

Estudio de la relación entre la reflexión de luz y el contenido de humedad superficial en muestras de relave utilizando imágenes hiperespectrales

Research of relationship between light reflectance and surface moisture content in tailings samples using hyperspectral images

Fecha de entrega: 19 de enero 2022

Fecha de aceptación: 5 de abril 2022

Monserrat Sánchez¹, Gonzalo Suazo¹, Víctor Araya¹ y Gabriel Villavicencio²

¹Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Avenida España 1680, Valparaíso, Chile, mo.sanchez.oyarzun@gmail.com, gonzalo.suazo@usm.cl, varaya.nieto@gmail.com

²Grupo de Geotecnia, Escuela de Ingeniería en Construcción, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Avenida Brasil #2147, Valparaíso, Chile, gabriel.villavicencio@pucv.cl

Para un adecuado manejo de depósitos de relaves, es necesario monitorear diversas variables, tales como la humedad, la cual influye en fenómenos de estabilidad tanto física como química. Actualmente, no existen controles continuos de humedad dado los peligros asociados a la toma de muestras en cubetas de relaves, generalmente en estados de baja densidad, dificultando el acceso a los depósitos. Dado el surgimiento de tecnologías de procesamientos de imágenes y el uso exitoso en monitoreo de variables de interés en áreas como la hidrología y agricultura, es que esta investigación utiliza imágenes hiperespectrales para la estimación de humedad superficial en depósitos de relaves. Para ello, se utilizan muestras de relave de cobre y hierro, las cuales son sometidas a iluminación activa a través de un láser de 980 nm y monitoreadas en un proceso de disecación en el rango de humedad de saturación hasta el estado seco, incluyendo la influencia de densidad y contenido de finos. Los resultados muestran una relación parabólica entre la humedad y la reflexión de luz, lo que sumado a uso del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), permiten estimar el contenido de humedad superficial de las probetas, generando un método auspicioso para el monitoreo continuo de humedad en depósitos de relaves.

Palabras clave: imágenes hiperespectrales, contenido de humedad, depósitos de relaves, NDVI

Proper tailings storage facilities (TSF) management can be done by monitoring various variables, such as moisture, which influences at physical and chemical stability phenomena. Nowadays, there are no continuous moisture controls due to the dangers associated with taking samples in tailings, generally in low-density states, making access difficult. Due to the recent hyperspectral imaging technologies and the successful use in monitoring interest variables (moisture, fines content, mineralogy) in areas such as hydrology and agriculture, therefore, this research uses hyperspectral images to estimate surface moisture in TSF using copper and iron tailings samples, which are subjected to active illumination from a 980 nm laser and monitored in a desiccation process in the moisture range from saturation to dry state, including density and fine content effects. Results show a parabolic relationship between moisture and light reflection, which, added to the use of the normalized difference vegetation index (NDVI), allow estimating the surface samples moisture content, generating an auspicious method for the continuous monitoring of humidity in TSF.

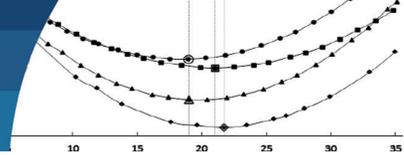
Keywords: hypespectral imaging, moisture content, tailings storage facilities, NDVI

Introducción

Los depósitos de relave corresponden a mega estructuras que almacenan desechos provenientes de la extracción minera, los que debido a la constante demanda de minerales y la reducción de leyes de extracción, han generado una tendencia al aumento de la dimensión de los depósitos

(Valenzuela, 2016), por lo que la evaluación de parámetros necesarios para la operación y análisis de estabilidad del mismo, se complejizan.

Uno de los parámetros necesarios a controlar es el contenido de humedad ya que influye en aspectos tanto



operacionales como de estabilidad. Por ejemplo, en el caso de relaves espesados, conocer el contenido de humedad permite: determinar el momento en el que se debe depositar la siguiente capa de relave al alcanzar el límite de contracción (Simms *et al.*, 2010) e identificar la capacidad de escurrimiento del relave, la cual se verá afectada por los cambios de humedad y características del depósito (Che *et al.*, 2018). Respecto a lo mismo, estimar el contenido de humedad permite conocer la tasa de evaporación del depósito, la cual depende del rango de humedad en el que se encuentre el suelo, lo que influirá directamente en los procesos de contracción (Simms *et al.*, 2010). Por otro lado, la estimación de la humedad permite conocer la permeabilidad en suelos, la cual será mínima cuando la humedad sea cercana a la óptima de compactación (Wright *et al.*, 1996). Además, conocer la humedad permite evitar la oxidación de sulfuros y por tanto el drenaje ácido, el cual es generado a un nivel de saturación parcial en relaves (Changul *et al.*, 2010). Adicionalmente, estimar la humedad permite evaluar la resistencia cíclica en relaves, la cual es máxima hasta un grado de saturación cercano al 70%, reduciéndose paulatinamente con el aumento del grado de saturación, decayendo bruscamente al 95% de saturación (Tsukamoto *et al.*, 2014).

