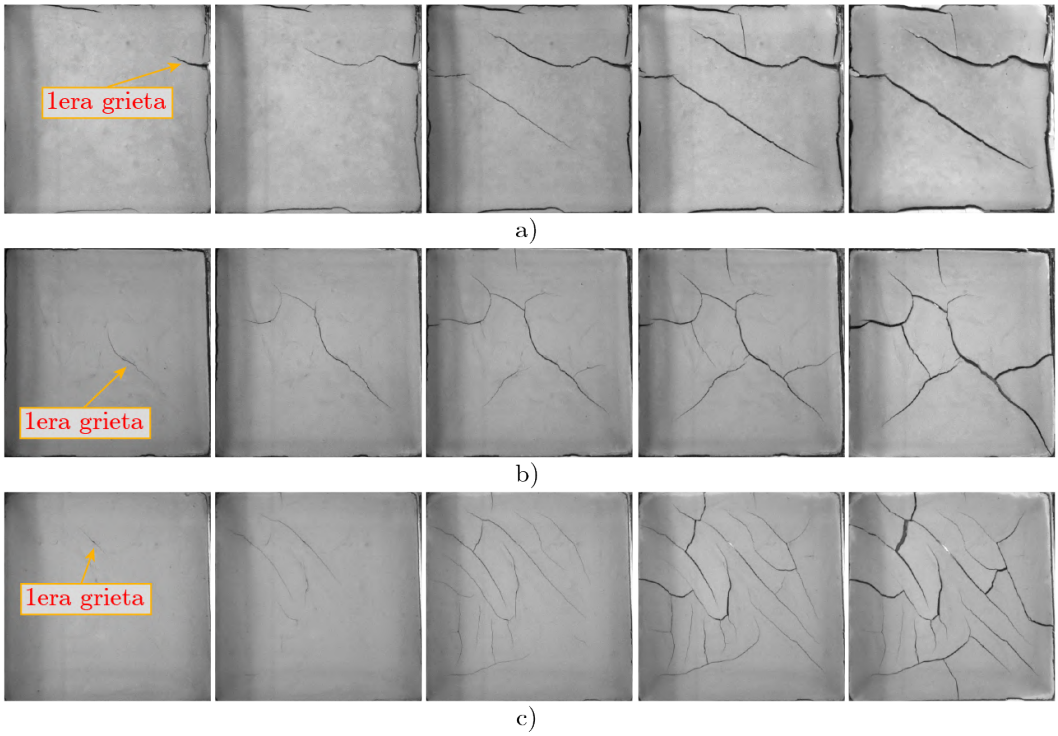


Figura 5.15: Proceso de Agrietamiento Observado en MR2, a) MR2-9 AHR = 188, b) MR2-5 AHR = 304, c) MR2-8a AHR = 710.

Respecto al agrietamiento observado en terreno, en la Figura 5.20a) se muestra el patrón de agrietamiento al final del proceso de desecación obtenido en laboratorio para cuatro ensayos a diferentes AHR para el relave MR1, mientras que en la Figura 5.20b) se muestra el patrón de agrietamiento superficial del depósito de relaves (terreno) correspondiente a las muestras de MR1. Como se puede apreciar, se logró reproducir en laboratorio el patrón de agrietamiento al variar la relación de aspecto AHR. Ello sugiere que la relación observada en laboratorio entre el espesor de la capa de relave ensayada y el nivel de agrietamiento obtenido ocurre de igual manera en los depósitos de relaves en terreno. Dicha relación concuerda, además, con los resultados obtenidos por Lakshmikantha et al. (2006) para un suelo natural análogo (arcilla limosa).

Finalmente, respecto a la orientación de las grietas, se observa que tanto en el patrón de agrietamiento generado en terreno como en laboratorio, la gran mayoría de las grietas se intersectan en ángulos cercanos a 90°. Sin embargo, se presentan también intersecciones en ángulos cercanos a 120° siendo menos frecuentes que las intersecciones ortogonales. Dichos resultados concuerdan con las observaciones realizadas por Lakshmikantha et al. (2009), reafirmando así la importancia del estudio de las tensiones de tracción en el agrietamiento de relaves finos.

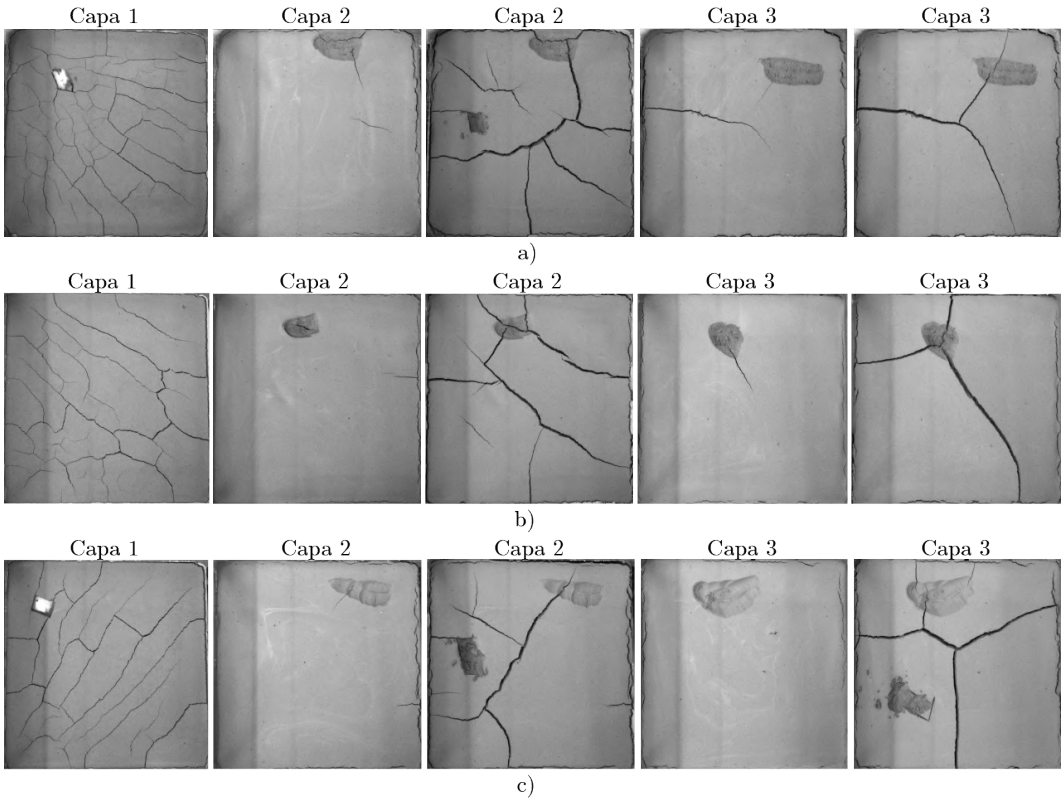


Figura 5.16: Ensayos Multicapa con a) MR1-13 $AHR_{capa1} = 695$, $AHR_{capa2} = 340$, $AHR_{capa3} = 225$, b) MR1-12 $AHR_{capa1} = 664$, $AHR_{capa2} = 332$, $AHR_{capa3} = 223$, c) MR1-15 $AHR_{capa1} = 618$, $AHR_{capa2} = 300$, $AHR_{capa3} = 196$.

5.4. Patrón de Agrietamiento y Contenido de Agua

De acuerdo a lo descrito en la Sección 4.4, si bien las definiciones de los índices propuestos son diferentes entre sí, cada uno representa el nivel de agrietamiento para un determinado nivel de humedad. Así, se espera que a valores altos de los índices mayor sea el nivel de agrietamiento y menor el contenido de agua.

En las Figuras 5.21 y 5.22 se presentan los resultados de los Índices I, II y III para los relaves MR1 y MR2, respectivamente, los cuales incluyen los resultados tanto de los ensayos de una capa como los resultados de la primera capa de los ensayos multicapa. Además, en línea negra segmentada se señala el valor del LC determinado en la Sección 5.1. Como se puede apreciar en las Figuras 5.21a) y 5.22a), al aumentar el AHR se obtiene un menor porcentaje de agrietamiento final, lo cual coincide con las observaciones realizadas en la Sección 5.3. Por su parte, la primera grieta se abre a un valor de humedad cercano al LL del material, alrededor de 24 % para MR1, y 31 % para MR2, lo cual coincide con los resultados expuestos por Ávila (2004).

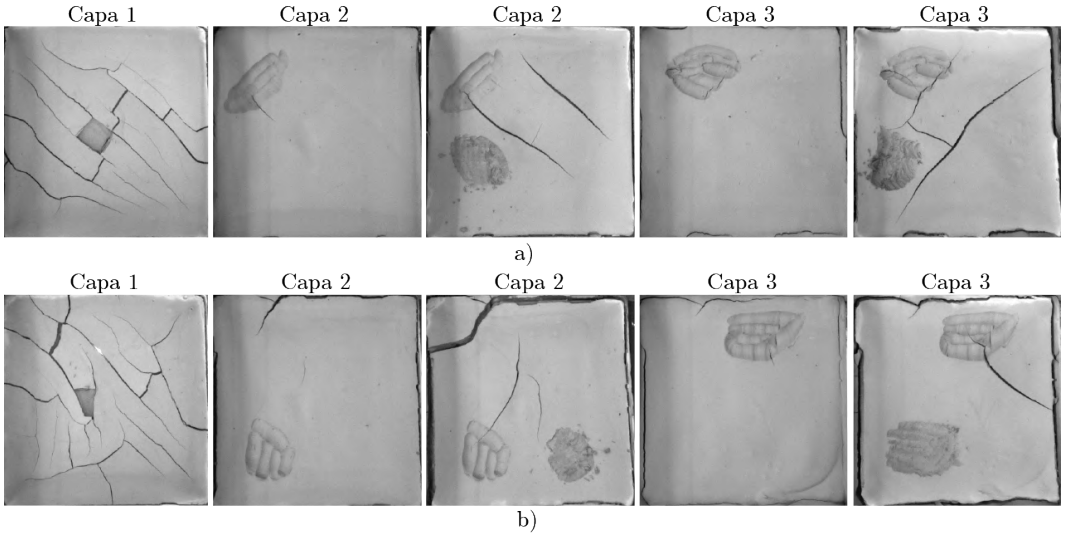


Figura 5.17: Ensayos Multicapa con a) MR2-10 $AHR_{capa1} = 656$, $AHR_{capa2} = 285$, $AHR_{capa3} = 187$, b) MR2-11 $AHR_{capa1} = 710$, $AHR_{capa2} = 292$, $AHR_{capa3} = 186$.

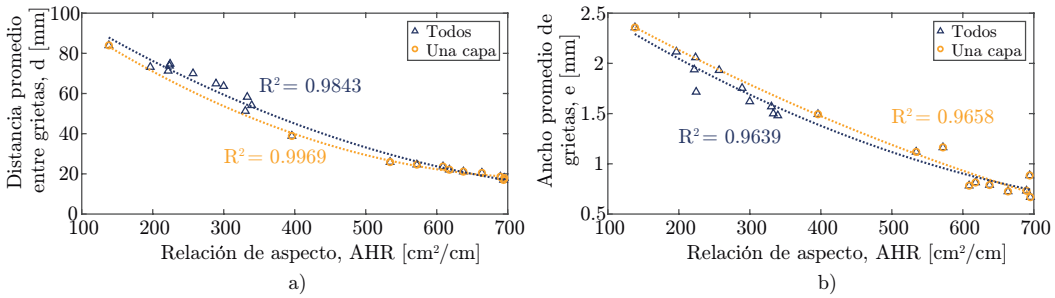


Figura 5.18: Relación entre AHR y a) Distancia Promedio Entre Grietas, y b) Ancho Promedio de Grietas, para Relave MR1.

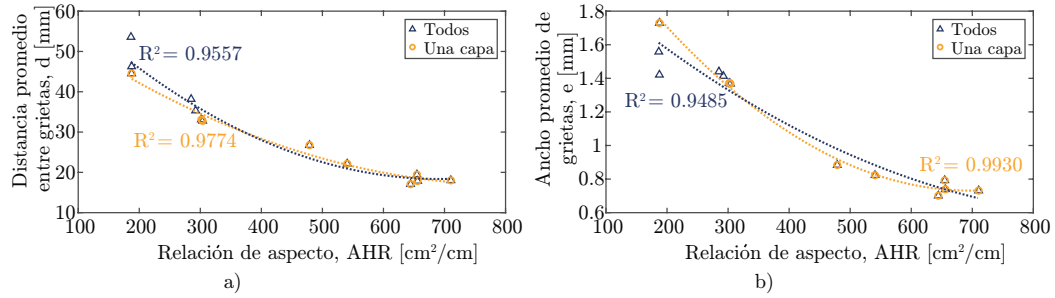
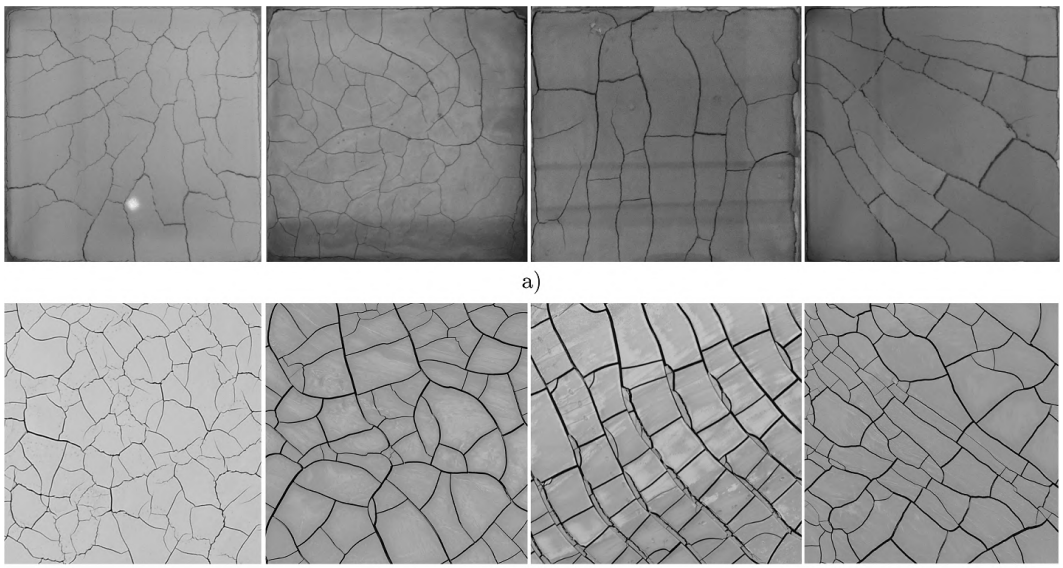


Figura 5.19: Relación entre AHR y a) Distancia Promedio Entre Grietas, y b) Ancho Promedio de Grietas, para Relave MR2.



a)

b)

Figura 5.20: a) Resultados de Laboratorio al Final de la Desecación para MR1, b) Patrón de Agrietamiento Desarrollado en el Depósito de Relaves de MR1.

Además, excepto por los ensayos MR1-7 y MR2-9, todos mantienen una pendiente similar hasta estabilizarse al alcanzar el LC. Este comportamiento diferente en los ensayos MR1-7 y MR2-9 se debe a que, al ser ensayados en una capa de relave más gruesa, el agrietamiento se vio directamente afectado por el AHR y las condiciones de contorno de la bandeja de desecación. De forma similar en las Figuras 5.21b) y 5.22b) se presentan los resultados del Índice II, y al igual que el Índice I, todos los ensayos excepto en MR1-7 y MR2-9, presentan una pendiente similar hasta alcanzar un valor constante al sobrepasar el LC. Además, se mantiene la misma tendencia de a mayor AHR, mayor nivel de agrietamiento. Debido a que el Índice I representa el porcentaje de área agrietada, y el Índice II representa la longitud total de grietas normalizada, era esperable obtener un comportamiento similar entre ambos.

