



## ANEXO 1

### FORMATO PARA LA PRESENTACIÓN DE PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN CON EL FINANCIAMIENTO DEL FEDU

#### 1. Título del proyecto

**Comportamiento termo-hidráulico de suelos congelados expresado en la curva de congelamiento (freezing characteristic curve)**

#### 2. Área de Investigación

Área de investigación	Línea de Investigación	Disciplina OCDE
Ingeniería y tecnología	Ingeniería geológica	Geotecnia

#### 3. Duración del proyecto (meses)

**12**

#### 4. Tipo de proyecto

Individual	<input checked="" type="radio"/>
Multidisciplinario	<input type="radio"/>
Director de tesis pregrado	<input type="radio"/>

#### 4. Datos de los integrantes del proyecto

Apellidos y Nombres	<b>Erasmus Godofredo Carnero Carnero</b>
Escuela Profesional	<b>Ingeniería Geológica</b>
Celular	<b>+51 953 269 403</b>
Correo Electrónico	<a href="mailto:ecarnero53@yahoo.es">ecarnero53@yahoo.es</a>

Apellidos y Nombres	<b>Genaro Gonzalo Carnero Guzman</b>
Escuela Profesional	<b>Ingeniería Civil, Monash University, Australia – Golder Associates, Australia</b>
Celular	<b>+61 403 425 462</b>
Correo Electrónico	<a href="mailto:gguzman@golder.com.au">gguzman@golder.com.au</a>

- I. Título (El proyecto de tesis debe llevar un título que exprese en forma sintética su contenido, haciendo referencia en lo posible, al resultado final que se pretende lograr. Máx. palabras 25)

Comportamiento hidráulico de suelos congelados expresado en la curva de congelamiento (freezing characteristic curve)

- II. Resumen del Proyecto de Tesis (Debe ser suficientemente informativo, presentando -igual que un trabajo científico- una descripción de los principales puntos que se abordarán, objetivos, metodología y resultados que se esperan)



Actualmente el cambio climático está influenciando el congelamiento y descongelamiento de suelos a nivel mundial, lo cual implica que obras de ingeniería (particularmente barrera hidráulicas de protección ambiental) deben ser diseñadas considerando dichos fenómenos extremos. Tales fenómenos son comunes en la ciudad de Puno, donde la temperatura puede llegar a  $-6^{\circ}\text{C}$  entre mayo y septiembre de cada año. En la literatura se ha documentado la gran influencia del hielo en el comportamiento ingenieril de los suelos, particularmente en el aspecto mecánico, térmico e hidráulico. La presente investigación realiza un análisis exhaustivo sobre el comportamiento termo-hidráulico de suelos congelados. La investigación recopilará los fundamentos teóricos sobre suelos congelados y su impacto en barreras hidráulicas tales como geosynthetic clay liners (GCL) utilizadas en obras de protección ambiental. Principal énfasis será dado a la curva de congelamiento (freezing characteristic curve, FCC), la cual predice el comportamiento termo-hidráulico de los suelos y es una herramienta necesaria en simulaciones numéricas. Detalles sobre la obtención de la freezing characteristic curve mediante laboratorio o formulas empíricas serán discutidos a profundidad.

**III. Palabras claves (Keywords) (Colocadas en orden de importancia. Máx. palabras: cinco)**

Suelos congelados, curva de congelamiento, freezing characteristic curve, barreras hidráulicas, geosynthetic clay liners.

**IV. Justificación del proyecto (Describa el problema y su relevancia como objeto de investigación. Es importante una clara definición y delimitación del problema que abordará la investigación, ya que temas cuya definición es difusa o amplísima son difíciles de evaluar y desarrollar)**

La presente investigación se centra en entender la naturaleza de suelos congelados y su influencia en el diseño de obras de ingeniería. El conocimiento teórico del comportamiento termo-hidráulico es indispensable para un correcto diseño de obras en dichas condiciones, especialmente barreras hidráulicas como los geosynthetic clay liners (GCL).