Hoy en día, los métodos usuales de control de humedad en depósitos de relave son periódicos mediante líneas piezométricas y mediciones en laboratorio a través de muestras de terreno, los cuales entregan información puntual, espacial y temporalmente (Tschuschke *et al.*, 2020). Entonces, dada la importancia de la humedad en depósitos de relave, es que surge el desafío de implementar nuevas tecnologías que permitan agilizar los procesos de monitoreo. Frente a esto, el uso de procesamiento de imágenes y sensores de luz para la medición de reflexión de luz, es una técnica reciente que ha mostrado resultados auspiciosos en monitoreo de humedad en suelos en áreas como la agricultura (Hassan-Esfahani *et al.*, 2015) y la hidrología (Sadeghi *et al.*, 2015a).

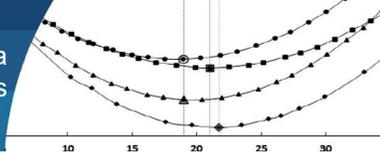
Uno de los primeros acercamientos en el uso de esta tecnología fue en laboratorio, realizado por Dalal y Henry (1986), en donde se utilizaron espectrómetros en el rango cercano al infrarrojo NIR (1100 nm – 2500 nm) (*near infrared*) para estimar la humedad en probetas de suelos a través de la medición de la reflexión de luz, evidenciando

que la relación se ve influenciada por la granulometría, el color de las muestras y el contenido de carbono. Por otro lado, en la última década, se ha evidenciado, para mediciones de longitudes de onda entre 1650 nm y 2210 nm, una relación lineal entre la reflexión de luz y el contenido de humedad superficial en muestras de suelos, la cual disminuye la linealidad con el aumento del contenido de arcilla (Sadeghi *et al.*, 2015a). Esta relación ha sido usada para hallar curvas de succión de suelos (Babaeian *et al.*, 2017), para la creación de perfiles de infiltración en suelos (Sadeghi *et al.*, 2017) y estimación de tasas de evaporación (Babaeian *et al.*, 2019).

Pese a lo anterior, el uso de imágenes hiperespectrales en el monitoreo de variables de interés en el manejo de depósitos de relaves es bastante acotada, encontrándose estudios asociados al monitoreo de humedad en relaves provenientes de la extracción de petróleo (Entezari *et al.*, 2013), y más reciente en minería metálica (Araya *et al.*, 2019), estudio llevado a cabo en laboratorio, el cual hace uso de imágenes multispectrales para monitorear el proceso de disecación de probetas de relave de cobre, hallando una relación parabólica entre la humedad superficial y la reflexión de luz, la cual es aplicada en terreno en conjunto con el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para estimar el contenido de humedad superficial, entregando buenos resultados.

Con el fin de fortalecer el estudio realizado por Araya, se continúa su investigación, considerando la variabilidad material y temporal que presentan los relaves (Villavicencio *et al.*, 2011), incluyendo efectos de variables tales como la granulometría y la densidad en la relación entre la reflexión de luz y el contenido de humedad superficial.

Este trabajo presenta resultados obtenidos desde una serie de ensayos en laboratorio en donde se sigue un procedimiento similar al de Araya, en el cual se estimula con iluminación artificial proveniente de láser de 980 nm a probetas de relave de hierro preparadas a un 100% de saturación, las cuales son monitoreadas con cámaras hiperespectrales en el rango NIR y VIS (visible), midiendo la reflexión de luz generada en el proceso de disecación. Los ensayos se realizan a distintos niveles de densidad y contenido de finos. De esta forma se incluyen en la relación efectos de parámetros variables en terreno controlando en mayor rango la relación.



Fundamento teórico

El sol emite radiación en todo el espectro electromagnético, la cual posee una intensidad que depende de la longitud de onda λ , la que, al entrar en contacto con una superficie, refleja una intensidad espectral en función del tipo de material y características de la superficie, situación representada en la Figura 1, donde se observa esquemáticamente la diferencia entre dos materiales.