En las Figuras 5.21c) y 5.22c) se presenta el Índice III versus el contenido gravimétrico de agua. En él, se observa un resultado similar a los Índices I y II, ya que todos los ensayos presentan una pendiente similar hasta alcanzar un valor constante al sobrepasar el LC. Sin embargo, en contraste con los Índices I y II, a menor AHR se obtuvo un mayor valor de Índice III, lo cual es esperable dado que a valores bajos de AHR se obtienen grietas más gruesas, y considerando la definición del Índice III, esto conduce a valores de Índice más altos.

Respecto al Índice IV, en la Figura 5.23 se presentan los resultados para cuatro de los ensayos realizados al relave MR1, y en línea negra segmentada se señala el LC correspondiente. Como se puede apreciar, los datos presentan una alta dispersión, con grandes variaciones antes y después del LC. Este comportamiento puede explicarse debido a la definición del Índice IV, el cual requiere que se forme un bloque poligonal por las grietas superficiales, lo que requiere un alto nivel de agrietamiento. Es decir, para que el Índice IV tome valores distintos de cero, el relave tiene que haber perdido suficiente agua para que se formen las

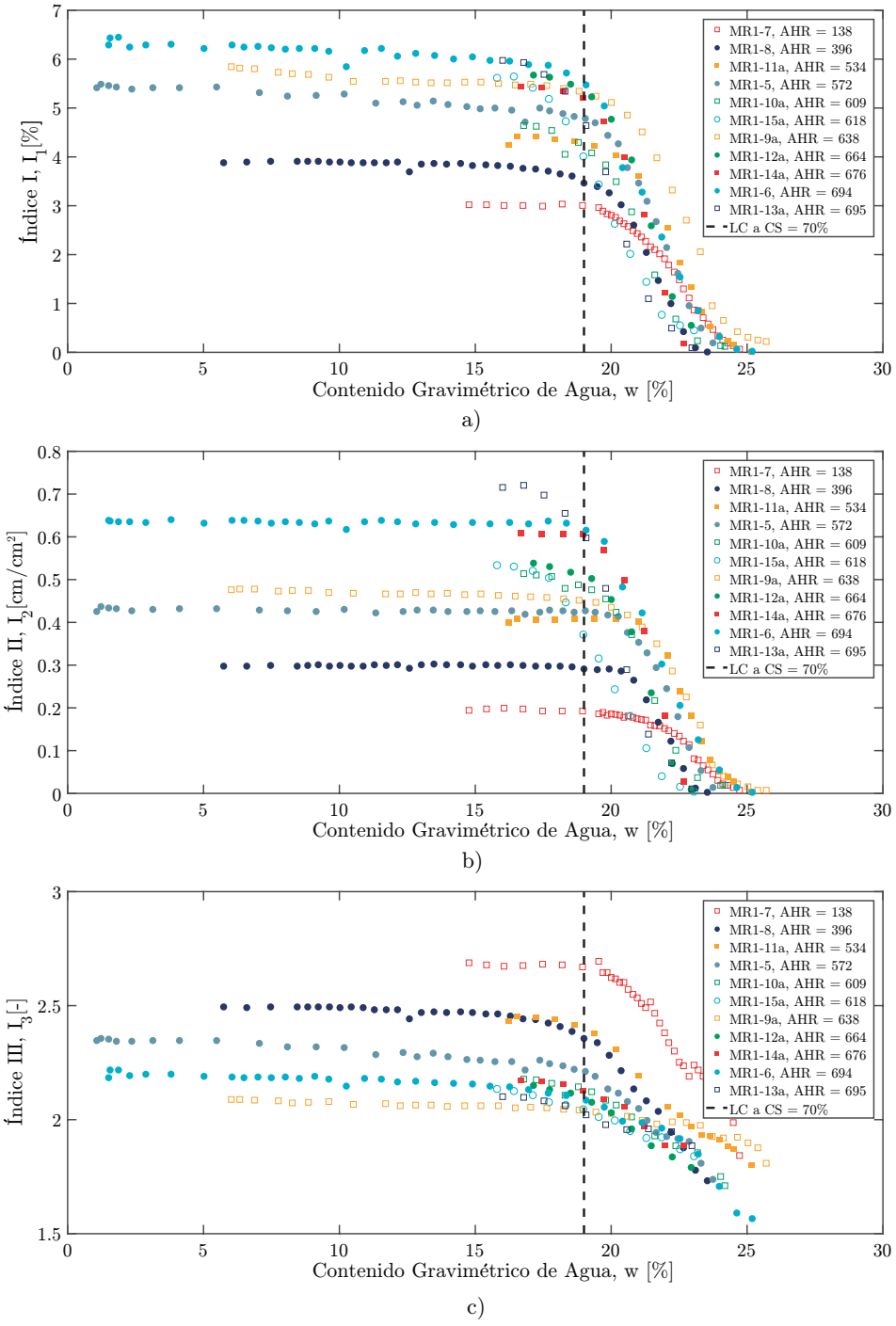


Figura 5.21: Contenido de Agua de las Muestras en Desecación para Relave MR1 versus a) Índice I, b) Índice II, y c) Índice III.

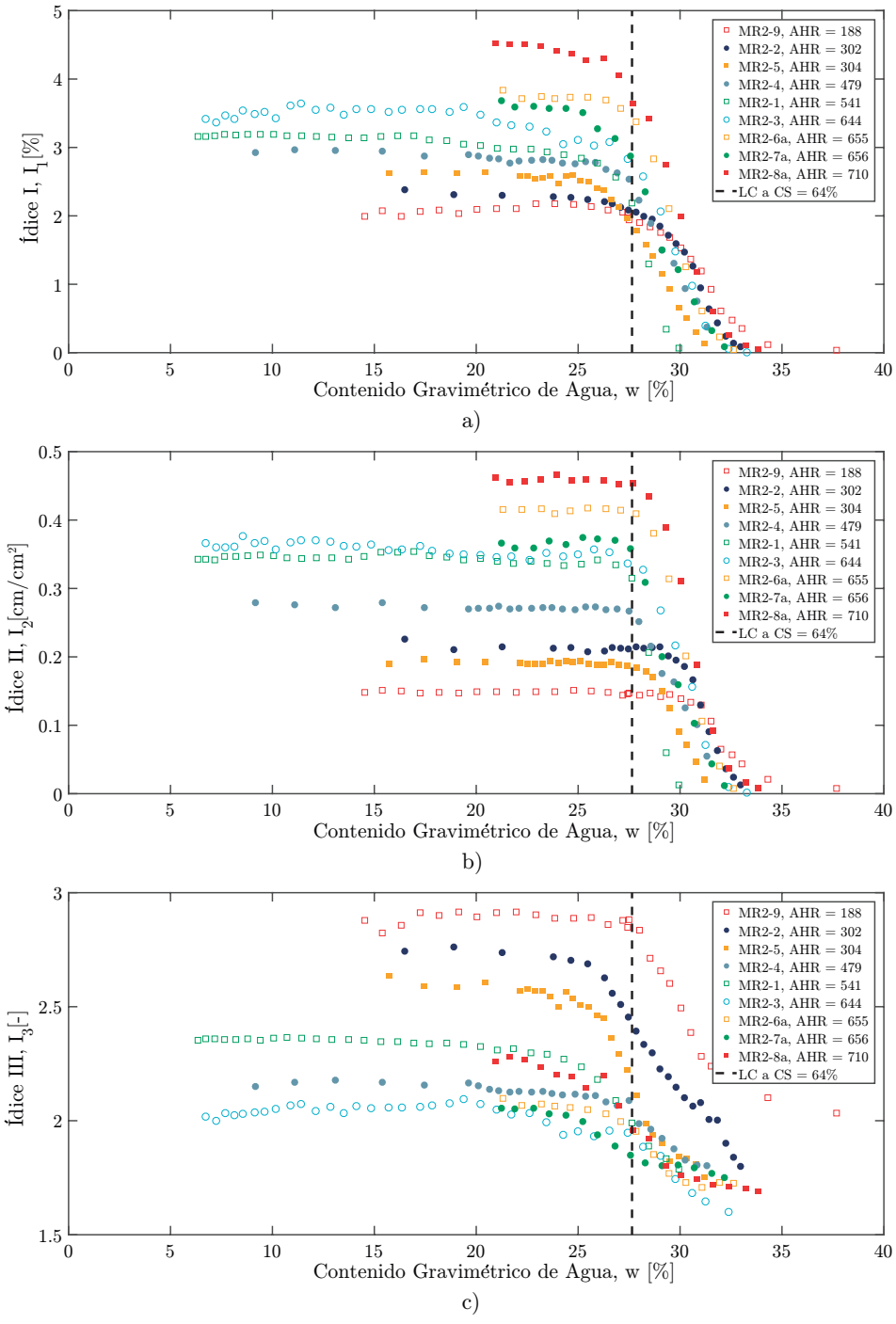


Figura 5.22: Contenido de Agua de las Muestras en Desecación para Relave MR2 versus a) Índice I, b) Índice II, y c) Índice III.

primeras grietas y éstas se intersecten para formar un bloque poligonal. Por lo tanto, el Índice IV no es un buen indicador del agrietamiento superficial en relaves. Debido a esto, no se consideró el Índice IV para los resultados en las secciones siguientes.

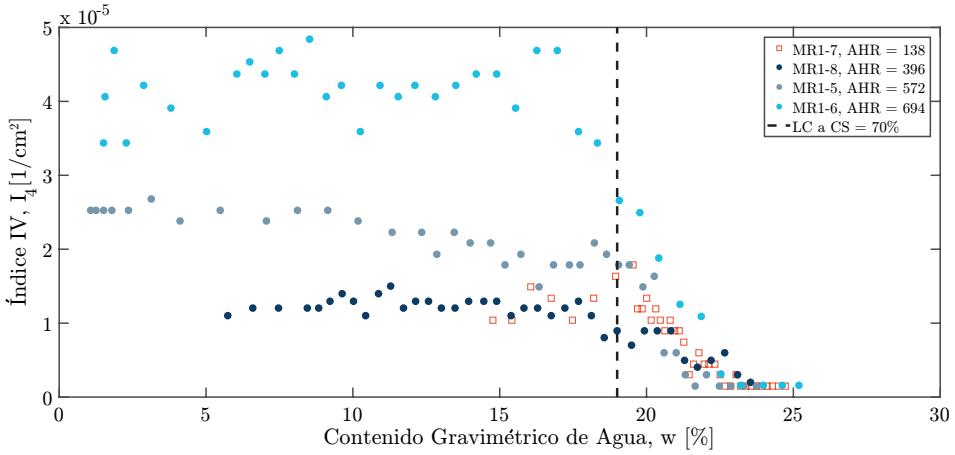


Figura 5.23: Contenido de Agua de las Muestras en Desecación para Relave MR1 versus Índice IV.

Finalmente, en la Figura 5.24 se presenta el valor máximo del Índice I, es decir, el porcentaje máximo de agrietamiento obtenido al final de la desecación para los relaves MR1 y MR2. Como se puede apreciar, existe una tendencia a aumentar el agrietamiento máximo mientras mayor sea AHR, es decir, mientras más delgada la capa en desecación mayor será el nivel de agrietamiento. Esto concuerda con las observaciones realizadas en la Sección 5.3.

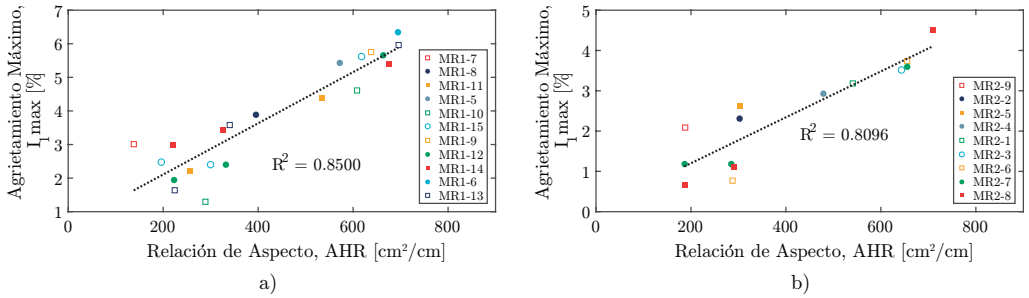


Figura 5.24: Influencia de la Relación de Aspecto en el Agrietamiento Máximo Observado para a) Relave MR1, y b) Relave MR2.

Finalmente, en la Figura 5.25 se presenta la relación obtenida entre los tres índices en estudio y la succión matricial en las muestras de MR2, donde en el eje vertical se presentan los índices, mientras que en el eje horizontal la succión en escala logarítmica. A partir de los gráficos se puede concluir que, a menor contenido de agua, mayor es el valor de la succión matricial, y mayor valor para cada índice. Una vez que los relaves alcanzan el LC, los índices

tienden a un valor constante, es decir, a partir de este punto el relave ya no experimenta cambios volumétricos, sin embargo, más allá del LC el relave continúa perdiendo agua, y aumentando los valores de succión matricial. Además, graficando la succión en escala logarítmica, se puede observar que el agrietamiento ocurre en un corto periodo de tiempo, luego de alvanzar el AEV y LC. Esto coincide con los resultados de Miller et al. (1998), quien observó que el proceso de agrietamiento de una arcilla limosa ocurre en un periodo de 19 horas, en comparación con el total de 170 hotas para el proceso de desecación.

Sobre esta base, se concluye que el agrietamiento ocurre en la zona de efecto de transición de la SWRC. Así, el suelo comienza a desaturarse progresivamente, donde la fase líquida aun es contínua, lo que explica la rápida pérdida de agua.

5.5. Patrón de Agrietamiento y Contenido de Sólidos Inicial

Una vez establecida la influencia del AHR en el patrón de agrietamiento, una variable de interés a estudiar consiste en el contenido de sólidos (CS) inicial con el cual se deposita el relave. Actualmente, la industria avanza hacia la optimización del recurso hídrico utilizado tanto en el procesamiento del mineral como en la depositación de los relaves mineros, por lo cual, el CS con que los relaves suelen ser depositados va disminuyendo continuamente. Dado lo anterior, en esta investigación se definió un amplio rango de CS para el estudio del agrietamiento superficial en los relaves MR1 (55 % a 75 %) y MR2 (44 % a 64 %). Dichos rangos fueron establecidos en laboratorio para la consistencia máxima y mínima posible en que los relaves pudieran ser depositados fluyendo por gravedad y sin sufrir segregación significativa al manipular la mezcla en slurry.

En la Figura 5.26 y 5.27 se presenta el agrietamiento final obtenido en las muestras de relave MR1 y MR2, respectivamente, las cuales se prepararon a distintos CS inicial y se depositaron en capas de igual altura. De esta forma, se fija el AHR para así aislar la influencia del CS inicial en el agrietamiento. Dicho AHR se fijó en 614 para MR1 y 582 para MR2.

En los ensayos de MR1 se aprecia que aquellos ensayos realizados a un mismo CS inicial presentan un patrón de agrietamiento visualmente similar, sin evidenciar una tendencia clara entre el ancho y separación de grietas respecto del CS. Sin embargo, aquellos ensayos realizados a CS = 60 % y CS = 55 % no lograron reproducir el patrón de agrietamiento esperado, esto es, la formación de grietas principales y secundarias formando bloques poligonales cerrados o semi-cerrados entre sí. Como se aprecia en las Figuras 5.26d) y 5.26e), ambos ensayos se vieron afectados por las condiciones de borde de las bandejas de desecación, surgiendo las grietas desde los bordes hacia el centro. Lo anterior, sugiere que pudiese existir una dependencia entre el AHR y el CS inicial de las muestras preparadas en laboratorio. Resulta interesante profundizar a futuro la investigación en este aspecto.