**V. Antecedentes del proyecto (Incluya el estado actual del conocimiento en el ámbito nacional e internacional. La revisión bibliográfica debe incluir en lo posible artículos científicos actuales, para evidenciar el conocimiento existente y el aporte de la Tesis propuesta. Esto es importante para el futuro artículo que resultará como producto de este trabajo)**

Los suelos (medios porosos) experimentan un cambio de fase de agua a hielo cuando las temperaturas caen por debajo de  $0^{\circ}\text{C}$ , lo que produce la solidificación del agua en hielo policristalino (Stähli 2006). La congelación del agua en materiales porosos (por ejemplo, el suelo) es un proceso combinado que implica tanto la transferencia de calor como de agua. Cuando se forma un gradiente de temperatura en un suelo helado, el calor fluye de la temperatura más alta a la más baja y, simultáneamente, se impulsa por la migración del agua en el mismo camino (Zhang et al. 2016c). Mientras que el calor se extrae durante el crecimiento del hielo, el agua se absorbe de las áreas circundantes en la dirección de la eliminación del calor, lo que resulta en la formación de lentes de hielo en los poros del suelo (Anderson y Tice 1971). Durante el proceso, las partículas sólidas y los solutos se pueden segregar a medida que las lentes de hielo se hacen más grandes por procesos físico-químicos en la cristalización del agua (Hohmann-Porebska 2002). La tasa de crecimiento de las lentes de hielo



depende de la tasa de transporte del agua del suelo a las lentes de hielo y de la eliminación equilibrada del calor latente por conducción térmica (Hohmann 1997). Además, la velocidad de transporte depende de la temperatura y también se ve fuertemente afectada por la distribución del tamaño de los poros del suelo (Miller 1972; Harlan 1973).

Además, se ha demostrado que el crecimiento de la lente de hielo está influenciado por los ciclos de congelación-descongelación (freeze-thaw cycles, FTC). Los estudios realizados en arcillas por (Kujala y Laurinen 1989), (Kumor 1989), (Stępkowska y Skarżyńska 1989) y (Hohmann-Porebska 2002) observaron alteraciones de la microestructura y la tela durante la FTC. Particularmente, FTC produce (1) una orientación paralela de horizontes de arcilla con las lentes de hielo formadas, y (2) agregación de partículas en la estructura.

Para modelar los fenómenos de congelación en materiales de suelo húmedo, deben satisfacerse tres ecuaciones: (a) temperatura en función de la posición y el tiempo, (b) movimiento del agua al potencial químico termodinámico de succión del suelo,  $\psi$ , (c) desplazamientos y presiones mecánicas (Hohmann 1997). Más importante aún, cada ecuación debería poder lograr el equilibrio termodinámico durante las transiciones de fase (Kurylyk & Watanabe 2013). Este objetivo se logra mediante el uso de la ecuación de Clapeyron, que se deriva del concepto de energía libre de Gibbs donde se puede expresar el equilibrio de fases múltiples.

La forma original de la ecuación de Clapeyron fue descrita por Kay y Groenevelt (1974) y Groenevelt y Kay (1974) para múltiples fases al denotar primero la relación de Gibbs-Duhem para cada fase y luego combinar los términos resultantes de la siguiente manera:

$$\frac{1}{\rho_w} \frac{dP_{wf}}{dT} - \frac{1}{\rho_i} \frac{dP_i}{dT} = \frac{H_f}{(T + 273.15)}$$

Donde  $T$  es la temperatura de congelación de equilibrio (en grados Celsius),  $H_f$  es el calor latente de fusión del agua (en julios),  $P_{wf}$  y  $P_i$  son las presiones de los poros de equilibrio para las fases de agua líquida y hielo, respectivamente (en MPa), y  $\rho_w$  y  $\rho_i$  son la densidad del agua y del hielo, respectivamente (en  $\text{g/cm}^3$ ).

## VI. Hipótesis del trabajo (Es el aporte proyectado de la investigación en la solución del problema)

El comportamiento termo-hidráulico de suelos congelados es determinado y explicado por la curva de congelamiento (freezing characteristic curve, FCC).

## VII. Objetivo general

Revisar el estado teórico actual sobre suelos congelados y su aplicación en obras de ingeniería como las barreras hidráulicas.