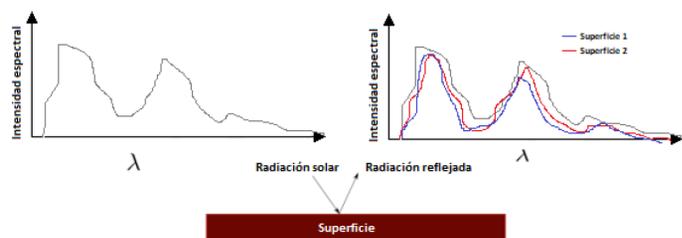


Figura 1: Esquema de función de intensidad espectral de radiación solar y la respuesta de reflexión para dos superficies distintas

Esto permite definir al material como un filtro de radiación incidente, por lo que es posible encontrar una relación entre las características de la intensidad espectral y las características de la superficie incidente. Esto a través de sensores que captan la luz reflejada, los cuales filtran la luz, dejando pasar solo una parte del espectro. Por ejemplo, el ojo humano solo permite captar el espectro visible de la luz solar a pesar de que está siendo estimulado por todo el espectro electromagnético.

Uno de los filtros más comúnmente utilizados son filtros de Bayer, el cual separa la luz en canales rojo, verde y azul, para posteriormente dirigir cada uno de estos canales hacia un set de píxeles en la configuración de los sensor 1 mostrado en Figura 2. Una cámara multispectral posee uno o varios sensores con diferentes características de

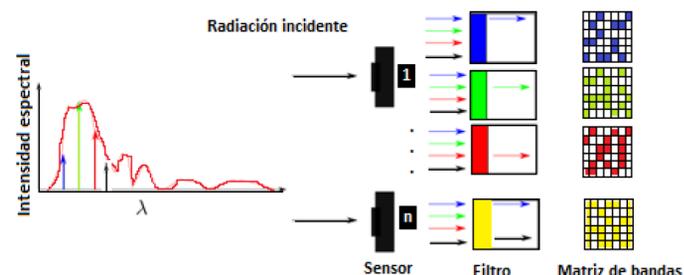


Figura 2: Esquema de funcionamiento de cámara multispectral

filtrado, situación presentada esquemáticamente en Figura 2, de modo de capturar la intensidad espectral por bandas, lo que se traduce en tener varios canales de almacenamiento, los que comúnmente son 6 (Brauers y Aach, 2006), sin embargo se puede llegar a tener hasta 12 canales para este tipo de sensores.

La luz captada por sensores permite pasar a cada canal “c” según la función de transferencia que posee cada una de las bandas. Entonces, integrando la luz incidente $I_i(\lambda)$ en el espectro completo de longitud de onda y multiplicando por la función de transferencia de cada canal, se obtiene el valor “C” de intensidad para cada píxel de la imagen capturada, el cual se obtiene a partir de la expresión:

$$(C) = \int_{-\infty}^{\infty} I_i(\lambda)(c(\lambda))d\lambda \quad (1)$$

En suelos, la reflexión de luz depende de la estructura física del material, de la composición mineralógica, de las variables de estado, de la rugosidad de la superficie y de la longitud de onda de la luz incidente (Gondek *et al.*, 1994). Si en primera instancia se asumen constantes ciertas variables como la rugosidad, la mineralogía, granulometría, y la longitud de onda de estimulación, es posible hallar una relación entre la reflexión de luz y el contenido de humedad superficial de relaves, lo cual es presentado en el presente artículo.

Metodología

Los ensayos fueron realizados en el laboratorio de Geotecnia de la UTFSM, en donde se prepararon probetas de relave en moldes cilíndricos de 7.5 cm de diámetro y 2.3 cm de altura, con un contenido de humedad mayor a la saturación. Las muestras fueron monitoreadas por dos cámaras multispectrales, una para el rango espectral visible (VIS 400 a 700 nm), y otro en el rango cercano al infrarrojo (NIR 400 a 1100 nm), las que a la vez se les aplicó iluminación ambiental y activa proveniente de un láser de 980 nm, longitud de onda que permite trabajar en el rango estable de reflexión de luz en suelos para la medición de humedad (Thomasson *et al.*, 2001).

Las fotografías son tomadas en el proceso de disección de las muestras, las cuales fueron secadas en horno a intervalos regulares de 10 min a una temperatura de 100°C. La caracterización de los materiales utilizados se muestra en Tabla 1.

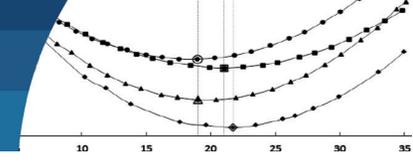


Tabla 1: Propiedades de los materiales empleados.