Del mismo modo, para MR2 se observa una similitud visual en el patrón de agrietamiento final obtenido en aquellos ensayos realizados a un mismo CS inicial, y se aprecia también la presencia de grietas primarias y secundarias al igual que en MR1. Además, los ensayos realizados a un CS inicial de 44 % no generaron un patrón de agrietamiento óptimo, viéndose afectado por las condiciones de contorno de la bandeja de desecación, al igual que los ensayos de MR1 realizados a CS inicial de 60 % y 55 %. Lo anterior parece indicar que

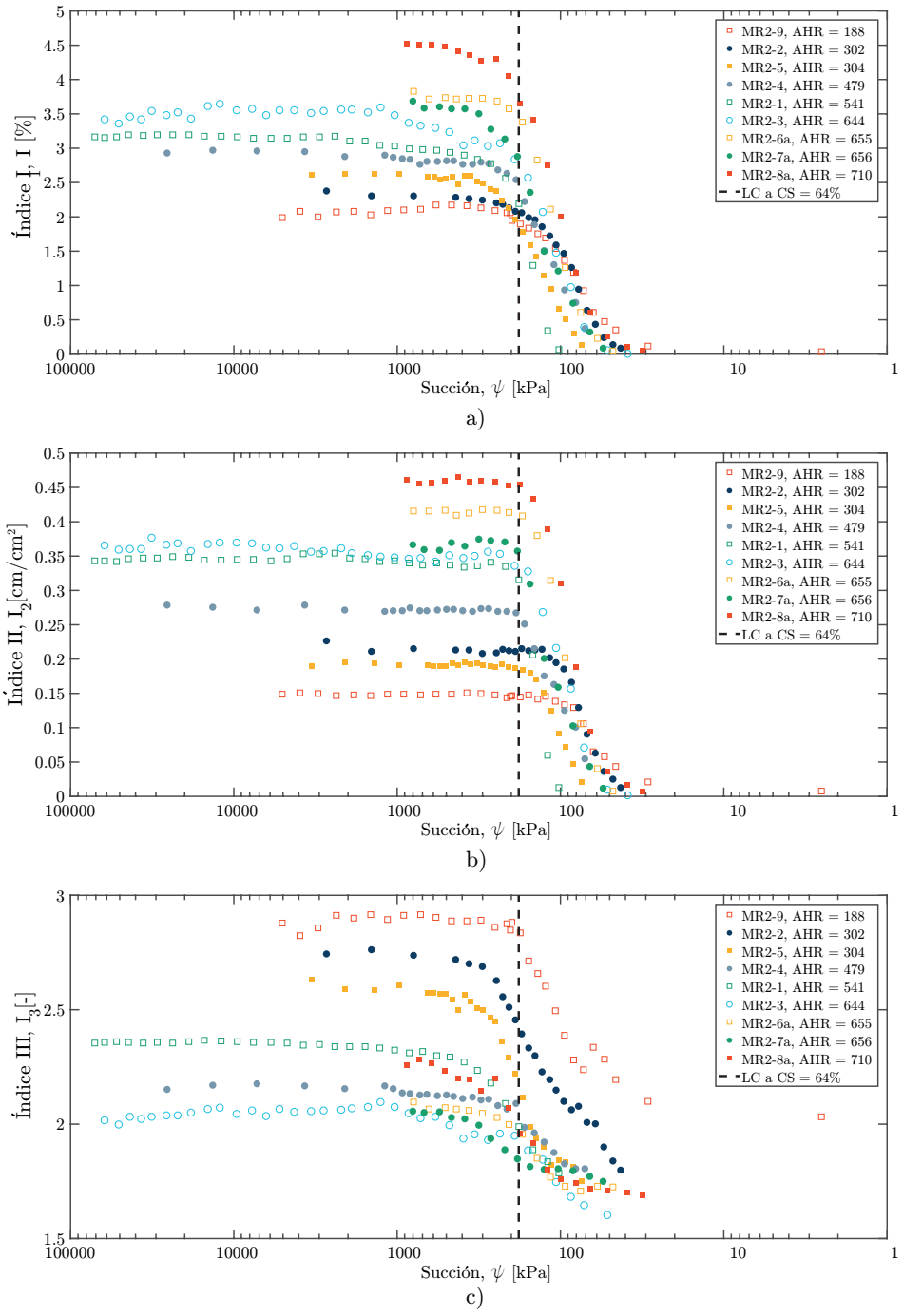


Figura 5.25: Succión Matricial en las Muestras en Desecación para Relave MR2 versus a) Índice I, b) Índice II, y c) Índice III.

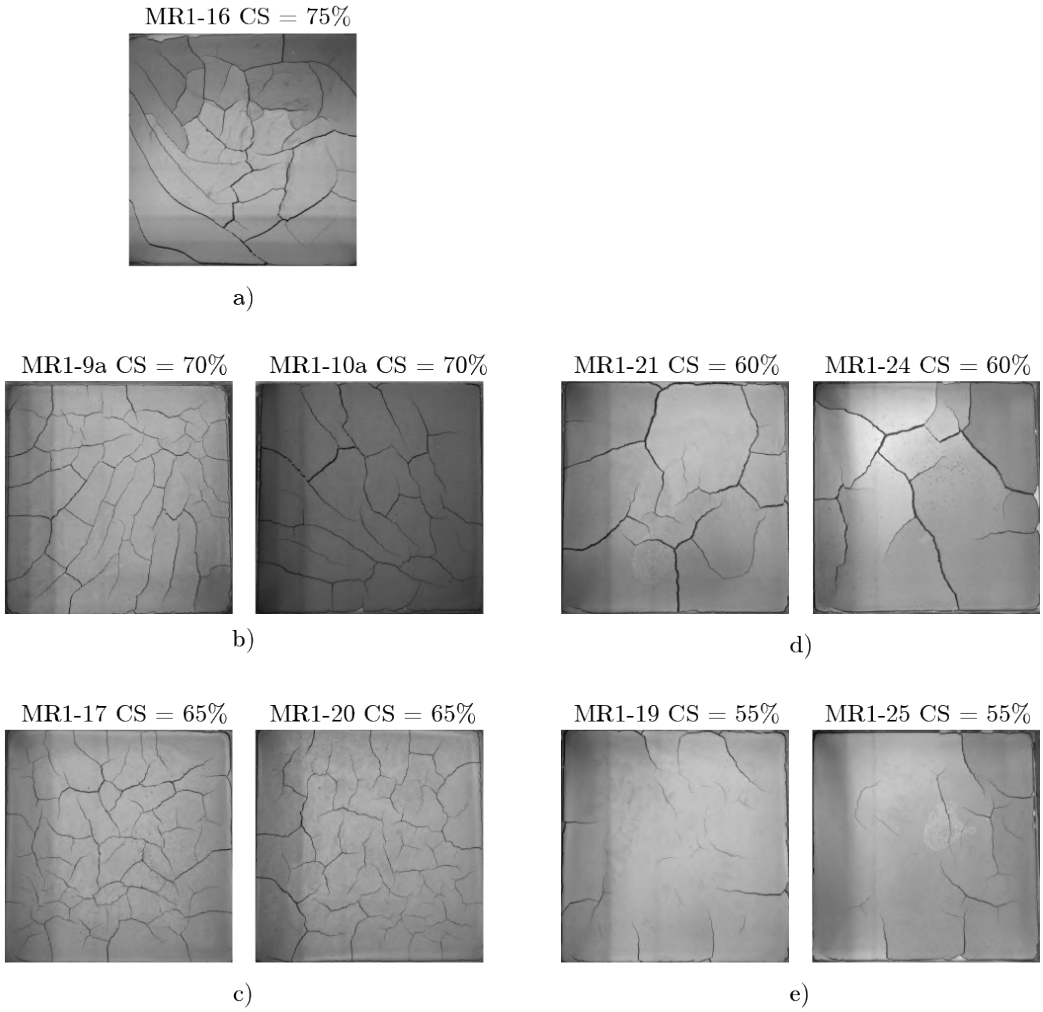


Figura 5.26: Agrietamiento Final en Relave MR1 con Variación en el Contenido de Sólidos Inicial: a) CS = 75 %, b) CS = 70 %, c) CS = 65 %, d) CS = 60 %, e) CS = 55 %.

la relación entre AHR y el patrón de agrietamiento depende del CS inicial, por lo que para reproducir ensayos de desecación en laboratorio esta relación debe fijarse de acuerdo a la respuesta propia de cada material ensayado.

Para evaluar cuantitativamente el patrón de agrietamiento obtenido en los presentes ensayos de desecación, se presenta en las Figuras 5.28 y 5.29 los índices propuestos en este estudio separados por color de acuerdo a su CS inicial. Se incluye en ellos en línea segmentada el LC calculado presentado en la Sección 5.1, y estimado mediante interpolación para aquellos CS inicial intermedios. Para los CS de 60 % y 55 % en MR1, 52 %, 48 % y 44 % en MR2, el LC no es posible estimarlo dado que queda fuera del rango evaluado en la Sección 5.1.

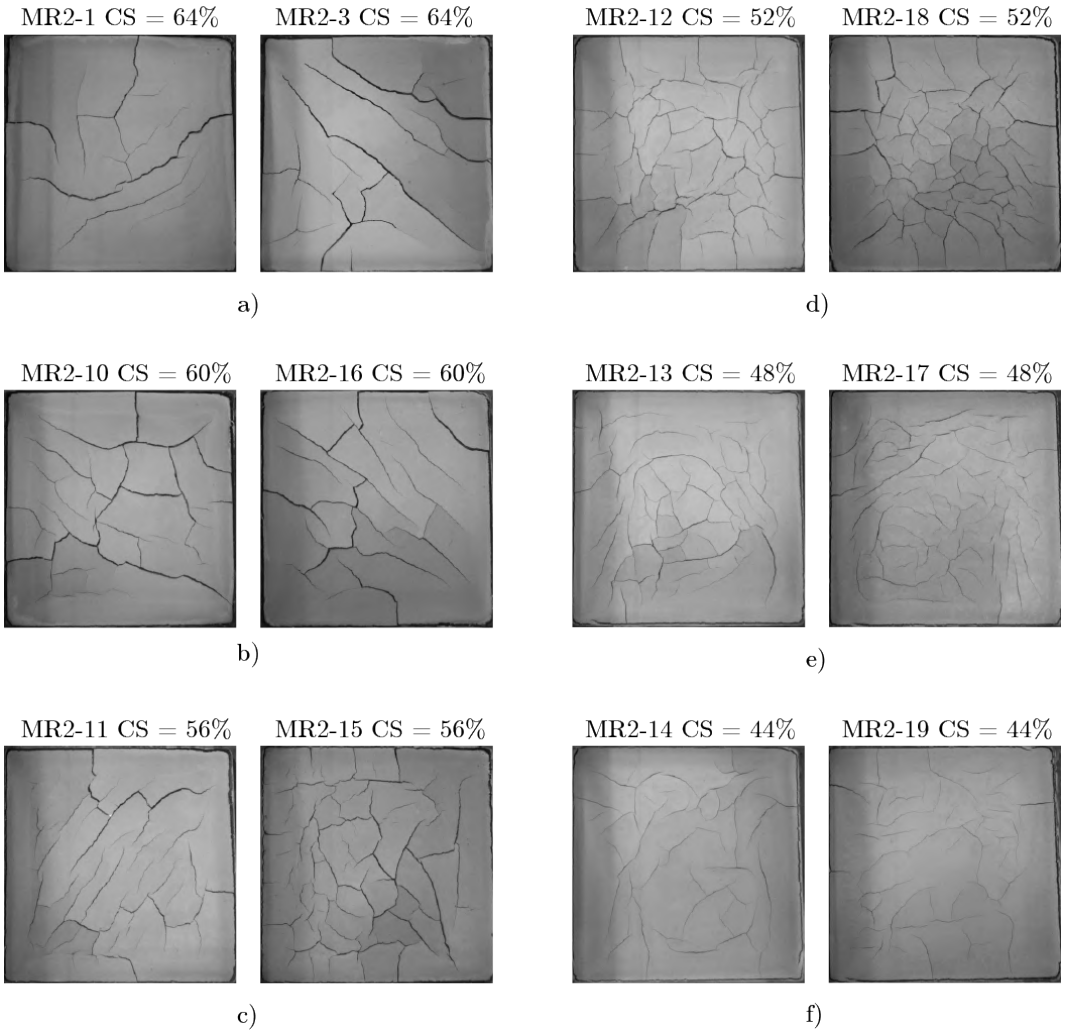


Figura 5.27: Agrietamiento Final en Relave MR2 con Variación en el Contenido de Sólidos Inicial: a) CS = 64 %, b) CS = 60 %, c) CS = 56 %, d) CS = 52 %, e) CS = 48 %, f) CS = 44 %.

El Índice I, presentado en la Figura 5.28a) y la Figura 5.29a) para MR1 y MR2, respectivamente, presenta resultados similares a aquellos ensayos realizados a un mismo CS inicial, existiendo cierta variación que puede deberse a imperfecciones en la rutina de procesamiento digital de imágenes desarrollada y descrita en el Capítulo 4. De forma similar a los resultados presentados en la Sección 5.4 para el Índice I a distintos AHR, la primera grieta se abre a una humedad cercana al LL del material. Luego, las grietas se propagan formando un tramo de pendiente negativa hasta alcanzar el LC correspondiente a cada CS inicial. A partir de allí, la curva se mantiene relativamente constante, siendo la pequeña pendiente observada

debido a ruido existente en las imágenes. Sin embargo, aquellos ensayos preparados a un CS inicial de 60 %, 55 % en MR1, y 44 % en MR2, no se ajustan al comportamiento de las demás muestras, presentando una pendiente mucho menor. Esta diferencia se explica debido a que estas muestras se vieron afectadas por las condiciones de contorno de las bandejas en desecación.

Respecto al Índice II, presentado en la Figura 5.28b) y Figura 5.29b) para MR1 y MR2, respectivamente, se aprecia un comportamiento similar al obtenido para el Índice I. Esto es, la primera grieta surge a una humedad cercana al LL del material, a partir de la cual las grietas continúan propagándose hasta estabilizarse a una humedad cercada al LC en cada ensayo. Tanto a partir del Índice I como del Índice II pareciera existir una relación lineal entre el CS inicial y el valor del agrietamiento máximo obtenido al final de la desecación. Sin embargo, existen algunos ensayos que no se ajustan exactamente a dicha tendencia, los cuales se analizarán más adelante.

Finalmente, el Índice III presentado en las Figuras 5.28c) y 5.29c) presenta un comportamiento similar a aquel obtenido para un mismo CS inicial, observándose una pendiente similar entre las curvas en el tramo desde la primera grieta hasta alcanzar el LC en todos los ensayos excepto en aquellos que se vieron afectados por las condiciones de contorno de las bandejas de desecación. Una vez alcanzado el LC, todas las curvas presentan un segundo tramo casi horizontal. Dado que una vez superado el LC el agrietamiento no continúa aumentando, la leve pendiente observada en este segundo tramo se debe a imperfecciones del procesamiento digital de imágenes. En este caso, no pareciera existir una tendencia clara entre el valor máximo de agrietamiento, es decir, valor máximo del Índice III y el CS inicial.

Como se mencionó en la Sección 5.4, descartó el Índice IV como un buen indicador del agrietamiento dado que para que se formen los bloques poligonales en el patrón de agrietamiento en los relaves en estudio es necesario que éstos pierdan una cantidad de agua significativa, tramo en el cual ocurre el desarrollo principal del agrietamiento. Así, el Índice IV puede evaluarse cuando el agrietamiento ya se ha desarrollado casi en su totalidad. Lo mismo ocurrió en los ensayos de MR1 y MR2 realizados a distintos CS inicial. Por lo tanto, el Índice IV no entrega resultados satisfactorios en este caso nuevamente.