## VIII. Objetivos específicos

- Revisar los diversos aspectos teóricos de los suelos congelados
- Revisar los aspectos teóricos de la curva de congelamiento (freezing characteristic curve, FCC) y su obtención por medio de fórmulas empíricas y laboratorio.
- Investigar la aplicación de las teorías de suelos congelados en las barreras hidráulicas, específicamente geosynthetic clay liners (GCL)



- IX. Metodología de investigación (Describir el(los) método(s) científico(s) que se empleará(n) para alcanzar los objetivos específicos, en forma coherente a la hipótesis de la investigación. Sustentar, con base bibliográfica, la pertinencia del(los) método(s) en términos de la representatividad de la muestra y de los resultados que se esperan alcanzar. Incluir los análisis estadísticos a utilizar)

El estudio comprende la revisión bibliográfica extensa de suelos congelados, especialmente enfocado en el comportamiento termo-hidráulico. Por otro lado, la investigación también se enfoca en la curva de congelamiento (freezing characteristic curve, FCC), la cual predice el comportamiento termo-hidráulico de los suelos y es una herramienta necesaria en simulaciones numéricas. Finalmente, la investigación se enfoca en la aplicación de los conceptos teóricos en la construcción de barreras hidráulicas, específicamente geosynthetic clay liners (GCL)  
Por lo tanto, en la presente investigación se usa el MÉTODO DOCUMENTAL para demostrar la hipótesis planteada.

- X. Referencias (Listar las citas bibliográficas con el estilo adecuado a su especialidad)

- Anderson, D., & Tice, A. (1971). Low-temperature phases of interfacial water in clay-water systems. *Proceedings of the Soil Science Society of America*, 35, 47-54.
- Anderson, D., & Tice, A. (1972). Predicting unfrozen water contents in frozen soils from surface area measurements. *Highway Research Record*, 393, 12-18.
- Anderson, R., Rayhani, M. T., & Rowe, R. K. (2012). Laboratory investigation of GCL hydration from clayey sand subsoil. *Geotextiles And Geomembranes*, 31, 31-38. doi: 10.1016/j.geotextmem.2011.10.005
- Bai, R., Lai, Y., Zhang, M., & Yu, F. (2018). Theory and application of a novel soil freezing characteristic curve. *Applied Thermal Engineering*, 129, 1106-1114. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.10.121
- Bannour, H., Stoltz, G., Delage, P., & Touze-Foltz, N. (2014). Effect of stress on water retention of needlepunched geosynthetic clay liners. *Geotextiles And Geomembranes*, 42(6), 629-640. doi: 10.1016/j.geotextmem.2014.09.001
- Barry-Macaulay, D. (2013). An investigation on the thermal and thermo-mechanical behaviour of soils. (M. Eng. Sc.), Monash University.
- Bathurst, R. J., Rowe, R. K., Zeeb, B., & Reimer, K. J. (2006). A geocomposite barrier for hydrocarbon containment in the Arctic. *International Journal of Geoengineering Case Histories*, 1(1), 18-34.
- Beddoe, R., Take, W., & Rowe, R. K. (2011). Water-Retention Behavior of Geosynthetic Clay Liners. *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, 137(11), 1028-1038. doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000526.©2011
- Bérend, I., Cases, J. M., François, M., Uriot, J. P., Michot, L. J., Masion, A., & Thomas, F. (1995). Mechanism of adsorption and desorption of water vapour by homoionic montmorillonites: 2. The Li<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Rb<sup>+</sup> and the Cs<sup>+</sup> exchanged form. *Clays and Clay Minerals*, 43(3), 324-336.
- Beskow, G. (1947). Soil freezing and frost heaving with special application to roads and railroads, with special supplement for the English translation of progress from 1935 to 1946. Evanston, Ill.: Evanston, Ill., Technological Institute, Northwestern University.
- Bouazza, A. (2002). Geosynthetic clay liners. *Geotextiles And Geomembranes*, 20(1), 3-17. doi: 10.1016/S0266-1144(01)00025-5
- Bouazza, A., Gates, W. P., & Abuel-Naga, H. (2006). Factors impacting liquid and gas flow through geosynthetic clay liners. *Geosynthetics-Recent Developments Commemorative Volume , Two decades of Geosynthetics in India*, 119-146.