Muestra	Mineral	Clasificación ASTM	Contenido de finos, %	Peso específico G_s	Límite líquido LL, %	Límite plástico LP, %	Límite de contracción LC, %	Humedad de saturación, %
1	Hierro	CL	85	3.02	24.8	19.9	19.2	35.3
2	Cobre	ML	73	2.75	-	-	-	25.6

El láser y las cámaras son controlados por miniprocesadores Raspberry pi, los cuales fueron introducidos en una caja de control que apunta perpendicular a la superficie de las probetas, ubicadas a una distancia de 38 cm, como se muestra en Figura 3.

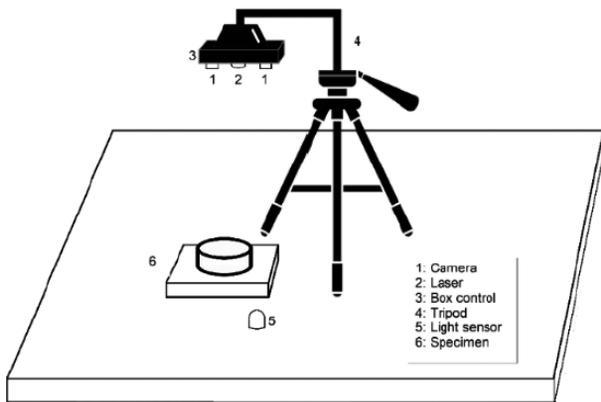


Figura 3: Esquema de trabajo

Una vez secadas las probetas, se extrajeron las imágenes, y fueron asociadas a contenidos de humedad calculado en cada intervalo de medición. Las imágenes fueron procesadas por códigos en el software Matlab, diseñados para extraer la intensidad de luz captada por cada imagen, desde el cual se obtuvo la intensidad normalizada ($I_{Ti}(C)$), y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), procedimiento que se detalla a continuación.

Para el procesamiento de imágenes se selecciona un tramo homogéneo de la imagen con un total de n píxeles. De este rectángulo se obtiene el índice de intensidad total espectral $I_{ti(NIR,VIS)}(C)$ para cada canal (R, G, B), correspondiente al promedio de intensidad de luz, como se muestra en expresión (2).

$$I_{ti(NIR,VIS)}(C) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n I_j(C) \quad (2)$$

Dado que las mediciones son realizadas a distintas horas del día, la intensidad de luz ambiental varía de una imagen a

otra. Para eliminar este efecto, la intensidad obtenida en la imagen NIR sin iluminación artificial $I_{ti(NIR)}(C)(NON\ LASER)$, es restada a la intensidad de luz obtenida en la imagen con iluminación artificial $I_{ti(NIR)}(C)(LASER)$, como se muestra en (3).

$$I_{ti}(C) = I_{ti(NIR)}(C)(LASER) - I_{ti(NIR)}(C)(NON - LASER) \quad (3)$$

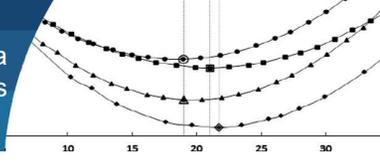
Para estandarizar los resultados, la intensidad de luz obtenida en cada medición $I_{ti}(C)$, fue normalizada por la intensidad de luz obtenida para la condición seca $I_{tn}(C)$ como se muestra en (4), siguiendo un procedimiento similar a lo planteado por Weidong *et al.* (2003) para la estimación de humedad en suelos a partir de reflexión de luz. De esta manera se obtiene la intensidad de luz total para la condición de humedad i . Finalmente, se calcula el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), usando (5).

$$I_{Ti}(C) = \frac{I_{ti}(C)}{I_{tn}(C)} \quad (4)$$

$$NDVI_i(C) = \frac{I_{i,NIR} - I_{i,VIS}}{I_{i,NIR} + I_{i,VIS}} \quad (5)$$

Resultados y análisis

Los resultados se presentan en los gráficos de la Figura 4, donde se muestra la relación de reflexión de luz y contenido de humedad superficial de los dos relaves ensayados. Es posible observar que la relación muestra dos tramos de comportamiento. El primero es llamado tramo A, el cual presenta un comportamiento parabólico para ambos relaves, marcándose un tramo inicial en donde al aumentar la humedad, la reflexión de luz disminuye hasta un punto de inflexión, el cual es llamado humedad de inflexión (w^*), mientras que posterior a w^* un aumento en la humedad genera un aumento en la reflexión de luz captada. El fin de este comportamiento corresponde al fin



de la parábola el cual ha sido nombrado como humedad máxima (w_m), lo cual es consistente con lo presentado por Araya *et al.* (2019).