Para analizar de forma más clara la influencia del CS inicial en el patrón de agrietamiento, se presenta en las Figuras 5.30a) y 5.30b) la variación de la humedad de agrietamiento (humedad a la cual se abre la primera grieta), y el agrietamiento máximo medido en función de I_1, respecto de la variación del CS inicial. Como se puede apreciar, la humedad de agrietamiento medida en MR2 resulta mayor a aquella registrada para MR1 a un mismo CS inicial, es decir, es esperable que, independiente del CS inicial y con base en las SWRC medidas para ambos relaves, el agrietamiento en MR2 inicie a valores de succión más altos que en las muestras de MR1. Por su parte, en MR2 se obtiene una relación inversa entre la humedad de agrietamiento y el CS de sólidos inicial, es decir, la humedad de agrietamiento aumenta a medida que el CS inicial va disminuyendo. Dicha tendencia se mantiene para todos los ensayos excepto para aquellos realizados a un CS inicial de 44 %. Nuevamente, este comportamiento fuera de la tendencia se explica por la influencia de las condiciones de contorno de las bandejas de desecación en el patrón de agrietamiento. Se destaca además que, esta tendencia coincide con lo observado por Ávila (2004), quien obtuvo una relación proporcional entre la humedad de agrietamiento y la humedad inicial de las muestras en

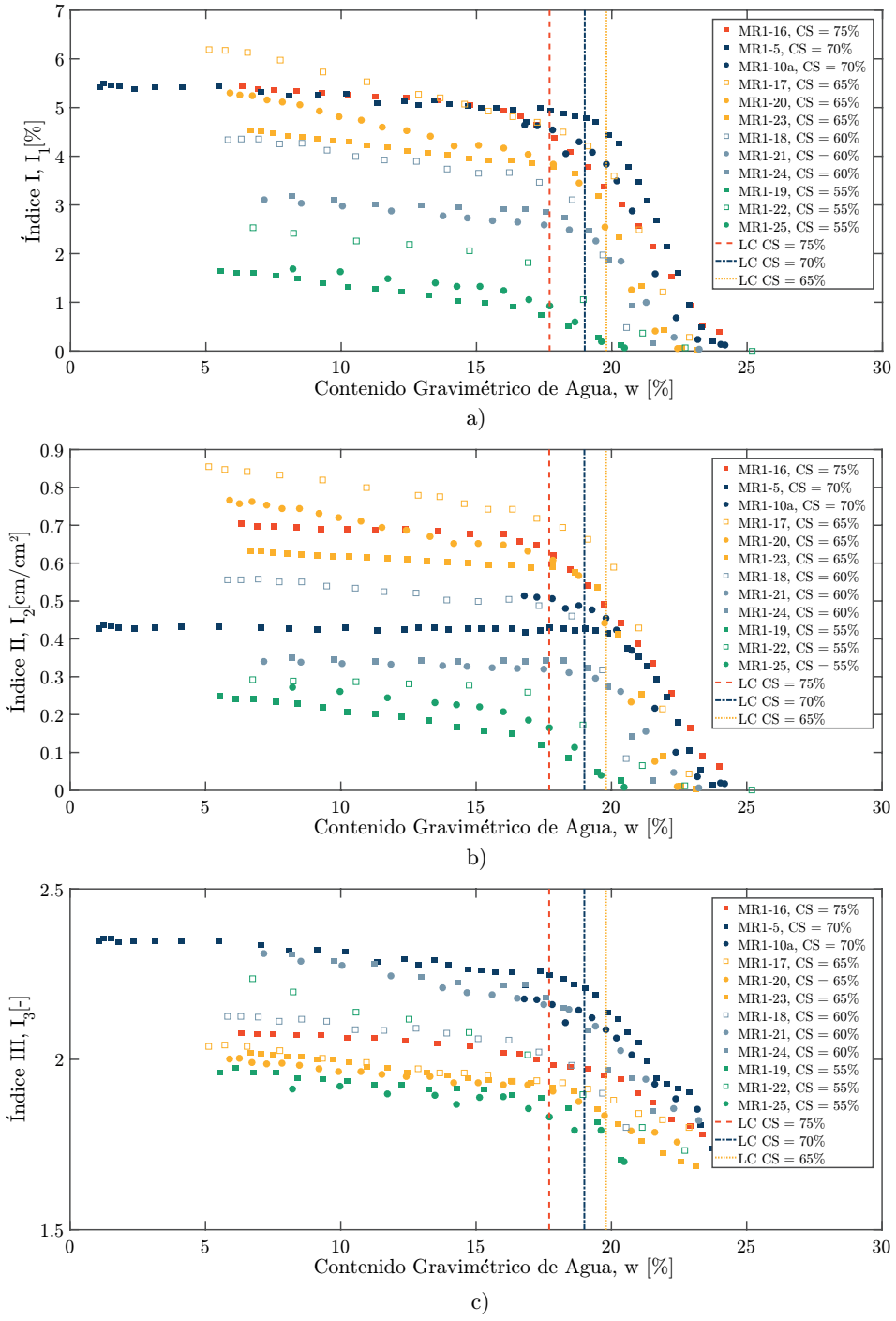


Figura 5.28: Contenido de Agua de las Muestras en Desecación para Relave MR1 a Distintos CS Inicial versus a) Índice I, b) Índice II, y c) Índice III.

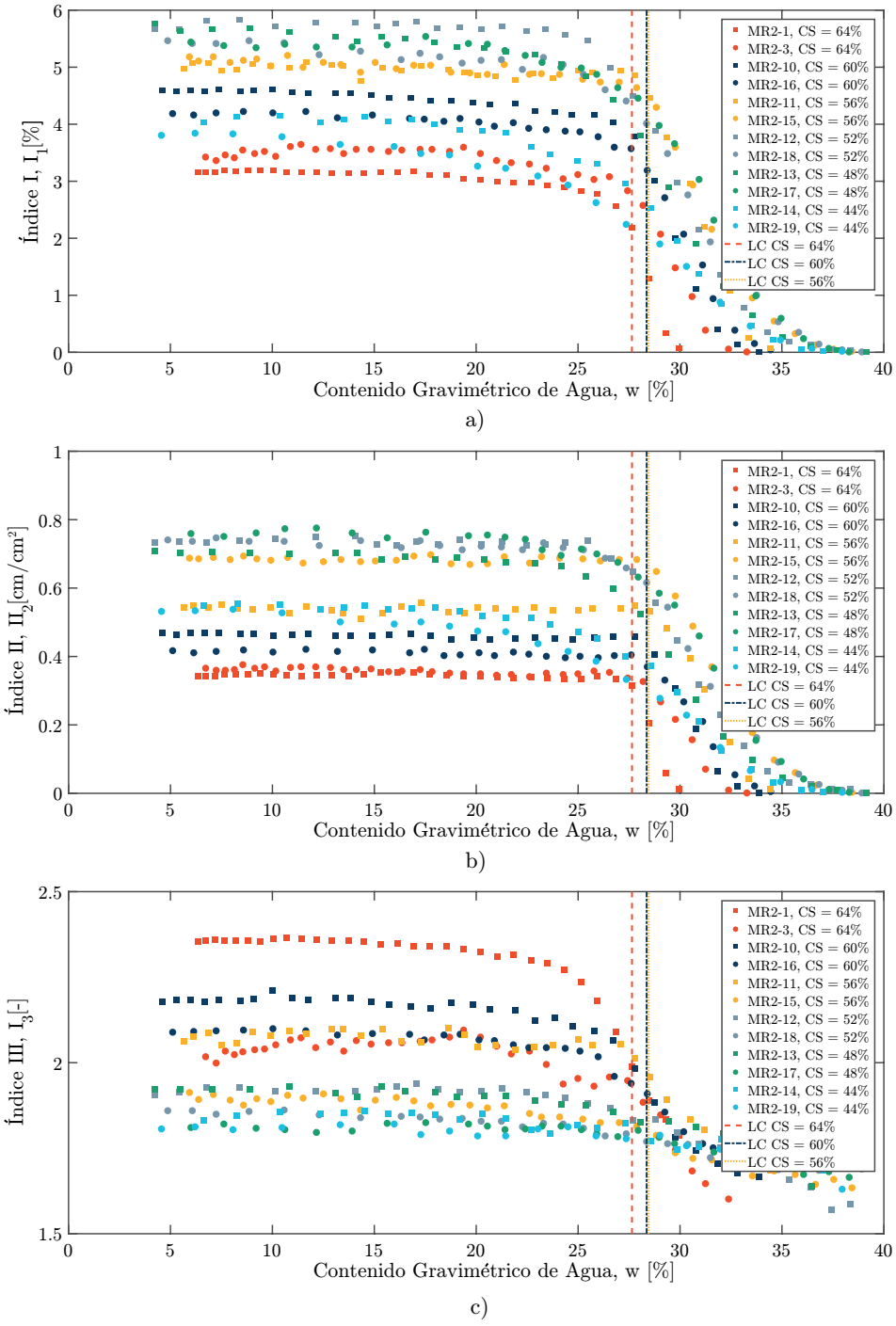


Figura 5.29: Contenido de Agua de las Muestras en Desecación para Relave MR2 a Distintos CS Inicial versus a) Índice I, b) Índice II, y c) Índice III.

desecación. Sin embargo, para MR1 se obtuvo la relación inversa, esto es, la humedad de agrietamiento disminuye a medida que el CS inicial va disminuyendo. En esta tendencia no fueron considerados aquellos ensayos que se vieron afectados por las condiciones de contorno de las bandejas de desecación.

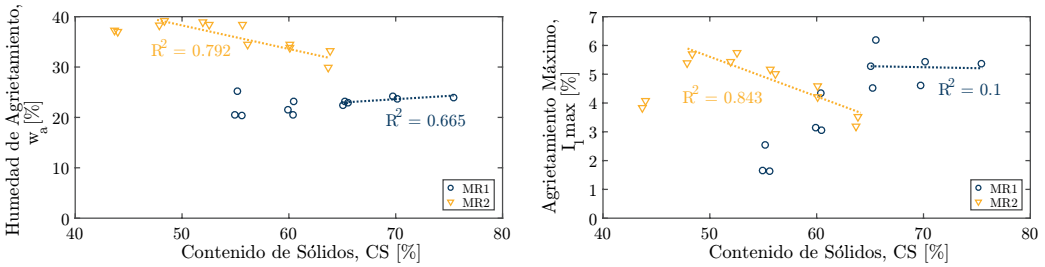


Figura 5.30: Influencia del Contenido de Sólidos Inicial en a) Humedad de Agrietamiento, b) Agrietamiento Máximo.

Respecto al agrietamiento máximo obtenido, en MR2 se observa la misma tendencia proporcional entre el CS inicial y el agrietamiento máximo, es decir, a medida que disminuye el CS inicial aumenta el porcentaje de área agrietada. Sin embargo, en MR1 no se obtiene una relación clara, apreciándose una dispersión importante en los valores obtenidos en aquellos ensayos preparados a CS inicial de 65 %. Estas diferencias significativas en el comportamiento de MR1 y MR2 pueden explicarse por los cambios volumétricos experimentados durante la desecación y las relaciones de vacíos o densidades finales obtenidas. Por ello, en la Figura 5.31a) y Figura 5.31b) se presentan las relaciones de vacíos inicial y final para MR1 y MR2, respectivamente. Se destaca que la relación de vacíos inicial se calculó a partir de las propiedades del relave, la humedad inicial y el volumen inicial ocupado por la capa depositada, mientras que la relación de vacíos final se obtuvo a partir de ensayos de densidad suspendida realizados a muestras del relave al término del proceso de desecación.

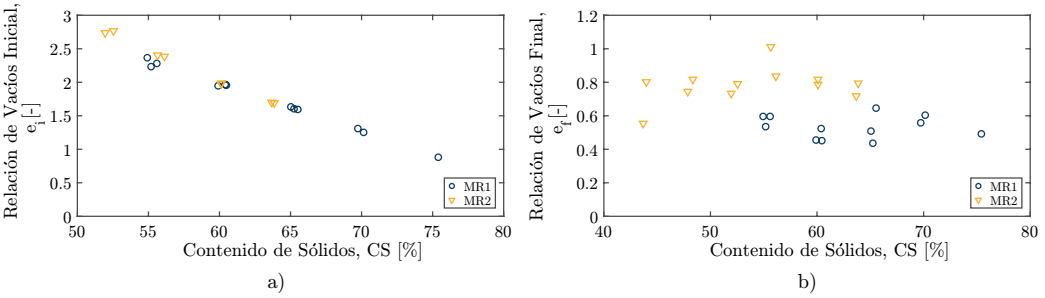


Figura 5.31: Influencia del Contenido de Sólidos Inicial en a) Relación de Vacíos Inicial, b) Relación de Vacíos Final.

Como se puede apreciar, la relación de vacíos inicial con que se prepararon las muestras de los relaves MR1 y MR2 presenta una relación lineal al disminuir el CS inicial, lo cual es

esperable ya que al disminuir el CS aumenta el contenido de agua, y con ello aumenta la relación de vacíos en la muestra. Destaca también en ambos relaves que los valores obtenidos parecen mostrar una tendencia lineal muy similar entre ambos, la cual se explica dado que ambos relaves estudiados presentan una gravedad de sólidos específica (G_s) muy cercana. Respecto a la relación de vacíos final, la tendencia no es tan clara ni en MR1 ni en MR2. La relación entre el CS inicial y la relación de vacíos final no evidencia una tendencia en particular, existiendo además, una oscilación en los valores medidos. Esta misma respuesta se puede analizar en términos de la densidad seca inicial y final, presentadas en la Figura 5.32a) y 5.32b), respectivamente.

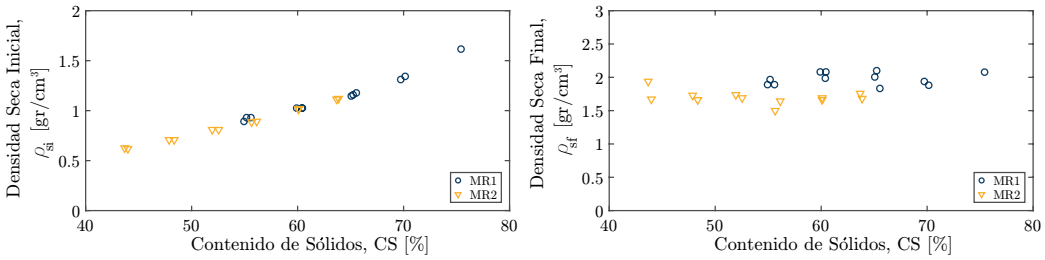


Figura 5.32: Influencia del Contenido de Sólidos Inicial en a) Densidad Seca Inicial, b) Densidad Seca Final.

Como es esperable, en ambos relaves la densidad seca inicial tiende a aumentar al aumentar el CS inicial, mientras que en la relación de vacíos final se evidencia nuevamente esta relación sin una tendencia clara en el comportamiento en desecación en MR1 y MR2. Teóricamente, es esperable que aquellas muestras preparadas a un CS inicial mayor resulten al final de la desecación con una densidad seca mayor, es decir, una relación de vacíos menor. Sin embargo, los valores obtenidos son relativamente constantes, y discrepan además, con lo observado en las muestras circulares desecadas para el cálculo de la curva de contracción. Esta diferencia en el comportamiento al final del proceso de desecación puede deberse al efecto del agrietamiento observado. Esto es, en las muestras pequeñas que no sufrieron agrietamiento para el cálculo de la curva de contracción la desecación ocurrió de manera lenta y uniforme. Además, por el tamaño de la muestra la densidad final se puede asumir como uniforme. Sin embargo, en las muestras ensayadas en las bandejas cuadradas de 20x20cm de área, el agrietamiento ocurrido pudo generar que el cambio volumétrico no haya sido uniforme en toda la muestra, por lo que la densidad final obtenida puede variar dependiendo si el trozo extraído para el ensayo de densidad suspendida se extrajo del borde o del centro de los bloques poligonales observados.