- Bouazza, A., & Rahman, F. (2007). Oxygen diffusion through partially hydrated geosynthetic clay liners. *Geotechnique*, 57(9), 767-772. doi: 10.1680/geot.2007.57.9.767
- Bouazza, A., & Bowders, J. J. (2009). *Geosynthetic Clay Liners for Waste Containment Facilities*: Taylor & Francis. 254p.
- Bouazza, A., & Gates, W. P. (2014). Overview of performance compatibility issues of GCLs with respect to leachates of extreme chemistry. *Geosynth. Int.*, 21(2), 151-167. doi: 10.1680/gein.14.00006
- Brachman, R., Rowe, R. K., Take, W. A., & Siemens, G. A. (2013, September 2-6 2013). Effect of confining stress on the transient hydration of unsaturated GCLs. In *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris.
- Carnero-Guzman, G. G., Bouazza, A., Gates, W. P., & Rowe, R. K. (2018). A Review of Experimental and Prediction Methods for Assessing the Freezing Characteristic Curve of GCLs. In *Proceedings of the 8th International Congress on Environmental Geotechnics Volume 2. ICEG 2018*, pp. 616-623.
- Carnero-Guzman, G. G., Gates, W. P., Bouazza, A., Aldridge, L. P., & Bordallo, H. N. (2019). Using neutron spectroscopy to measure soil water retention at high suction values. *Canadian Geotechnical Journal*. doi: <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0718>
- Cebula, D. J., Thomas, R. K., & White, J. W. (1981). Diffusion of water in Limontmorillonite studied by quasielastic neutron scattering. *Clays & Clay Minerals*, 29(4), 241-248.
- Clapp, R. B., & Hornberger, G. M. (1978). Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water Resources Research*, 14(4), 601-604. doi: 10.1029/WR014i004p00601
- Dall'Amico, M. (2010). Coupled water and heat transfer in permafrost modeling. (Doctoral thesis Doctoral thesis), University of Trento, Doctoral thesis.
- Daniel, D. E., Shan, H.-Y., & Anderson, J. D. (1993). Effects of partial wetting on the performance of the bentonite component of a geosynthetic clay liner. In *Geosynthetics'93*, St. Paul. USA, pp. 1482-1496.
- Darrow, M. M. (2011). Thermal modeling of roadway embankments over permafrost. *Cold Regions Science and Technology*, 65(3), 474-487. doi: 10.1016/j.coldregions.2010.11.001
- Fredlund, D. G., & Houston, S. L. (2009). Protocol for the assessment of unsaturated soil properties in geotechnical engineering practice. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(6), 694-707. doi: 10.1139/t09-010
- Gabel, F. (2005). Protein dynamics in solution and powder measured by incoherent elastic neutron scattering: the influence of Q-range and energy resolution. *European Biophysics Journal : EBJ*, 34(1), 1-12. doi: 10.1007/s00249-004-0433-0
- Gardner, W. R. (1958). Some steady-state solutions of the unsaturated flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science*, 85(4), 228-232.
- Gates, W. P., Nefiodovas, A., & Peter, P. (2004). Permeability of an organo-modified bentonite to ethanol-water solutions. *Clays and Clay Minerals*, 52(2), 192-203. doi: 10.1346/CCMN.2004.0520205
- Gates, W. P., Bouazza, A., & Churchman, G. J. (2009). Bentonite clay keeps pollutants at bay. *Elements*(2), 105-110. doi: 10.2113/gselements.5.2.105
- Gates, W. P., Bordallo, H. N., Aldridge, L. P., Seydel, T., Jacobsen, H., Marry, V., & Churchman, G. J. (2012). Neutron Time-of-Flight Quantification of Water Desorption Isotherms of Montmorillonite. *The Journal of Physical Chemistry C*, 116(9), 5558-5570. doi: 10.1021/jp2072815
- Guymon, G. L., & Luthin, J. N. (1974). A coupled heat and moisture transport model for Arctic soils. *Water Resources Research*, 10(5), 995-1001. doi: 10.1029/WR010i005p00995