Por otro lado, el segundo comportamiento es llamado tramo B, y comienza con (w_m), en donde se observa un brusco decaimiento de la reflexión de luz y luego una estabilización de la reflexión a un valor relativamente constante, esto a medida que aumenta la humedad, lo cual se asocia a la absorción de luz por parte de la capa de agua que se va formando sobre el relave. Esta zona sería un indicador de zonas cubiertas por agua en los depósitos, como por ejemplo la laguna de aguas claras, lo que permitiría tener un control de su ubicación en el depósito.

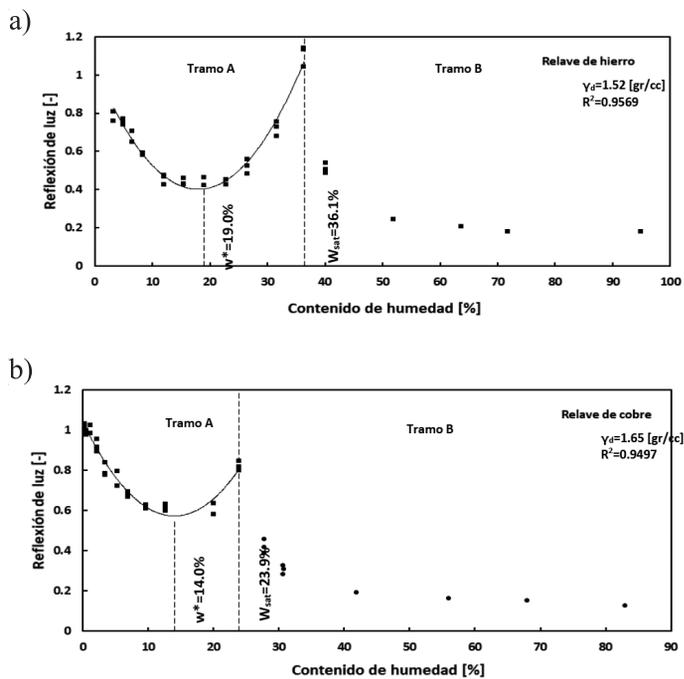


Figura 4: Relación entre reflexión de luz y contenido de humedad superficial en relaves de: a) hierro y b) cobre

Para ambas muestras ensayadas, se observa que w_m coincide aproximadamente con la humedad de saturación w_{sat} de las probetas, por lo que este punto de la curva entregaría información sobre relaves saturados, mientras que por su parte, w^* es similar al límite de contracción, por lo que este punto ayudaría a identificar zonas en las que el volumen del depósito llegó a su mínimo, pudiendo por ejemplo, determinar colocar la siguiente capa para el caso de relaves espesados (Simms *et al.*, 2010). Por otro lado, la zona de crecimiento de la parábola sería un tramo indicador del decaimiento de la resistencia cíclica, la cual

se produce al 70% de saturación llegando al mínimo a un 95% de saturación (Tsukamoto *et al.*, 2014). Además de ser una zona donde es posible identificar inicios de agrietamiento en relaves finos, dado que se encuentra bajo la saturación, pero sobre el límite de contracción (Ávila Álvarez, 2005).

Por otro lado, dado que la relación encontrada es parabólica para niveles bajo de humedad (tramo A), surge la necesidad de usar otra herramienta que ayude a identificar, a partir de la medición de reflexión de luz, la humedad asociada a este valor, ya que en una relación cuadrática para un valor en la ordenada, se asocian dos valores en la abscisa. Es por esto que se hace uso del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el cual se presenta en Figura 5.

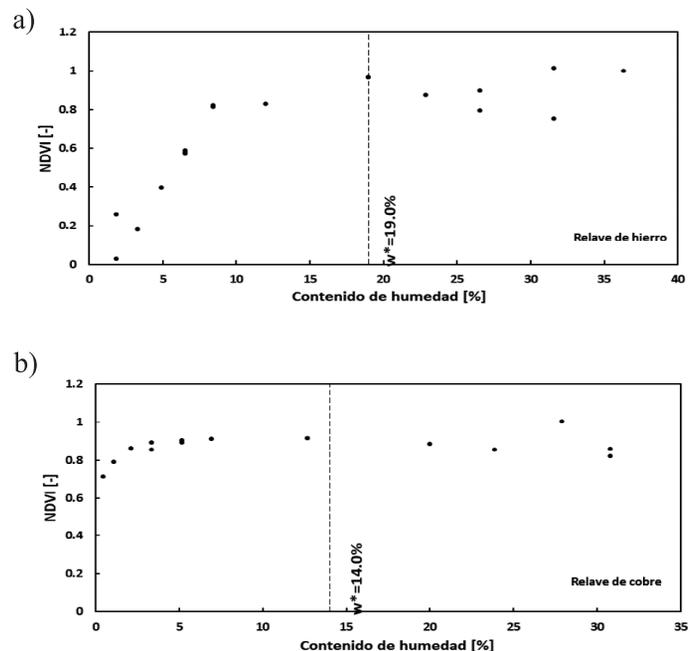
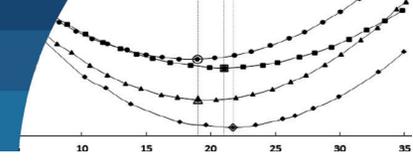