Respecto a la variación volumétrica, se registró por separado la contracción vertical final de las muestras y la contracción final debido a la formación de grietas por desecación. En la Figura 5.33a) y 5.33b) se presenta la variación volumétrica obtenida al final del proceso de desecación para MR1 y MR2, respectivamente, medida en términos porcentuales respecto a la altura inicial de depositación de las muestras. En ellas se aprecia que en ambos relaves estudiados la contracción volumétrica total disminuye al aumentar el CS inicial. Esto se debe a que al preparar las muestras con un alto CS inicial, la relación de vacíos de preparación es

menor y, por lo tanto, la densidad seca inicial de la muestra es mayor, tal como se aprecia en la Figura 5.31a). Por lo tanto, las partículas sólidas del relave tienen menos espacios vacíos entre ellas para ocupar durante la evaporación de agua. Respecto a la contracción vertical, se aprecia que resulta muy cercana a la contracción total, por lo que la contracción horizontal resulta, en comparación, significativamente menor. En ambos relaves no se aprecia una tendencia clara entre el CS inicial de las muestras y el porcentaje de cambio volumétrico debido a las grietas por desecación, observándose que en todos los ensayos realizados resulta siempre menor al 10 % del cambio volumétrico.

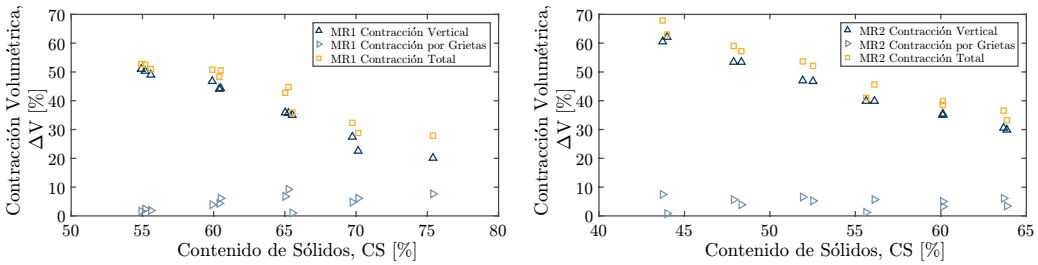


Figura 5.33: Influencia del Contenido de Sólidos Inicial en la Contracción Volumétrica para a) MR1, y b) MR2.

Finalmente, en la Figura 5.34a) y Figura 5.34b) se presenta la variación de la relación de vacíos respecto de la densidad seca para MR1 y MR2, respectivamente. La información graficada se ha agrupado de acuerdo al CS inicial de preparación, y si corresponden a valores iniciales (previos a la desecación, *ini*), o a valores finales (posteriores al proceso de desecación, *fin*). Como se puede apreciar, en ambos relaves la e versus ρ_s parece describir una única curva entre los valores previo y post desecación, disminuyendo la relación de vacíos al aumentar la densidad seca.

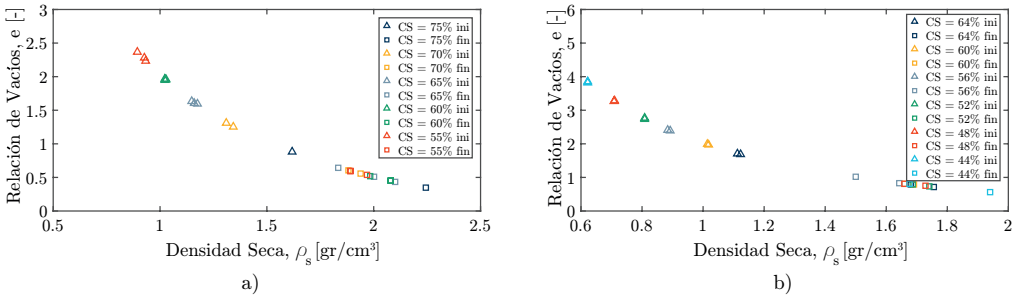


Figura 5.34: Relación de Vacíos versus Densidad Seca para a) MR1, y b) MR2.

5.6. Tasas de Evaporación

En la Figura 5.35a) y 5.35b) se presentan las tasas de evaporación registradas para los ensayos de los relaves MR1 y MR2, respectivamente. En ellas se señala, además, el valor de entrada de aire (AEV) y el LC para cada caso. Como se puede apreciar, tanto para MR1 como para MR2 las tasas de evaporación tienden a ser altas a altos niveles de humedad de las muestras, es decir, al inicio del proceso de desecación. Esto se debe al alto contenido de agua disponible para evaporar una vez que se ha depositado el relave y comienza el proceso de sedimentación. A medida que el proceso de desecación continúa las tasas de evaporación tienden a disminuir progresivamente. Sin embargo, en MR2 se registraron valores menores de AE/PE en comparación con MR1, lo cual puede explicarse dado que la succión en MR2 sería mayor a un mismo nivel de humedad que en MR1. Una vez que los relaves alcanzan el AEV las tasas de evaporación ralentizan su decaimiento, observándose que permanecen casi constante hasta alcanzar el LC. Una vez superado el LC las tasas de evaporación disminuyen rápidamente. Esto puede explicarse debido a la influencia del agrietamiento superficial en los relaves, ya que en todas las muestras ensayadas el agrietamiento comenzó en un estado parcialmente saturado, es decir, por debajo del AEV. Ello indica que las paredes verticales expuestas por las grietas actúan también como área evaporante, permitiendo así registrar tasas de evaporación casi constantes en el rango entre AEV y LC. Se destaca también la relación observada entre las tasas de evaporación y el AHR. En general, se aprecia que a menor AHR las tasas de evaporación tienden a ser más bajas, es decir, la evaporación es menor en aquellas muestras depositadas en capas más gruesas. Esto puede explicarse dado que en ambos relaves aquellas capas más gruesas presentaron un menor nivel de agrietamiento, es decir, el área evaporante resultó menor en las muestras más gruesas. Dichos resultados concuerdan con lo observado por Lakshmikantha et al. (2006) en la desecación en laboratorio de un suelo natural arcilloso.

A partir de la curva de succión (SWRC) medida para MR2, se presenta en la Figura 5.35c) las tasas de evaporación registradas para el relave MR2 respecto de la succión. En línea negra continua se incluye, además, la curva obtenida a partir de la Ecuación 2.2 de Wilson et al. (1997) calculada para una humedad ambiental del 45 %. Como se puede apreciar, las tasas de evaporación decaen siguiendo una tendencia exponencial invertida a medida que aumenta la succión. Sin embargo, la ecuación de Wilson et al. (1997) no resulta un buen ajuste para las evaporaciones medidas en MR2, entregando, en general, altos valores para AE/PE. La principal discrepancia resulta en los valores iniciales de evaporación, donde para MR2 se registraron altas tasas de evaporación cuando las muestras en desecación se encontraban aún en estado saturado, es decir, cuando aun no se registraban valores de succión. Además, la ecuación de Wilson et al. (1997) predice altos valores de evaporación incluso para cuando el relave ya a superado el LC. Una vez superado LC, los valores predichos por la ecuación de Wilson disminuyen rápidamente, a una tasa mayor que los medidos en laboratorio. Esto último puede deberse a que la ecuación de Wilson no considera en su planteamiento el agrietamiento superficial, el contenido de agua del suelo, la textura o la mineralogía, pudiendo ser éste último un factor relevante que influya en las tasas de evaporación en relaves mineros.

Para analizar más en detalle la relación entre AE/PE, AEV y LC en cada relave en estudio, se presenta en las Figuras 5.36 y 5.37 las tasas de evaporación medidas para dos muestras de MR1 y dos muestras de MR2. En línea negra contínua se presenta, además, el valor de humedad en que se abrió la primera grieta en cada ensayo. Así, entre las humeda-

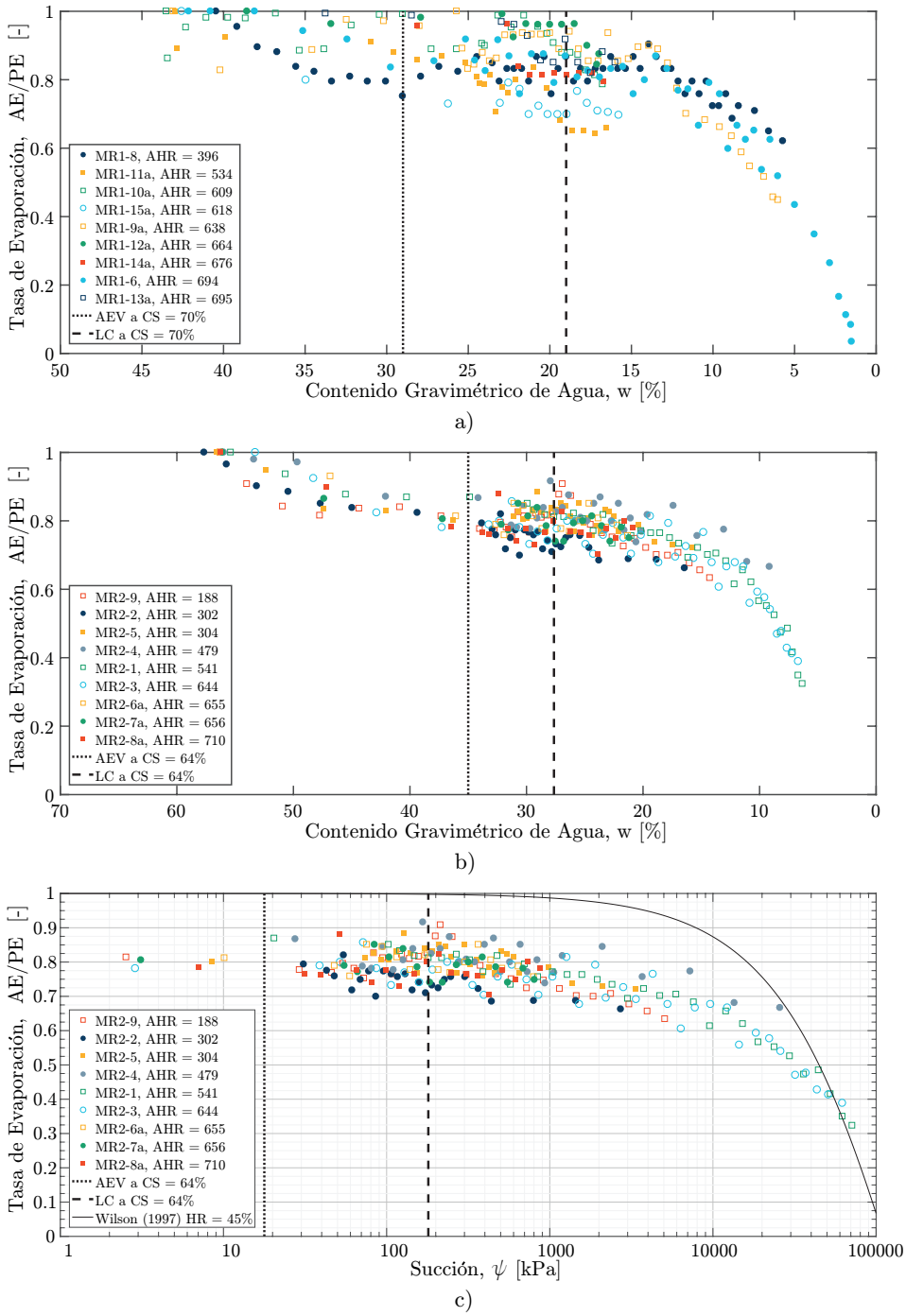


Figura 5.35: a) Tasas de Evaporación para MR1, b) Tasas de Evaporación para MR2, c) Comparación AE/PE Teórico y Experimental para MR2.

des correspondientes al AEV, primera grieta y LC se definen cuatro rangos o etapas en el proceso evaporativo en relaves finos. La primera etapa presenta una alta tasa de evaporación al comienzo de la desecación, la cual se explica debido al alto contenido de agua del relave, formando una delgada capa de agua superficial. La tasa de evaporación permanece relativamente constante en esta primera etapa hasta alcanzar el AEV, en el cual comienza a entrar aire a la matriz porosa del relave pasando a un estado parcialmente saturado ($S < 100\,\%$). La segunda etapa se identifica a niveles de humedad entre el AEV y la aparición de la primera grieta. En esta etapa, se presenta sólo una contracción vertical de la muestra, y la tasa de evaporación aumenta levemente respecto de la etapa anterior. Por su parte, la tercera etapa se encuentra a humedades entre la aparición de la primera grieta y el LC. En ella se aprecia que las tasas de evaporación se mantienen relativamente constantes. Lo cual se explica debido al aumento de la superficie evaporante a través de las paredes verticales expuestas por las grietas. Finalmente, la cuarta etapa va desde el LC hasta el final del ensayo. En ella el relave en las bandejas se encuentra con contenidos de humedad menores a $19\,\%$ para MR1, y menores a $28\,\%$ para MR2, y ya no existe aumento del agrietamiento, por lo que el área evaporante se mantiene constante a partir de este punto. Debido a ello, las tasas de evaporación disminuyen progresivamente a medida que disminuye el contenido de agua del relave, finalizando en este punto los ensayos.

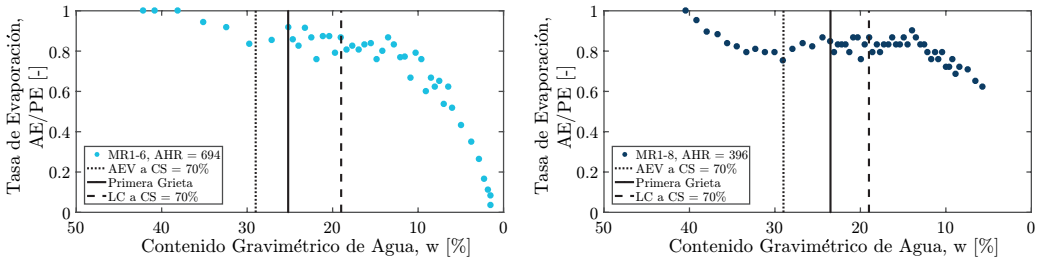


Figura 5.36: Tasas de Evaporación versus Contenido de Agua para a) MR1-6, y b) MR1-8.

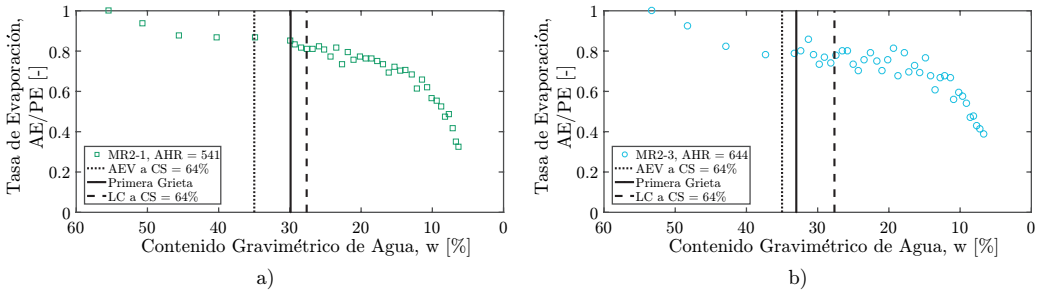


Figura 5.37: Tasas de Evaporación versus Contenido de Agua para a) MR2-1, y b) MR2-3.