- Hansson, K., Simunek, J., Mizoguchi, M., Lundin, L.-C., & Van Genuchten, M. (2004). Water Flow and Heat Transport in Frozen Soil -- Numerical Solution and Freeze-Thaw Applications. *Vadose Zone Journal*, 3(2), 693-704. doi: 10.2113/3.2.693
- Harlan, R. L. (1973). Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil. *Water Resources Research*, 9(5), 1314-1323. doi: 10.1029/WR009i005p01314
- Hosney, M. S., & Rowe, R. K. (2014). Performance of GCL after 10 Years in Service in the Arctic. *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, 140(10), 04014056. doi: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001160
- Hromadka, T. V., Guymon, G. L., & Berg, R. L. (1981). Some approaches to modeling phase change in freezing soils. *Cold Regions Science and Technology*, 4(2), 137-145. doi: [https://doi.org/10.1016/0165-232X\(81\)90018-5](https://doi.org/10.1016/0165-232X(81)90018-5)
- Hu, H., Yang, S., & Lei, Z. (1992). A numerical simulation for heat and moisture transfer during soil freezing. *J. Hydraul. Eng.* 7, 1-8 (in Chinese with English abstract).
- Katsumi, T., Ishimori, H., Onikata, M., & Fukagawa, R. (2008). Long-term barrier performance of modified bentonite materials against sodium and calcium permeant solutions. *Geotextiles And Geomembranes*, 26(1), 14-30. doi: 10.1016/j.geotexmem.2007.04.003
- Kay, B. D., & Groenevelt, P. H. (1974). On the interaction of water and heat transport in frozen and unfrozen soils. 1. Basic theory; the vapor phase. *Proceedings - Soil Science Society of America*, 38(3), 395-400.
- Kimball, B. A., Jackson, R. D., Reginato, R. J., Nakayama, F. S., & Idso, S. B. (1976). Comparison of field-measured and calculated soil-heat fluxes. *Soil Science Society of America Proceedings*, 40(1), 18-25.
- Klein, J., & Jessberger, H. L. (1979). Creep stress analysis of frozen soils under multiaxial states of stress. *Engineering Geology*, 13(1), 353-365. doi: 10.1016/0013-7952(79)90042-5
- Kozlowski, T. (2007). A semi-empirical model for phase composition of water in clay-water systems. *Cold Regions Science and Technology*, 49(3), 226-236. doi: 10.1016/j.coldregions.2007.03.013
- Kozlowski, T. (2012). Modulated Differential Scanning Calorimetry (MDSC) studies on low-temperature freezing of water adsorbed on clays, apparent specific heat of soil water and specific heat of dry soil. *Cold Regions Science and Technology*, 78, 89-96. doi: 10.1016/j.coldregions.2012.03.001
- Kozlowski, T., & Nartowska, E. (2013). Unfrozen Water Content in Representative Bentonites of Different Origin Subjected to Cyclic Freezing and Thawing. *Vadose Zone Journal*, 12(1). doi: 10.2136/vzj2012.0057
- Kozlowski, T. (2016). A simple method of obtaining the soil freezing point depression, the unfrozen water content and the pore size distribution curves from the DSC peak maximum temperature. *Cold Regions Science and Technology*, 122, 18-25. doi: 10.1016/j.coldregions.2015.10.009
- Kumor, M. K. (1989). An increase in clays frost heave result. In *Frost in Geotechnical Engineering: VTT Symposium*, Saariselk, Finland, pp. 13-15.
- Kurylyk, B. L., & Watanabe, K. (2013). The mathematical representation of freezing and thawing processes in variably-saturated, non-deformable soils. *Advances in Water Resources*, 60, 160-177. doi: 10.1016/j.advwatres.2013.07.016
- Lai, S., Tiedje, J. M., & Erickson, A. E. (1976). In situ measurement of gas diffusion coefficient in soils. *Soil Science Society of America Journal Proceedings*, 40(1), 3-6.
- Likos, W. J., & Lu, N. (2002). Water vapor sorption behavior of smectite-kaolinite mixtures. *Clays and Clay Minerals*, 50(5), 553-561. doi: 10.1346/000986002320679297