Figura 5: Variación de NDVI en función de la humedad para relaves de: a) hierro y b) cobre

El índice NDVI, muestra para ambos relaves un comportamiento similar, en donde se observa un aumento del NDVI hasta aproximadamente w^* , mientras que para humedad mayores, el valor se mantiene relativamente constante. Esto permite determinar la humedad asociada a la medición por parte de la reflexión de luz, ya que si el NDVI se encuentra en la zona de crecimiento, quiere decir que la reflexión de luz medida es previo a w^* , de lo contrario, la humedad corresponde a un valor mayor a w^* , dado que el NDVI se encontraría en la zona máxima y estable.



Influencia de la densidad seca

Para evaluar el efecto de la densidad en la relación correspondiente al tramo A, se ensaya el relave de hierro a 4 densidades secas distintas, correspondientes a 1.31, 1.56, 1.67 y 1.72 gr/cc. Los resultados se presentan en el gráfico de Figura 6. De acá se observa que el comportamiento sigue siendo parabólico, sin embargo, a medida que la densidad aumenta, la reflexión mínima disminuye. Esto puede estar asociado a una mayor continuidad del medio, en este caso del relave, el cual permitiría que la luz viaje por él, aumentando la absorción, y por tanto, disminuyendo la luz reflejada, como se explica en Clark (1999).

Por otro lado, la diferencia de la reflexión de luz previo a w^* , es menor respecto al tramo posterior. Esto puede deberse a que el primer tramo es inferior al límite de contracción, por lo que el volumen de la probeta se mantiene constante, sin embargo posterior a w^* , hay un hinchamiento de la probeta con el aumento de la humedad y por tanto un medio menos “continuo”, lo que aumentaría las diferencias de reflexión.

Finalmente, se observa que w^* sufre leves variaciones, manteniéndose en un rango acotado, lo que puede deberse a variaciones en la medición de reflexión de luz.

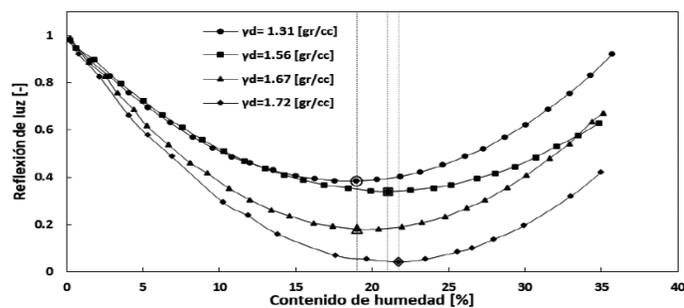


Figura 6: Efecto de la densidad seca en la relación de reflexión de luz y contenido de humedad superficial

Influencia del contenido de finos

Para conocer los efectos del contenido de finos en la relación, se ensayaron muestras de ambos relaves generando mezclas en un rango de 0% a 100% de finos. Los resultados se muestran en Figura 7. En ambos casos, para contenidos de finos superiores al 25%, se logra identificar el comportamiento parabólico observado en la granulometría original del relave, en donde w^* aumenta a medida que lo hace el contenido de finos. Sin embargo, cuando el contenido de finos es de 0%, la relación tiene un

comportamiento lineal. Esto puede deberse a que w^* está asociado al límite de contracción, por lo que al no tener finos, no muestra el cambio de volumen con la variación de la humedad. Lo anterior concuerda con lo presentado por Sadeghi *et al.* (2015b), quienes evidenciaron una relación lineal entre la reflexión de luz y el contenido de humedad en muestras de suelo para longitudes de onda de 1650 nm y 2210 nm, sin embargo, a medida que aumenta el contenido de finos, disminuye la linealidad de la relación.