Finalmente, se analizan las tasas de evaporación en los ensayos realizados a diferentes CS inicial para MR1 y MR2, cuyos resultados se presentan en la Figura 5.38. Se puede apreciar que en ambos relaves AE/PE tiende a valores altos, cercanos a 1, a altos niveles de hume-

dad inicial. Luego, a medida que avanza el proceso de desecación, AE/PE va disminuyendo progresivamente, similar a lo observado en la Figura 5.35. La influencia del CS inicial en las muestras se aprecia al inicio del proceso de desecación, donde aquellas muestras preparadas a menores CS inicial, comienzan a evaporar a mayores niveles de humedad. En esta primera etapa cuando las muestras aún se encuentran en estado saturado, las tasas de evaporación disminuyen rápidamente para aquellas muestras depositadas a un CS inicial más alto, en comparación a aquellas muestras que se depositaron a menores CS inicial.

Dado lo anterior, se evidencia la relación entre el proceso de desecación en relaves finos, y parámetros del material tales como el AEV, LL, LC y humedad a la primera grieta. Además, se constató en los resultados la influencia del agrietamiento superficial en las tasas de evaporación, permitiendo mantener valores altos de AE/PE cuando el material ya se encuentra en estado parcialmente saturado y cercano al LC.

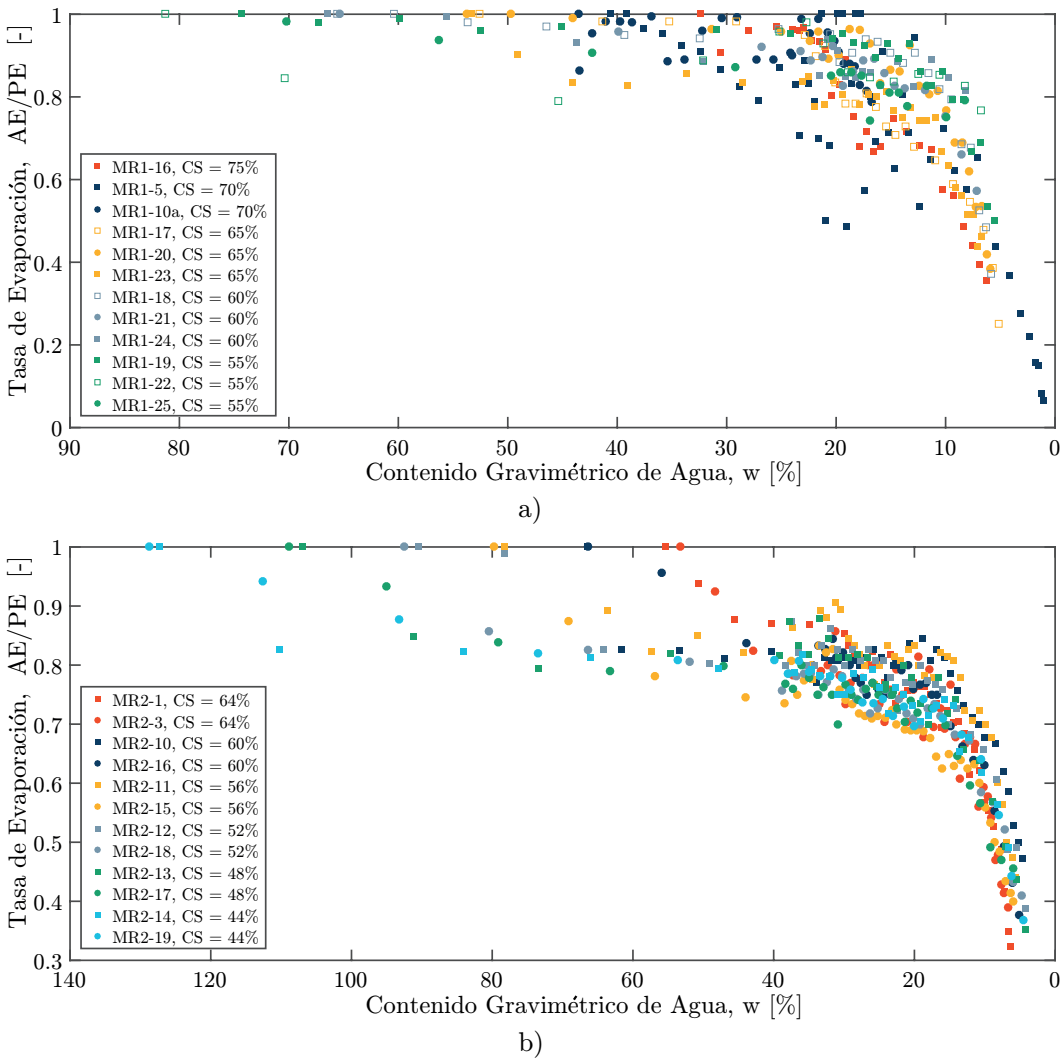


Figura 5.38: Tasas de Evaporación versus Contenido de Agua para Muestras Preparadas a Distintos CS Inicial a) MR1, y b) MR2.

Capítulo 6

CONCLUSIONES

6.1. Resumen

EL agrietamiento superficial en relaves mineros es un fenómeno que ha sido ampliamente observado en terreno, sin embargo, el estudio sobre su influencia y evolución ha sido poco desarrollado. Además, los estudios existentes se realizaron sobre relaves provenientes de industrias mineras ubicadas en países como Australia, Cuba o Canadá. A nivel nacional, no existen a la fecha estudios del agrietamiento superficial en terreno o en laboratorio.

El objetivo de esta investigación fue comprender el comportamiento de relaves finos provenientes de la industria minera nacional bajo desecación, y poder cuantificar la influencia y/o relación del agrietamiento superficial por desecación con variables como el CS inicial, el AHR de las muestras, y las tasas de evaporación AE/PE.

Se estudiaron dos muestras de relaves provenientes de la extracción de hierro (MR1 y MR2), y una muestra proveniente de la extracción de cobre (MR3) de faenas mineras ubicadas en el norte de Chile. Se ejecutaron ensayos de desecación a escala menor para determinar la curva de contracción, y ensayos de desecación a una escala media para estudiar el proceso de desecación considerando el agrietamiento superficial. Todas las muestras se prepararon en slurry a un determinado CS inicial y depositadas a un determinado AHR, según la variable en estudio. Así, se realizaron tres tipos de pruebas: i) ensayos de una capa, para estudiar la relación entre AHR y el agrietamiento superficial, ii) ensayos multicapa, para estudiar la influencia en el patrón de agrietamiento de una capa fresca de relave depositada sobre una capa ya desecada y agrietada, y iii) ensayos con variación del CS inicial, para estudiar la influencia del nivel de humedad inicial en el patrón de agrietamiento. En todos los casos se midieron también las tasas de evaporación en términos de la evaporación relativa AE/PE.

6.2. Conclusiones

A continuación, se detallan las principales conclusiones de la presente investigación:

- Si bien los relaves son suelos no naturales producidos como residuos en las operaciones mineras, en esta investigación se observó que se comportan de forma similar a suelos naturales finos con cierto nivel de plasticidad, experimentando agrietamiento por desecación generado principalmente por esfuerzos de tracción y, en menor medida, por esfuerzos de corte. Se observó también que, los relaves en desecación en laboratorio sufrieron los tres procesos esperados según literatura: asentamiento, consolidación, y desecación.

- Se logró reproducir exitosamente el proceso de agrietamiento de relaves mineros observado en terreno, logrando un nivel de repetibilidad aceptable en los resultados. Esto se aprecia dado que para AHR similares, se obtuvo valores concordantes para los índices estudiados. Del mismo modo, para muestras preparadas a un mismo CS inicial se obtuvo valores similares para los índices estudiados.

- Se obtuvo las curvas de contracción de los relaves en estudio aplicando la metodología experimental planteada en esta investigación, logrando reproducir con éxito el comportamiento de los relaves preparados a un mismo CS inicial en distintos moldes en una escala menor.

- En particular, en las curvas de contracción medidas para los relaves en estudio, se observó un comportamiento similar en MR1 y MR2, es decir, ambos presentaron niveles de deformación similares, tanto axial (vertical) como radial (horizontal). Sin embargo, en MR3 prácticamente no se observó deformación radial, siendo el cambio volumétrico debido únicamente a la deformación axial. Esta diferencia puede explicarse con base en las características de los relaves: mientras MR1 y MR2 son suelos con un alto contenido de finos, y un determinado nivel de plasticidad, el relave MR3 es un suelo más grueso sin plasticidad (NP). Este comportamiento coincide, además, con lo observado en la literatura para suelos naturales.

- Si bien hubo esta diferencia en el comportamiento de la deformación radial entre los relaves, a partir de las curvas de contracción (variación de la relación de vacíos con respecto al contenido gravimétrico de agua), se observó que los tres relaves presentaron un comportamiento similar. Esto es, aquellas muestras preparadas a un CS inicial mayor, alcanzaron al final de la desecación una menor relación de vacíos, una mayor densidad seca final, y un menor LC. Además, el LC fue alcanzado a un grado de saturación mayor. Lo anterior coincide con lo esperado de acuerdo a la revisión bibliográfica realizada, ya que al preparar las muestras con un mayor CS inicial, éstas resultan con una menor relación de vacíos inicial, lo que se traduce en que alcance el LC a una humedad mayor, con una densidad seca mayor. Es decir, el LC de los relaves es altamente dependiente del CS inicial con que se depositen. Además, este valor tiende a una constante a medida que el CS inicial disminuye. Se destaca que estas relaciones fueron obtenidas a partir de muestras preparadas en slurry, depositadas en moldes a una escala menor (base circular de 5cm diámetro y 1.5cm altura), y desecadas a una baja velocidad sin presencia de agrietamiento superficial.

- Una conclusión destacada de esta investigación la constituye el LC medido y los cambios volumétricos. Si bien la curva de contracción (relación de vacíos respecto a contenido gravimétrico de agua) es concordante con lo esperado de acuerdo a la literatura para suelos finos naturales, al separar el análisis e individualizar la deformación axial y radial, se aprecia un comportamiento distintivo, en el cual la

deformación axial comienza a niveles de humedad mucho más altos que la deformación radial. Y, del mismo modo, la deformación radial se detiene a niveles de humedad menores que la deformación axial. Esta relación permite definir el LC en relaves finos chilenos como el contenido de agua en el cual la deformación radial se detiene, y por tanto, ya no experimenta cambios volumétricos.

- A partir de los índices evaluados en esta investigación, se puede afirmar que existe una relación entre el contenido de agua y el patrón de agrietamiento por desecación en los relaves aquí estudiados, siendo el Índice I aquél con mejor desempeño para describir el proceso de agrietamiento desde el punto en que se inicia la primera grieta por desecación, hasta que el relave alcanza el LC y ya no experimenta cambios volumétricos. En la misma línea, se evidencia la relación entre el patrón de agrietamiento obtenido y el AHR a través de los índices evaluados, observándose que al aumentar el AHR aumentan los Índices I y II, mientras que al aumentar el AHR disminuye el Índice III. Además, al ensayar muestras con AHR menores a los esperados en terreno, las muestras se ven afectadas por las condiciones de contorno de las bandejas en desecación, por lo que el patrón de agrietamiento obtenido no es satisfactorio en ese caso.

- Respecto a los ensayos multicapa, no se observó influencia aparente en el agrietamiento observado en capas superiores respecto al agrietamiento desarrollado en la capa 1 o 2. Esto indica que al realizar ensayos de desecación en laboratorio cumpliendo las AHR similares a las observadas en terreno es posible estudiar de forma satisfactoria el patrón de agrietamiento sin necesidad de simular la depositación multicapa. Sin embargo, si interesa incluir en el estudio la relación con las tasas de infiltración y/o la recarga de agua desde capas inferiores, sí es necesario simular la depositación multicapa.

- El patrón de agrietamiento observado en laboratorio coincide, además, con las observaciones realizadas por Lakshmikantha et al. (2009) sobre la orientación de grietas. Esto indica que en relaves finos la mayoría de las grietas por desecación surgen mediante el mecanismo de esfuerzos de tracción, y en menor medida mediante el mecanismo de esfuerzos de corte al observar grietas intersectadas en ángulos de 90° y 120°, respectivamente.

- Respecto al proceso de agrietamiento, se observó que éste comienza en un estado parcialmente saturado del relave, por debajo de la humedad correspondiente al AEV, y cercano al LL del material, y finalizó una vez que se alcanzó el LC. Por otro lado, se observó que la tasa de evaporación está influenciada por el agrietamiento superficial, identificando tres puntos característicos: el AEV, el nivel de humedad al abrirse la primera grieta, y el LC. Estos tres puntos definen cuatro etapas en el proceso de desecación de los relaves.

- Se demostró también que, al variar el CS inicial con que los relaves son depositados, varía la densidad inicial, la humedad de agrietamiento y el agrietamiento máximo. Si bien los resultados de MR2 coinciden con lo registrado en la literatura para suelos naturales finos, esto no ocurre con los resultados de MR1. Esta diferencia en el comportamiento al final del proceso de desecación puede deberse al efecto del agrietamiento superficial, ya que los valores finales de densidad y relación de vacíos fueron determinados a partir de ensayos de densidad suspendida. Dadas las dimensiones de las muestras ensayadas (base 20x20cm) el agrietamiento ocurrido pudo

generar que el cambio volumétrico no haya sido uniforme en toda la muestra, por lo que la densidad final puede variar dependiendo si el trozo extraído para el ensayo de densidad suspendida se extrajo del borde o del centro de los bloques poligonales observados.

- Otra observación significativa corresponde a que, aparentemente, la relación entre el AHR y el patrón de agrietamiento depende además, del CS inicial, probablemente porque en los ensayos que se vieron afectados por las condiciones de borde de las bandejas la capa de agua superficial era mayor en volumen, y los sólidos una fracción menor, por lo que no alcanzó a desarrollarse las tensiones suficientes para abrirse las grietas en el medio de la bandeja, es decir, se perdió el AHR representativo de las condiciones de terreno.

- Se constató además, que la desecación permite aumentar considerablemente las densidades de depositación de los relaves estudiados, observándose grandes variaciones volumétricas incluso para aquellas muestras depositadas con altos CS inicial, obteniéndose para estos casos variaciones máximas de 30 % en total para MR1 y 40 % para MR2. En ambos casos el cambio volumétrico debido al agrietamiento por desecación constituyó un porcentaje significativo cercano al 10 % del volumen inicial de depositación. Esto confirma que permitir la desecación en relaves hasta superar el LC ayuda a aumentar las densidades de depositación, y a su vez, a optimizar los volúmenes depositados.

- Las rutinas de procesamiento digital de imágenes implementadas en este estudio lograron el objetivo de permitir el análisis del agrietamiento en relaves, permitiendo cuantificar no solo el nivel de agrietamiento, sino también aspectos geométricos tales como forma, ancho y separación de grietas en forma automatizada y optimizando recursos. Sin embargo, dichas rutinas de procesamiento mantienen ciertas imperfecciones que pueden ser mejoradas aplicando nuevas herramientas, tales como métodos de umbralización o filtrado de frecuencias actualizados y/o más específicos.

- Se demostró también que, las técnicas de procesamiento digital de imágenes se pueden aplicar con éxito a la geotecnia minera, dada su versatilidad y facilidad para desarrollar nuevas herramientas. Además, si bien muchas de ellas han sido desarrolladas para aplicación en otros campos, tales como biología, salud, o ciencias, la similitud en la información a analizar es significativa. Ello se evidenció por ejemplo, en el parecido en las imágenes de células humanas o una red vascular con el agrietamiento en relaves, donde abstrayendo el contexto, interesa en todos los casos identificar y separar estructuras delgadas del fondo continuo de la imagen. Lo que permite que herramientas que han sido desarrolladas para identificar células, u obstrucciones vasculares puedan identificar y aislar claramente los bloques poligonales formados por las grietas en la superficie de relaves mineros.