- Liu, Y., Gates, W. P., & Bouazza, A. (2013). Acid induced degradation of the bentonite component used in geosynthetic clay liners. *Geotextiles And Geomembranes*, 36, 71-80. doi: 10.1016/j.geotexmem.2012.10.011
- Liu, Y., Gates, W. P., Bouazza, A., & Rowe, R. K. (2014). Fluid loss as a quick method to evaluate hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners under acidic conditions. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(2), 158-163. doi: 10.1139/cgj-2013-0241
- Makusa, G. P., Bradshaw, S. L., Berns, E., Benson, C. H., & Knutsson, S. (2014). Freeze-thaw cycling concurrent with cation exchange and the hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(6), 591-598. doi: 10.1139/cgj-2013-0127
- Marry, V., Dubois, E., Malikova, N., Durand-Vidal, S., Longeville, S., & Breu, J. (2011). Water dynamics in hectorite clays: influence of temperature studied by coupling neutron spin echo and molecular dynamics. *Environ Sci Technol*, 45(7), 2850-2855. doi: 10.1021/es1031932
- Martins, M., Eckert, J., Jacobsen, H., Dos Santos, E. C., Ignazzi, R., de Araujo, D., Bellissent-Funel, M. C., Natali, F., Koza, M. M., Matic, A., de Paula, E., & Bordallo, H. (2017). Probing the dynamics of complexed local anesthetics via neutron scattering spectroscopy and DFT calculations. *Int. J. Pharm.*, 524(1-2), 397-406. doi: 10.1016/j.ijpharm.2017.03.051
- McWatters, R. S., Rowe, R. K., Wilkins, D., Spedding, T., Jones, D., Wise, L., Mets, J., Terry, D., Hince, G., Gates, W. P., Di Battista, V., Shoaib, M., Bouazza, A., & Snape, I. (2016). Geosynthetics in Antarctica: Performance of a composite barrier system to contain hydrocarbon-contaminated soil after three years in the field. *Geotextiles And Geomembranes*, 44(5), 673-685. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2016.06.001>
- Nishimura, S., Gens, A., Olivella, S., & Jardine, R. J. (2009). THM-coupled finite element analysis of frozen soil: formulation and application. *Geotechnique*, 59(3), 159-171. doi: 10.1680/geot.2009.59.3.159
- Rouf, M. A., Bouazza, A., Singh, R. M., Gates, W. P., & Rowe, R. K. (2016a). Water vapour adsorption and desorption in GCLs. *Geosynth. Int.*, 23(2), 86-99. doi: 10.1680/jgein.15.00034
- Rouf, M. A., Bouazza, A., Singh, R. M., Gates, W. P., & Rowe, R. K. (2016b). Gas flow unified measurement system for sequential measurement of gas diffusion and gas permeability of partially hydrated geosynthetic clay liners. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(6), 1000-1012. doi: 10.1139/cgj-2015-0123
- Rowe, R. K. (1998). Geosynthetics and the minimization of contaminant migration through barrier systems beneath solid waste. In Keynote Lecture, Proceedings of 6th International Conference on Geosynthetics, Atlanta, USA, pp. 27-103.
- Rowe, R. K., & Orsini, C. (2003). Effect of GCL and subgrade type on internal erosion in GCLs under high gradients. *Geotextiles And Geomembranes*, 21(1), 1-24.
- Rowe, R. K., Mukunoki, T., Bathurst, R. J., Rimal, S., Hurst, P., & Hansen, S. (2007). Performance of a geocomposite liner for containing Jet A-1 spill in an extreme environment. *Geotext. Geomembr.*, 25(2), 68-77. doi: 10.1016/j.geotexmem.2006.10.003
- Rowe, R. K., Mukunoki, T., & Bathurst, R. J. (2008). Hydraulic conductivity to Jet-A1 of GCLs after up to 100 freeze-thaw cycles. *Geotechnique*, 58(6), 503-511. doi: 10.1680/geot.2008.58.6.503
- Rowe, R. K., Rayhani, M. T., Take, A., Siemens, G., & Brachman, R. W. I. (2011). GCL hydration under simulated daily thermal cycles. *Geosynthetics International*, 18(4), 196-205.
- Rowe, R. K. (2012). Short- and long-term leakage through composite liners. The 7th Arthur Casagrande Lecture. *Canadian Geotechnical Journal/Revue Canadienne de Geotechnique*, 49(2), 141-169. doi: 10.1139/t11-092