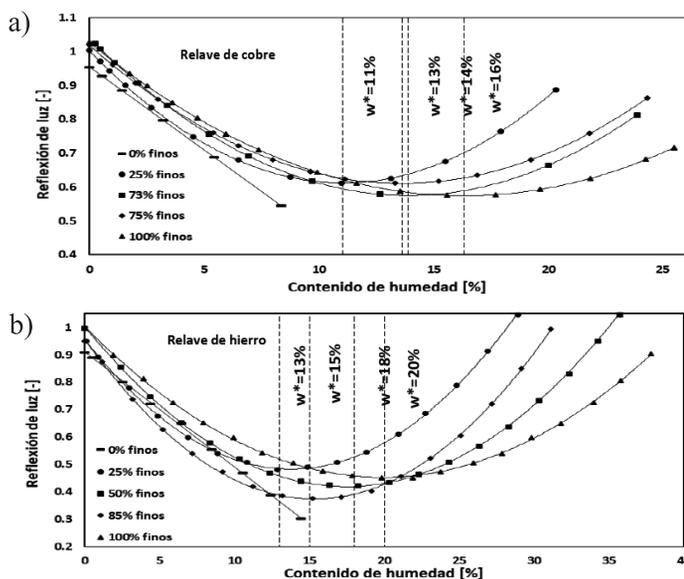
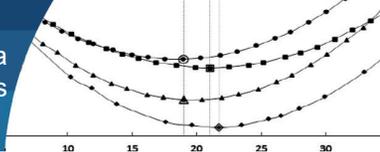


Figura 7: Efectos del contenido de finos en la relación reflexión de luz y contenido de humedad superficial para relaves de: a) cobre y b) hierro

Conclusiones

Luego de realizar ensayos de laboratorio utilizando cámaras multispectrales y láser de 980 nm, se logró identificar el comportamiento de la relación entre la reflexión de luz y el contenido de humedad superficial en muestras de relave provenientes de la extracción de 2 minerales, correspondientes a hierro y cobre. Además, se utilizó el índice (NDVI) como herramienta complementaria a la relación hallada para la estimación de la humedad. En conjunto, se evaluó el efecto de la densidad seca y el contenido de finos en la relación de reflexión de luz y contenido de humedad superficial, ensayando probetas a 4 niveles de densidad entre 1.31-1.71 gr/cc y a mezclas de relave con un contenido de finos entre 0% y 100%.

La relación observada en todos los ensayos fue parabólica, desde la cual se identifican dos puntos importantes; el



primero corresponde al punto de inflexión de la parábola, llamado humedad de inflexión w^* , el cual coincide aproximadamente con el límite de contracción de las muestras, mientras que el segundo punto se encuentra al final de la parábola, llamado humedad máxima w_{max} , el cual es muy similar a la humedad de saturación de las probetas. Para humedades mayores a la saturación, se observó un brusco decaimiento de la reflexión de luz, el cual está asociado a la absorción de luz por parte de la capa de agua formada en la superficie de las probetas.

Por su parte, el (NDVI) mostró que para humedades menores a w^* , la relación es creciente, mientras que posterior a w^* , el valor se mantiene relativamente constante. Esto permite conocer la ubicación de la humedad respecto a w^* , referente a la reflexión medida, dado que si (NDVI) se encuentra en el tramo creciente, entonces la humedad asociada es menor a w^* , mientras que si (NDVI) está en el tramo constante, la humedad es mayor a (w^*).

Por otro lado, se observó que la densidad seca influye en el rango de reflexión, dado que, a mayor densidad seca, menor es el mínimo de reflexión de luz medida, lo que se asocia a una mayor absorción de luz por parte del medio más denso. Respecto a los efectos del contenido de finos, se observa que, a mayor contenido de finos, mayor es w^* , manteniéndose la relación parabólica en todos los casos exceptuando para las mezclas con 0% de finos, las cuales presentan una relación lineal. Esto es promisorio para la aplicación de esta tecnología en el control de compactación de depósitos de relaves.

Finalmente, queda como desafío incorporar nuevas variables que repercutan en la relación de reflexión de luz y humedad superficial, además de poder verificar en terreno los comportamientos observados en laboratorio. Este es un trabajo que actualmente se encuentra en desarrollo en UTFSM y su grupo de residuos mineros (www.miningwaste.cl).

Referencias

Araya, V., Suazo, G., Villavicencio, G. y Silva, M. (2019). Monitoreo de la humedad en depósitos de relave a partir de mediciones de reflexión de luz. *Obras y Proyectos* 25, 35–41

Ávila Álvarez, G. (2005). *Estudio de la retracción y el agrietamiento de arcillas. Aplicación a la arcilla de Bogotá*. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, España

Babaeian, E., Sadeghi, M., Gohardoust, M.R., Arthur, E., Jones, S. B. and Tuller, M. (2017). Application of shortwave infrared imaging for estimation of soil hydraulic properties. *CSSA and SSSA International Annual Meeting*, Tampa FL, USA

Babaeian, E., Sadeghi, M., Jones, S.B. AND Tuller, M. (2019). Relating Evapotranspiration Rate, Soil and Plant temperature, and swir reflectance for root water uptake estimation. *SSSA International Soils Meeting*, San Diego CA, USA