En resumen, se ha demostrado mediante los resultados de los índices aquí estudiados que existe una relación entre el nivel de agrietamiento superficial y el contenido de agua de las muestras en desecación, en las cuales a mayor nivel de agrietamiento superficial menor nivel de humedad presenta la muestra. Esta relación se mantiene incluso al desecar el relave en capas separadas, ya que una vez depositada una capa fresca de relave sobre una ya desecada éstas se comportan como una única masa evaporante. Por lo tanto, a priori, cada depósito de

relaves podría identificarse con una curva característica según su AHR y su nivel de agrietamiento. Sin embargo, esta hipótesis se debe seguir investigando. Finalmente, se determinó también que, para los relaves es beneficioso someterlos a desecación, ya que al evaporar agua y sufrir los cambios volumétricos efectivamente se logra disminuir las relaciones de vacíos y aumentar las densidades, por lo que se pueden aumentar las tasas de depositación. Lo anterior sólo es aplicable a relaves sin potencial de generación de ácidos (NAF), ya que sino el beneficio del aumento de densidad de depositación no es significativo en comparación con el riesgo de generación de flujo ácido.

6.3. Trabajo Futuro

- Resulta interesante poder extender la aplicación del procesamiento digital de imágenes y las diversas técnicas que existen actualmente al ámbito de la Ingeniería Civil y, en específico, a la Geotecnia Minera. El trabajo aquí desarrollado aplicó un nivel intermedio de procesamiento de imágenes, el cual si bien tiene cierto grado de automatización, requiere de una calibración manual inicial de acuerdo a las condiciones lumínicas y el ruido existente en las imágenes. Actualmente, el Machine Learning surge como una herramienta interesante a explorar a futuro, y que permitiría mejorar el procesamiento intermedio presentado en este documento.

- Dados los alcances definidos en esta investigación, el estudio del efecto de la salinidad en el agrietamiento superficial en relaves no fue considerado. A partir de los resultados observados, MR1 y MR2 no presentaron un efecto apreciable de la salinidad ni en el agrietamiento superficial ni en las tasas de evaporación. Sin embargo, MR3 sí presentó evidentemente manifestaciones de la alta salinidad del relave durante el proceso de desecación. Lo cual, pudo influir también en las bajas a nulas deformaciones radiales observadas en estas muestras. Así, el estudio de este aspecto en la desecación en relaves mineros chilenos puede ser relevante para aquellos relaves con altos contenidos de salinidad.

- Finalmente, en esta investigación solo se consideraron resultados de laboratorio, ya que por la pandemia COVID-19 no fue posible llevar a cabo el trabajo de campo (captura de fotografías en diferentes tiempos en terreno para registrar diferentes etapas del proceso de agrietamiento, toma de humedades, mediciones de espesores de capa depositada, entre otros), que permita validar o contrastar los resultados de laboratorio aquí presentados. Por lo que queda abierta una rama significativa de investigación relacionada al agrietamiento superficial en relaves mineros. Investigaciones destacadas en esta área han sido desarrolladas por Fujiyasu et al. (2000) y Simms et al. (2007), quienes se enfocaron en el estudio de las tasas de evaporación de relaves en depósitos ubicados en el estado de Western Australia (WA) en Australia, y en el distrito de Kahama en Tanzania, respectivamente. En ambos casos el foco de la investigación fueron las tasas de evaporación y los procesos con que se relacionan. Sin embargo, no fue considerado en sus estudios el agrietamiento superficial que sufren los relaves. Dado lo anterior, ambas investigaciones constituyen un buen punto de partida para el estudio de la desecación de relaves chilenos en terreno.

Apéndice A

PUBLICACIONES GENERADAS

Las siguientes publicaciones han sido derivadas a partir del desarrollo de la investigación de esta tesis.

Conferencias Internacionales

[1] E. Arredondo, V. Araya, G. Suazo, "Surface Cracking in Thickened Tailings: Mechanisms and its Influence on Evaporation and Water Content", en Proc. Paste 2020: 23rd International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings, Gecamin Publications, Santiago 2020, pp. 325-334, DOI: https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2052_103.

Conferencias Nacionales

[1] E. Arredondo, G. Suazo, V. Araya, "Estudio del Comportamiento Post-Depositación de Relaves Mediante el Procesamiento Digital de Imágenes y Ensayos de Desecación en Laboratorio," en XI Congreso Chileno de Geotecnia (SOCHIGE) 2021.

Apéndice B

CÓDIGOS DE COMUNICACIÓN EN PYTHON

```
// ---------------------------------------------------------------------------
// Descripción: Código de Registro de Temperatura y Humedad Ambiental con Sensores DHT22
// ---------------------------------------------------------------------------

// ---------------------------------------------------------------------------
// Code modified from 'http://www.home-automation-community.com/' by EA (2019).

//install dependency with 'sudo easy_install apscheduler' NOT with 'sudo pip install apscheduler'
import os, sys, Adafruit_DHT, time
from datetime import datetime, date, timedelta
from apscheduler.schedulers.background import BackgroundScheduler
import logging
logging.basicConfig()

sensor_1                    = Adafruit_DHT.AM2302 #DHT11/DHT22/AM2302
pin_1                       = 17
sensor_2                    = Adafruit_DHT.AM2302
pin_2                       = 4
sensor_3                    = Adafruit_DHT.AM2302
pin_3                       = 25
sensor_name                 = "Sensores"
hist_temperature_file_path  = "sensor-values/Nuevo/temperature_" + sensor_name + "_log_" + str(date.today().year) + ".csv"
hist_humidity_file_path     = "sensor-values/Nuevo/humidity_" + sensor_name + "_log_" + str(date.today().year) + ".csv"

date_width                  = 20
val_width                   = 10
csv_entry_format            = "{: >{date_width}}, {:>{date_width}}, {:>{val_width}}, {:>{val_width}}, {:>{val_width}}\n"
csv_date_format             = "{:%Y-%m-%d %H:%M:%S}"
```

```
29 csv_header_temperature       = csv_entry_format.format("T_ini", "T_fin", "
       Temp S1", "Temp S2", "Temp S3", date_width = date_width, val_width =
       val_width)
30 csv_header_humidity          = csv_entry_format.format("T_ini", "T_fin", "Hum
        S1", "Hum S2", "Hum S3", date_width = date_width, val_width = val_width)
31
32 // Periodo de medicion de variables
33 sec_between_log_entries      = 60
34 latest_humidity_1            = 0.0
35 latest_humidity_2            = 0.0
36 latest_humidity_3            = 0.0
37 latest_temperature_1         = 0.0
38 latest_temperature_2         = 0.0
39 latest_temperature_3         = 0.0
40 latest_value_datetime        = None
41
42 // Numero de intentos para medir
43 reintentos                   = 5
44 // Retardo entre reintentos
45 tiempo_reintento             = 0.5
46 // Periodo de guardado de datos de RAM a SD
47 flush_time                   = 300
48 // Contador de datos tomados
49 contador                     = 0
50
51
52 def write_header(file_handle, csv_header):
53   file_handle.write(csv_header)
54
55 def write_value(file_handle, date_ini, date_fin, value_1, value_2, value_3):
56
57   if value_1 is None:
58       value_1 = "Error"
59   else:
60       value_1 = "{:0.1f}".format(value_1)
61
62   if value_2 is None:
63       value_2 = "Error"
64   else:
65       value_2 = "{:0.1f}".format(value_2)
66
67   if value_3 is None:
68       value_3 = "Error"
69   else:
70       value_3 = "{:0.1f}".format(value_3)
71
72
73   date_ini = csv_date_format.format(date_ini)
74   date_fin = csv_date_format.format(date_fin)
75   line = csv_entry_format.format(date_ini, date_fin, value_1, value_2,
       value_3, date_width = date_width, val_width = val_width)
76
77   file_handle.write(line)
78   //file_handle.flush()
79
80 def open_file_ensure_header(file_path, mode, csv_header):
81   f = open(file_path, mode, os.O_NONBLOCK)
82   if os.path.getsize(file_path) <= 0:
83     write_header(f, csv_header)
84   return f
```

```
85
86 f_hist_temp = open_file_ensure_header(hist_temperature_file_path, 'a',
       csv_header_temperature)
87 f_hist_hum  = open_file_ensure_header(hist_humidity_file_path, 'a',
       csv_header_humidity)
88
89 def write_hist_value_callback():
90     global contador
91     contador = contador + 1
92     print("Datos almacenados: {0}".format(contador))
93     date_ini = datetime.today()
94     // Medicion sensor 1
95     hum_1, temp_1 = Adafruit_DHT.read_retry(sensor_1, pin_1, retries=
       reintentos, delay_seconds=tiempo_reintento)
96     if hum_1 is None:
97         print("Error sensor 1")
98
99     // Medicion sensor 2
100    hum_2, temp_2 = Adafruit_DHT.read_retry(sensor_2, pin_2, retries=
       reintentos, delay_seconds=tiempo_reintento)
101    if hum_2 is None:
102        print("Error sensor 2")
103
104    // Medicion sensor 3
105    hum_3, temp_3 = Adafruit_DHT.read_retry(sensor_3, pin_3, retries=
       reintentos, delay_seconds=tiempo_reintento)
106    if hum_3 is None:
107        print("Error sensor 3")
108
109    date_fin = datetime.today()
110
111    write_value(f_hist_temp, date_ini, date_fin, temp_1, temp_2, temp_3)
112    write_value(f_hist_hum, date_ini, date_fin, hum_1, hum_2, hum_3)
113
114
115 print("Ignoring first 2 sensor values to improve quality...")
116 for x in range(2):
117   Adafruit_DHT.read_retry(sensor_1, pin_1, retries=reintentos, delay_seconds=
       tiempo_reintento)
118   Adafruit_DHT.read_retry(sensor_2, pin_2, retries=reintentos, delay_seconds=
       tiempo_reintento)
119   Adafruit_DHT.read_retry(sensor_3, pin_3, retries=reintentos, delay_seconds=
       tiempo_reintento)
120
121 print("Creating interval timer. This step takes almost 2 minutes on the
       Raspberry Pi...")
122 //create timer that is called every n seconds, without accumulating delays as
        when using sleep
123 scheduler = BackgroundScheduler()
124 scheduler.add_job(write_hist_value_callback, 'interval', seconds=
       sec_between_log_entries, misfire_grace_time=None, next_run_time=(datetime.
       now()+timedelta(seconds=2))  )
125 print("Inicializando")
126 scheduler.start()
127 print("Started interval timer which will be called the first time in {0}
       seconds.".format(sec_between_log_entries))
128
129 try:
130   while True:
131     time.sleep(flush_time)
```

```
132     f_hist_temp.flush()
133     f_hist_hum.flush()
134     #pass
135
136 except (KeyboardInterrupt, SystemExit):
137   print("Deteniendo proceso de medicion...")
138   scheduler.shutdown()
139   f_hist_temp.close()
140   f_hist_hum.close()
141   print("Proceso de medicion detenido")
142
143
144
145
146 // ------------------------------------------------------------------------
```

```
1  // ------------------------------------------------------------------------
2  // Descripción: Código para Toma de Fotografías
3  // ------------------------------------------------------------------------
4
5  // ------------------------------------------------------------------------
6  //!/bin/bash
7
8  //------------------------------------------------------------------------
9  // Generar Carpetas
10 //------------------------------------------------------------------------
11
12 // Revisar exixtencia de carpeta
13 if [ ! -d "IRL_ILU" ]; then
14   mkdir "IRL_ILU"
15 fi
16
17 if [ ! -d "NON_ILU" ]; then
18   mkdir "NON_ILU"
19 fi
20
21 //------------------------------------------------------------------------
22 // Route
23 //------------------------------------------------------------------------
24 route=11
25
26 //------------------------------------------------------------------------
27 // Loop de Control
28 //------------------------------------------------------------------------
29 //Tiempo Inicial
30 tini=$(date +%s)
31 //Loop de medicion
32 tmed=60 #60 min
33 //Loop total
34 ttot=180 #3 dia
35 //Tiempo actual
36 tact=0
37 //Tiempo en el loop
38 tlop=$(($tmed + 1))
39 //Tiempo inicial de loop
40 tilop=$tini
41
42 cont=$(cat conta.txt)
```

```
43 echo $cont
44
45 while (("$tact" < "$ttot")); do
46    #Posicionamiento y toma de imagenes
47    if (("$tlop" >= "$tmed"))
48    then
49       #Nombre Archivo
50       name=$(echo s$cont)
51       aux=$(date)
52       echo s$cont,$aux >> time_data.txt
53
54       //Actualizar archivo de conteo a camara NIR
55       sshpass -p Vraspberry. scp /home/pi/conta.txt pi@192.168.11.161:/home/
     pi/00_NIR/
56       //Actualizar archivo de conteo a camara VIS
57       $(cp /home/pi/conta.txt /home/pi/00_VIS)
58       //=============================================================
59       // Imagenes IRL
60       //=============================================================
61       // Posicionar Laser ..........................
62       echo "_____________________________________________________"
63       echo "Laser IRL ..."
64       // Captura RAW Imagen ..........................
65       //echo " RAW capturando..."
66       //{
67       //sshpass -p Vraspberry. ssh pi@192.168.$route.160 'python /home/pi/00
     _VIS/g_image_RAW.py L' &
68       //sshpass -p Vraspberry. ssh pi@192.168.$route.161 'python /home/pi/00
     _NIR/g_image_RAW.py L'
69       //wait
70       //} > /dev/null #hide output
71       // Captura fix1 Imagen ..........................
72       echo " fix1 capturando..."
73       $(python /home/pi/00_VIS/int_image.py 1 L)
74       // Captura fix2 Imagen ..........................
75       echo " fix2 capturando..."
76       $(python /home/pi/00_VIS/int_image.py 2 L)
77       // Captura fix3 Imagen ..........................
78       echo " fix3 capturando..."
79       $(python /home/pi/00_VIS/int_image.py 3 L)
80       // Captura auto Imagen ..........................
81       echo " auto capturando..."
82       $(python /home/pi/00_VIS/int_image.py 4 L)
83       // Mover Imagenes a carpeta .....................
84       echo -n "Moviendo Archivos..."
85       $(mv /home/pi/00_VIS/VIS* /home/pi/00_VIS/IRL_ILU/)
86       sshpass -p Vraspberry. ssh pi@192.168.$route.161 'mv /home/pi/00_NIR/
     NIR* /home/pi/00_NIR/IRL_ILU/'
87       //wait
88       echo "OK"
89
90       //=============================================================
91       // None Ilimunacion
92       //=============================================================
93       // Posicionar Laser ..........................
94       echo "_____________________________________________________"
95       echo "Posicionando Laser None ..."
96       // Captura RAW Imagen ..........................
97       //echo " RAW capturando..."
98       //{
```

```
99        //sshpass -p Vraspberry. ssh pi@192.168.$route.160 'python /home/pi/00
      _VIS/g_image_RAW.py N' &
100       //sshpass -p Vraspberry. ssh pi@192.168.$route.161 'python /home/pi/00
      _NIR/g_image_RAW.py N'
101       //wait
102       //} > /dev/null #hide output
103       // Captura fix1 Imagen ..........................
104       echo " fix1 capturando..."
105       $(python /home/pi/00_VIS/int_image.py 1 N)
106       // Captura fix2 Imagen ..........................
107       echo " fix2 capturando..."
108       $(python /home/pi/00_VIS/int_image.py 2 N)
109       // Captura fix3 Imagen ..........................
110       echo " fix3 capturando..."
111       $(python /home/pi/00_VIS/int_image.py 3 N)
112       // Captura auto Imagen ..........................
113       echo " auto capturando..."
114       $(python /home/pi/00_VIS/int_image.py 4 N)
115       // Mover Imagenes a carpeta .....................
116       echo -n "Moviendo Archivos..."
117       //{
118       $(mv /home/pi/00_VIS/VIS* /home/pi/00_VIS/NON_ILU/)
119       sshpass -p Vraspberry. ssh pi@192.168.$route.161 'mv /home/pi/00_NIR/
      NIR* /home/pi/00_NIR/NON_ILU/'
120       //wait
121       //} > /dev/null #hide output
122       echo "OK"
123
124       //=============================================================
125       // Actualizar
126       //=============================================================
127       //Tiempo inicial de loop
128       tilop=$(date +%s)
129       tlop=0
130
131
132       //Linea de ayuda
133       echo " "
134       cont=$(( $cont + 1 ))
135       //Actualizar contador
136       echo $cont > conta.txt
137   fi
138
139   echo -en "\e[1A";
140   echo -e "\e[0K\r Esperando siguiente Loop... " $tlop " de" $tmed
141
142   tact=$(($(date +%s) - $tini))
143   tlop=$(($(date +%s) - $tilop))
144
145 done
146
147 //Actualizar contador
148 echo $cont > conta.txt
```