- Rowe, R. K., & Verge, A. (2013). Prediction of geosynthetic clay liner desiccation in low stress applications. *Geosynthetics International*, 20(5), 301-315. doi: 10.1680/gein.13.00019
- Rowe, R. K. (2014). Performance of GCLS in liners for landfill and mining applications. *Environmental Geotechnics*, 1(1), 3-21. doi: 10.1680/envgeo.13.00031
- Rowe, R. K., Rentz, A. K., Brachman, R. W. I., & Take, W. A. (2016). Effect of GCL Type on Downslope Erosion in an Exposed Composite Liner. *Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, 142(12), 04016074. doi: doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001565
- Rowe, R. K., Brachman, R., Hosney, M. S., Take, W., & Arnepalli, D. (2017). Insight into hydraulic conductivity testing of geosynthetic clay liners (GCLs) exhumed after 5 and 7 years in a cover. *Can. Geotech. J.*, 54(8), 1118-1138. doi: 10.1139/cgj-2016-0473
- Southen, J. M., & Kerry Rowe, R. (2007). Evaluation of the water retention curve for geosynthetic clay liners. *Geotextiles And Geomembranes*, 25(1), 2-9. doi: 10.1016/j.geotexmem.2006.10.002
- Spaans, E. J. A., & Baker, J. M. (1996). The Soil Freezing Characteristic: Its Measurement and Similarity to the Soil Moisture Characteristic. *Soil Science Society of America Journal*, 60(1), 13-19. doi: 10.2136/sssaj1996.03615995006000010005x
- Stähli, M., Jansson, P.-E., & Lundin, L.-C. (1999). Soil Moisture Redistribution and Infiltration in Frozen Sandy Soils. *Water Resources Research*, 35(1), 95-103. doi: 10.1029/1998WR900045
- Stähli, M. (2006). Freezing and Thawing Phenomena in Soils. *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. doi: doi:10.1002/0470848944.hsa075
- Stępkowska, E., & Skarżyńska, K. (1989). Microstructural changes in clays due to freezing. In *Frost in Geotechnical Engineering: VTT Symposium*, Saariselk, Finland, pp. 13-15.
- Suzuki, S. (2011). Dependence of unfrozen water content in unsaturated frozen clay soil on initial soil moisture content. *Soil Science and Plant Nutrition*, 50(4), 603-606. doi: 10.1080/00380768.2004.10408518
- Taber, S. (1930). The Mechanics of Frost Heaving. *The Journal of Geology*, 38(4), 303-317.
- Tan, L., Wei, C. F., Tian, H. H., Zhou, J. Z., & Wei, H. Z. (2015). Experimental study of unfrozen water content of frozen soils by low-field nuclear magnetic resonance. *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*, 36(6), 1566-1572. doi: 10.16285/j.rsm.2015.06.006
- Wang, D., Zhu, Y., Ma, W., & Niu, Y. (2006). Application of ultrasonic technology for physical-mechanical properties of frozen soils. *Cold Reg. Sci. Tech.*, 44(1), 12-19. doi: 10.1016/j.coldregions.2005.06.003
- Watanabe, K., Takeuchi, M., Osada, Y., & Ibata, K. (2012). Micro-Chilled-Mirror Hygrometer for Measuring Water Potential in Relatively Dry and Partially Frozen Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 76(6), 1938-1945. doi: 10.2136/sssaj2012.0070
- Watanabe, K., & Osada, Y. (2017). Simultaneous measurement of unfrozen water content and hydraulic conductivity of partially frozen soil near 0 °C. *Cold Regions Science and Technology*, 142, 79-84. doi: 10.1016/j.coldregions.2017.08.002
- Yoshikawa, K., & Overduin, P. P. (2005). Comparing unfrozen water content measurements of frozen soil using recently developed commercial sensors. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 42, 250-256. doi: 10.1016/j.coldregions.2005.03.001
- Zapata, C. E., Houston, W. N., Houston, S. L., & Walsh, K. D. (2000, 5-8 August 2000.). Soil-water characteristic curve variability. In *Advances in Unsaturated Geotechnics (GSP 99)*, GeoDenver Conference, Denver, Colo., pp. 84-124.