Brauers, J. and Aach, T. (2006). A color filter array based multispectral camera. *12th Workshop Farbbildverarbeitung*, Ilmenau, Germany

Changul, C., Sutthirat, C., Padmanahban, G. and Tongcumpou, C. (2010). Chemical characteristics and acid drainage assessment of mine tailings from Akara Gold Mine in Thailand. *Environmental Earth Sciences* 60(8), 1583–1595

Che, D., Liang, A., Li, X. and Ma, B. (2018). Remote sensing assessment of safety risk of iron tailings pond based on runoff coefficient. *Sensors* 18(12), 4373

Clark, R.N. (1999). Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. In *Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing*, N. Rencz (ed.), John Wiley & Sons, New York, USA, vol. 3, 3–52

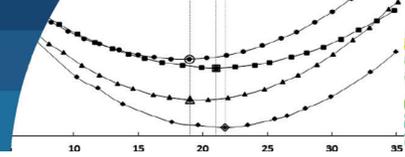
Dalal, R.C. and Henry, R.J. (1986). Simultaneous determination of moisture, organic Carbon, and total Nitrogen by near infrared reflectance spectrophotometry. *Soil Science Society of America Journal* 50(1), 120–123

Entezari, I., Rivard, B., Lipsett, M. and Wilson, W. (2013). Application of hyperspectral remote sensing in estimation of oilsands tailings water content. *5th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing*, WHISPERS, Gainesville FL, USA, IEEE, 1-4

Gondek, J.S., Meyer, G.W. and Newman, J.G. (1994). Wavelength dependent reflectance functions. *21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques SIGGRAPH*, Orlando FL, USA, ACM, 213–220

Hassan-Esfahani, L., Torres-Rua, A., Jensen, A. and McKee, M. (2015). Assessment of surface soil moisture using high-resolution multi-spectral imagery and artificial neural networks. *Remote Sensing* 7(3), 2627–2646

Sadeghi, M., Jones, S.B. and Philpot, W.D. (2015a). A linear physically-based model for remote sensing of soil moisture using short wave infrared bands. *Remote Sensing of Environment* 164, 66–76



- Sadeghi, M., Jones, S.B. and Tuller, M. (2015b). Toward a calibration-free model for optical remote sensing of soil moisture. *Conference AGU Fall Meeting*, San Francisco CA, USA
- Sadeghi, M., Sheng, W., Babaeian, E., Tuller, M. and Jones, S.B. (2017). High-resolution shortwave infrared imaging of water infiltration into dry soil. *Vadose Zone Journal* 16(13), 1–10
- Simms, P., Dunmola, A., Fisseha, B. and Bryan, R. (2010). Generic modelling of desiccation for cyclic deposition of thickened tailings to maximise density and to minimise oxidation. *Thirteenth International Seminar on Paste and Thickened Tailings*, R. Jewell and A.B. Fourie (eds.), Australian Centre for Geomechanics, Perth, Australia, 293–301
- Thomasson, J.A., Sui, R., Cox, M.S. and Al-Rajehy, A. (2001). Soil reflectance sensing for determining soil properties in precision agriculture. *Transactions of the ASAE* 44(6), 1445–1453
- Tschuschke, W., Gogolik, S., Wróczynska, M., Kroll, M. and Stefanek, P. (2020). The application of the seismic cone penetration test (SCPTU) in tailings water conditions monitoring. *Water* 12(3), 737
- Tsukamoto, Y., Kawabe, S., Matsumoto, J. and Hagiwara, S. (2014). Cyclic resistance of two unsaturated silty sands against soil liquefaction. *Soils and Foundations* 54(6), 1094–1103
- Valenzuela, L. (2016). Design, construction, operation and the effect of fines content and permeability on the seismic performance of tailings sand dams in Chile. *Obras y Proyectos* 19, 6–22
- Villavicencio, A.G., Breul, P., Bacconnet, C., Boissier, D. and Espinace, A.R. (2011). Estimation of the variability of tailings dams properties in order to perform probabilistic assessment. *Geotechnical and Geological Engineering* 29(6), 1073–1084
- Weidong, L., Baret, F., Xingfa, G., Bing, Z., Qingxi, T. and Lanfen, Z. (2003). Evaluation of methods for soil surface moisture estimation from reflectance data. *International Journal of Remote Sensing* 24(10), 2069–2083
- Wright, S.P., Walden, P.J., Sangha, C.M. and Langdon, N.J. (1996). Observations on soil permeability, moulding moisture content and dry density relationships. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 29(3), 249–255