Apéndice C

CÓDIGO RUTINAS EN IMAGEJ

```
// ------------------------------------------------------------------
// Descripción: Ejemplo Rutina de Procesamiento Digital de Imágenes Implementada en ImageJ
// ------------------------------------------------------------------

// ------------------------------------------------------------------
// Esta macro procesa todas las imágenes almacenadas en una determinada carpeta y subcarpeta.
// Esta macro obtiene el índice I en .txt de todas las imágenes en la carpeta seleccionada
// Está ajustada para la bandeja 4 del ensayo de secado con material MR2-16 - espesor = 6.4 mm. CS=60%

  extension = ".jpg";
  dir1 = getDirectory("Choose Source Directory ");
  dir2 = getDirectory("Choose Destination Directory ");
  setBatchMode(true);
  n = 0;
  processFolder(dir1);

  function processFolder(dir1) {
     list = getFileList(dir1);
     for (i=0; i<list.length; i++) {
          if (endsWith(list[i], "/"))
              processFolder(dir1+list[i]);
          else if (endsWith(list[i], extension))
             processImage(dir1, list[i]);
      }
  }

  function processImage(dir1, name) {
     open(dir1+name);
     print(n++, name);

//macro "Prueba12" {open();
  run("8-bit");
  rename("Bandeja_1_8bit");
```

```
34
35  div = 16;
36  ancho=getWidth();
37  alto=getHeight();
38  a=ancho/div;
39  b=alto/div;
40  x1=0;
41  x2=a;
42  y1=b;
43  y2=0;
44  numcuadrado=0;
45
46  //Las siguientes líneas eliminan el ruido superficial, que no es
      agrietamiento (descascaramiento, manchas producto de la iluminación, etc)
47  for(u=x1;u<ancho; u+=a){
48  for(v=y2;v<alto; v+=b){
49    makeRectangle(u,v,a,b);
50      xmax=u+a;
51      ymax=v+b;
52      for(x=u;x<xmax;x++){
53      for(y=v;y<ymax;y++){
54        test=getPixel(x,y);
55      if(test<=130){setPixel(x,y,40);}
56      }}
57  }}
58  makeRectangle(0, 0, ancho, alto);
59  //Fin lineas descascaramiento
60
61
62
63  run("Bandpass Filter...", "filter_large=10 filter_small=0 suppress=None
      tolerance=5 saturate");
64
65
66  run("Auto Local Threshold...", "method=Median radius=25 parameter_1=5
      parameter_2=0");
67
68  run("Despeckle");
69
70  run("Despeckle");
71
72  run("Morphological Filters", "operation=Closing element=Square radius=3");
73
74  run("Directional Filtering", "type=Max operation=Median line=10 direction
      =15");
75
76  if (isOpen("Log")) {
77    selectWindow("Log");
78    run("Close");
79  }
80
81  c=800;
82  for(i=100;i<=c;i++){
83    p=ancho/2-i/2;
84    q=alto/2-i/2;
85    makeRectangle(p,q,i-15,i);
86    getHistogram(values, counts, 256);
87    Array.getStatistics(counts, min, max, mean, stdDev);
88    for(j=0; j < lengthOf(counts); j+=255){
89      if(j==0){negro=counts[j];}
```

```
90          if(j==255){blanco=counts[j];}
91        }
92        pixeles=newArray(i, negro, blanco);
93        Array.print(pixeles);
94      }
95
96      selectWindow("Log");
97          saveAs("Text", dir2+name);
98
99      if (isOpen("Log")) {
100       selectWindow("Log");
101       run("Close");
102     }
103
104       close();
105     }
106
107 // ------------------------------------------------------------------------
```

Referencias

Aachib, M., Mbonimpa, M., and Aubertin, M. (2004). Measurement and prediction of the oxygen diffusion coefficient in unsaturated media, with applications to soil covers. *Water, Air, and Soil Pollution*, 156:163–193.

Abramoff, M. D., Magalhes, P. J., and Ram, S. J. (2004). Image Processing with ImageJ. *Biophotonics International*, 11(7):36–42.

Abu-Hejleh, A. N. and Znidarcic, D. (1995). Desiccation theory for soft cohesive soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(6):493–502.

Blight, G. E. (1988). Some less familiar aspects of hydraulic fill structures. *Hydraulic Fill Structures, ASCE Geotechnical Special Publication*, (21):1000–1027.

Blight, G. E. (1994). The master profile for hydraulic fill tailings beaches. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering*, 107(1):27–40.

Bronswijk, J. (1988). Modeling of water balance, cracking and subsidence of clay soils. *Journal of Hydrology*, 97(3):199–212.

Bronswijk, J. J. B. (1991). Relation between Vertical Soil Movements and Water-Content Changes in Cracking Clays. *Soil Science Society of America Journal*, 55(5):1220–1226.

Carpenter, A., Jones, T., Lamprecht, M., Clarke, C., Kang, I., Friman, O., Guertin, D., Chang, J., Lindquist, R., Moffat, J., Golland, P., and Sabatini, D. (2006). Cellprofiler: Image analysis software for identifying and quantifying cell phenotypes. *Genome biology*, 7:R100.

Consejo Minero, . (2021). *Minería en Números*. Consejo Minero, 104 p. Santiago., 5ta edition.

Daliri, F., Simms, P., and Sivathayalan, S. (2016). Shear and dewatering behaviour of high density gold tailings in a laboratory simulation of multi-layer deposition. *Canadian Geotechnical Journal*, 53.

Decreto Supremo 248, . (2007). *Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves*. Ministerio de Minería.

Díaz de Greu de Pedro, J. (2014). Análisis matemático de rutinas de procesamiento de imágenes digitales en Fiji/ImageJ. Facultad de ciencias, estudios agroalimentarios e informática., Universidad de La Rioja.

Dirección de Estudios y Políticas Públicas, . (2020). *Consumo de agua en la minería del cobre al 2019*. Dirección de Estudios y Políticas Públicas.

Doube, M., Kłosowski, M. M., Arganda-Carreras, I., Cordelières, F. P., Dougherty, R. P., Jackson, J. S., Schmid, B., Hutchinson, J. R., and Shefelbine, S. J. (2010). Bonej: free and extensible bone image analysis in imagej. *Bone*, 47(6):1076–1079.

Drumm, E., Boles, D., and Wilson, G. (1997). Desiccation Cracks Result in Preferential Flow. *Geotechnical News*, 15:22–25.

Ferreira, T. and Rasband, W. (2012). *User Guide ImageJ. ImageJ/Fiji 1.46*.

Ferrer, G. (2011). Estudio del comportamiento sísmico de relaves espesados mediante el análisis de columna unidimensional, considerando grietas de contracción. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica. Pontificia Universidad Católica de Chile.

Fisseha, B., Bryan, R., and Simms, P. (2010). Evaporation, unsaturated flow, and salt accumulation in multilayer deposits of "paste"gold tailings. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering - J GEOTECH GEOENVIRON ENG*, 136:1703–1712.

Fredlund, D. and Rahardjo, H. (1993). An overview of unsaturated soil behaviour. In *ASCE Specialty Series on Unsaturated Soil Properties*.

Fredlund, D. and Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4):521–532.

Fredlund, M. (2000). The role of unsaturated role property functions in the practice of unsaturated soil mechanics. Phd thesis, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Canada.

Fujiyasu, Y. and Fahey, M. (2000). Experimental study of evaporation from saline tailings. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering - J GEOTECH GEOENVIRON ENG*, 126:18–27.

Fujiyasu, Y., Fahey, M., and Newson, T. (2000). Field investigation of evaporation from freshwater tailings. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(6):556–567.

Gonzalez, R. C. and Woods, R. E. (2008). *Digital Image Processing*. Pearson Education, Inc, Third edition.

Hurtado, O. (2018). Desiccation and consolidation in centrifuge cake oil sands tailings. Master tesis, Carleton University, Environmental Engineering.

ICOLD 121, . (2001). *Tailings Dams Risk of Dangerous Occurrences - Lessons learnt from practical experiences*. International Commission on Large Dams, 144 p. Paris.

Innocent-Berdard, T. (2013). Evaporation, cracking, and salinity in a thickened oil sands tailings. Master thesis, Departmen of Civil and Environmental Engineering, Carleton University.

Konrad, J. M. and Ayad, R. (1997). A idealized framework for the analysis of cohesive soils undergoing desiccation. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(4):477–488.

Lakshmikantha, M., Prat, P., and Ledesma, A. (2006). An experimental study of cracking mechanisms in drying soils. *5th ICEG Environmental Geotechnics: Opportunities, Challenges and Responsibilities for Environmental Geotechnics*, pages 533–540.

Lakshmikantha, M. R., Prat, P., and Ledesma, A. (2009). Image analysis for the quantification of a developing crack network on a drying soil. *Geotechnical Testing Journal - GEOTECH TESTING J*, 32:505–515.

Lakshmikantha, M. R., Prat, P., and Ledesma, A. (2012). Experimental evidence of size effect in soil cracking. *Canadian Geotechnical Journal*, 49:264–284.

Landini, G. (2018a). Auto local threshold.

Landini, G. (2018b). Auto threshold.

Legland, D., Arganda-Carreras, I., and Andrey, P. (2016). Morpholibj: integrated library and plugins for mathematical morphology with imagej. *Bioinformatics*, 32:3532–3534.

Miller, C. J., Mi, H., and Yesiller, N. (1998). Experimental analysis of desiccation crack propagation in clay liners. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(3):677–686.

Morris, P., Graham, J., and Williams, D. (1992). Cracking in drying soils. *Canadian Geotechnical Journal - CAN GEOTECH J*, 29:263–277.

Musso, J. (2018). Determinación de la curva de retención de agua para relaves multimetálicos de la industria minera de chile. Tesis, Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso.

Oldecop, L. and Pacheco, R. L. (2007). Liquefacción de los relaves mineros. riesgo ambiental.

Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1):62–66.

Pacheco, R. L. and Oldecop, L. (2011). Humedad y estabilidad geotécnica de presas de relaves.

Qi, S. and Simms, P. (2018). Analysis of dewatering and desaturation of generic field deposition scenarios for thickened tailings. In Jewell, R. and Fourie, A., editors, *Proceedings of the 21st International Seminar on Paste and Thickened Tailings*, pages 401–412. Australian Centre for Geomechanics.

Robinsky, E. (1999). *Thickened Tailings Disposal in the Mining Industry*. E.I. Robinsky Associates.

Rodríguez, R. (2019). Static liquefaction in tailings dam and flow failure. *Seminario Riesgos Geotécnicos, España 2018*.

Rodríguez, R. L., Sánchez, M., Ledesma, A., and Lloret, A. (2007). Experimental and numerical analysis of desiccation of a mining waste. *Canadian Geotechnical Journal*, 44:644–658.

Rodriguez, R. (2002). Estudio experimental de flujo y transporte de cromo, níquel y manganeso en residuos de la zona minera de Moa (Cuba): Influencia del comportamiento hidromecánico. Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartografía. Universidad Politécnica de Cataluña.

Rodríguez, R., Oldecop, L., Linares, R., and Salvadó, V. (2009). Los grandes desastres medioambientales producidos por la actividad minerometalúrgica a nivel mundial causas y consecuencias ecológicas y sociales. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 12(24):7–25.

Rodriguez, R. L. (2006). Hydrogeotechnical characterization of a metallurgical waste. *Canadian Geotechnical Journal*, 43:1042.

Rodriguez, R. L., Candela, L., and Lloret, A. (2004). Experimental system for studying the hydromechanical behavior of porous media. *Vadose Zone Journal - VADOSE ZONE J*, 4:345.

Schneider, C., Rasband, W., and Eliceiri, K. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, 9(7):671–675.

Senior, R. B. (1981). Tensile strength, tension cracks, and stability of slopes. *Soils and Foundations*, 21(2):1–17.

Serra, A. (2017). Patrones de agrietamiento de suelos debido a ciclos de humectación. Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental, Escola de Camins.

Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), . (2021). *Anuario de la Minería de Chile 2020*. Servicio Nacional de Geología y Minería, 271 p. Santiago.

Simms, P. (2017). 2013 Colloquium of the Canadian Geotechnical Society: Geotechnical and Geoenvironmental behaviour of high-density tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, 54(4):455–468.

Simms, P. (2021). The role of unsaturated soil mechanics in unconventional tailings deposition. *Soils and Rocks*, 44(3).

Simms, P., Dunmola, A., and Fisseha, B. (2009). Generic predictions of drying time in surface deposited thickened tailings in a "wet" climate. In *Tailings and Mine Waste*, pages 749–758.

Simms, P., Grabinsky, M., and Zhan, G. (2007). Modelling evaporation of paste tailings from the bulyanhulu mine. *Canadian Geotechnical Journal*, 44:1417–1432.

Solomon, C. and Breckon, T. (2011). *Fundamentals of Digital Image Processing: A Practical Approach with Examples in Matlab*. Wiley Blackwell.

Suazo, G., Fourie, A., and Doherty, J. (2016). Experimental study of the evolution of the soil water retention curve for granular material undergoing cement hydration. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142:04016022.

Vick, S. G. (1990). *Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams*. BiTech Publishers Ltd.

Ávila, G. (2004). Estudio de la retracción y el agrietamiento de arcillas. aplicación a la arcilla de bogotá. Tesis doctoral, Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartografía y Geofísica. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Vogel, H.-J., Hoffmann, H., and Roth, K. (2005). Studies of crack dynamics in clay soil. I. Experimental methods, results and morphological quantification. *Geoderma*, 125:203–211.

Watson, A., Corser, P., Garces Pardo, E., Lopez Christian, T., and Vandekeybus, J. (2010). A comparison of alternative tailings disposal methods - the promises and realities. In Jewell, R. and Fourie, A., editors, *Mine Waste 2010: Proceedings of the First International Seminar on the Reduction of Risk in the Management of Tailings and Mine Waste*, pages 499–514. Australian Centre for Geomechanics.

Wills, B. A. (2006). *Wills' Mineral Processing Technology*. Butterworth-Heinemann, Oxford, seventh edition edition.

Wilson, G., Fredlund, D., and Barbour, S. (1997). The effect of soil suction on evaporative fluxes from soil surfaces. *Canadian Geotechnical Journal - CAN GEOTECH J*, 34:145–155.

Yesiller, N., Miller, C., Inci, G., and Yaldo, K. (2000). Desiccation and cracking behavior of three compacted landfill liner soils. *Engineering Geology*, 57(1):105–121.

Zandarín, M. T., Oldecop, L. A., Rodríguez, R., and Zabala, F. (2009). The role of capillary water in the stability of tailing dams. *Engineering Geology*, 105(1):108–118.

Zhang, F., Wilson, G. W., and Fredlund, D. (2018). Permeability function for oil sands tailings undergoing volume change during drying. *Canadian Geotechnical Journal*, 55(2):191–207.