- Zhang, C., Liu, Z., & Deng, P. (2018). Using molecular dynamics to unravel phase composition behavior of nano-size pores in frozen soils: Does Young-Laplace equation apply in low temperature range? *Canadian Geotechnical Journal*, 55(8), 1144-1153. doi: 10.1139/cgj-2016-0150
- Zhang, L., Ma, W., Yang, C., & Yuan, C. (2014). Investigation of the pore water pressures of coarse-grained sandy soil during open-system step-freezing and thawing tests. *Engineering Geology*, 181, 233-248. doi: 10.1016/j.enggeo.2014.07.020
- Zhang, S., Sheng, D., Zhao, G., Niu, F., & He, Z. (2016a). Analysis of frost heave mechanisms in a high-speed railway embankment. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(3), 520-529. doi: 10.1139/cgj-2014-0456
- Zhang, S., Teng, J., He, Z., Liu, Y., Liang, S., Yao, Y., & Sheng, D. (2016b). Canopy effect caused by vapour transfer in covered freezing soils. *Geotechnique*, 66(11), 927-940. doi: 10.1680/jgeot.16.P.016
- Zhang, S., Teng, J., He, Z., & Sheng, D. (2016c). Importance of vapor flow in unsaturated freezing soil: a numerical study. *Cold Regions Science and Technology*, 126(C), 1-9. doi: 10.1016/j.coldregions.2016.02.011
- Zhang, X., Sun Shu, F., & Xue, Y. (2007). Development and testing of a frozen soil parameterization for cold region studies. *Journal of Hydrometeorology*(4), 690-701. doi: 10.1175/JHM605.1

**XI. Uso de los resultados y contribuciones del proyecto (Señalar el posible uso de los resultados y la contribución de los mismos)**

Los resultados serán usados como herramienta de consulta para ingenieros proyectistas de fundaciones profundas en suelos congelados. Además, pondrá en evidencia los conceptos de los nuevos métodos de construcción de barreras hidráulicas.

**XII. Impactos esperados**

**i. Impactos en Ciencia y Tecnología**

Aplicación de nuevas tecnologías en la construcción en zonas con suelos congelados.

**ii. Impactos económicos**

Uso de métodos que mitiguen accidentes en construcciones en suelos congelados.

**iii. Impactos sociales**

Optimización de la etapa constructiva de obras civiles.

**iv. Impactos ambientales**

Reducción de la contaminación por uso adecuado de barreras hidráulicas.

**XIII. Recursos necesarios (Infraestructura, equipos y principales tecnologías en uso relacionadas con la temática del proyecto, señale medios y recursos para realizar el proyecto)**

- Material de escritorio
- Laptop



- Internet
- Revistas especializadas

**XIV. Localización del proyecto (indicar donde se llevará a cabo el proyecto)**

El estudio comprende la revisión bibliográfica extensa de suelos congelados. Por lo cual la investigación será ejecutada como revisión bibliográfica.

**XV. Cronograma de actividades**

Actividad	Meses											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Recolección bibliográfica – suelos sulfúricos ácidos	X	X										
Recolección bibliográfica – ataque sulfúrico y su impacto ambiental		X	X									
Recolección bibliográfica – mecanismos tradicionales de estabilización de suelos			X	X								
Recolección bibliográfica – nuevos mecanismos de estabilización de suelos				X	X							
Recolección bibliográfica – material de estudio: Coode Island Silt y sus propiedades ingenieriles					X	X						
Recolección bibliográfica – resultados y análisis de Le (2016)						X	X					
Discusión de la recolección bibliográfica								X	X			
Redacción preliminar del texto									X	X		
Redacción final del texto											X	X

**XVI. Presupuesto**

ACTIVIDADES	Costo S/.
Recolección bibliográfica – Suelos congelados	300.00
Recolección bibliográfica – La ecuación Clapeyron	300.00
Recolección bibliográfica – Formación de hielo en el régimen capilar	300.00
Recolección bibliográfica – Formación de hielo en el régimen de adsorción	300.00
Recolección bibliográfica – La curva de congelamiento	600.00
Recolección bibliográfica – Barreras hidráulicas en zonas congeladas, casos prácticos	400.00
Discusión de la recolección bibliográfica	200.00
Redacción preliminar del texto	400.00
Redacción final del texto	400.00
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>3200.00</b>