

INFLUENCIA DE LA INTENSIDAD DE LLUVIA Y LA PENDIENTE SOBRE LA VELOCIDAD DEL FRENTE HUMEDO

I. Salazar^{1,2}

¹Departament of Civil Engineering, Universidad Católica del Norte, Avda. Angamos 0610, Antofagasta, Chile.

²isalazar@ucn.cl

Received 25 Abril 2015, Accepted 14 May 2015.

Resumen

El presente artículo estudia la influencia de la intensidad de lluvia y la pendiente sobre el comportamiento de la velocidad del frente húmedo en el inicio del escurrimiento superficial en tres quebradas de la ciudad de Antofagasta. El suelo en consideración proviene de tres quebradas de la ciudad de Antofagasta que fueron afectados por eventos aluviales en el pasado y se clasifican como arenas y gravas cementadas con sales solubles. La investigación fue realizada en un infiltrómetro del laboratorio con un simulador de lluvia tanto de intensidad como pendiente variable. Primeramente se realizó un análisis con pendiente fija (36°) e intensidad variable de 61.9, 70.7, 106.0, 141.4 y 220.9 (mm/hr.) para los suelos de las tres quebradas. Luego se realizó un análisis con intensidad fija de 106 (mm/hr.) y pendiente variable de 28° , 36° , 46° y 52° . Los resultados muestran respecto a la influencia de la intensidad de lluvia con una pendiente fija de 36° , el aumento de la intensidad de lluvia para una pendiente fija trae como consecuencia un aumento en la velocidad del frente húmedo, sea cual sea el tipo de suelo. Respecto a la influencia de la pendiente con una intensidad fija de 106 (mm/hr.), la velocidad del frente húmedo se ve influenciado por la pendiente, aunque en menor medida que la intensidad, favoreciendo el flujo vertical en desmedro del flujo lateral dentro de la muestra.

Palabras claves: Transportabilidad de Suelos, Flujo de Detritos, Infiltración.

Abstract

This paper studies the effect of both the rain fall intensity and the slope on the speed of the wet front at the beginning of the surface flow in three ravines in the city of Antofagasta. The soil considered for the analysis comes from three ravines affected by flood events in the past and they are classified as gravels and sands cemented with soluble salts. The investigation was performed using a laboratory infiltrometer with a rain simulator that considered variations in both intensity and slope. Firstly an analysis with a fix slope (36°) and a variable intensity of 61.9, 70.7, 106.0, 141.4 y 220.9 (mm/hr.) was performed on the three soils from the ravines. Secondly, an analysis with fixed intensity (106 (mm/hr.) and variable slopes of 28° , 36° , 46° y 52° was performed. With respect to the case of fixed slope, results showed that the increase in the intensity lead to an increment in the wet front speed, independently of the type of soil. With respect to the case with fixed intensity, the wet front speed is affected by the slope but in a lesser extend compared to the previous case, making more favorable the vertical flow rather than the lateral flow in the specimen.

Keywords: Portability Soil, Debris Flow, Infiltration.

1. Introducción

Los fenómenos aluvionales en la ciudad de Antofagasta son objeto de estudio debido a los numerosos factores que participan en la generación de un fenómeno como éste. Ya en el pasado la ciudad de Antofagasta ha sufrido daños materiales y humanos significativos en varias ocasiones con la ocurrencia de flujos detríticos desencadenados durante eventos de precipitaciones poco comunes para la zona (por ejemplo Araya 1992, Vargas et al. 2000, Salazar 2005). Un aluvión es un flujo torrencial de agua con una enorme carga de detritos sólidos que avanza a través de un cauce seco o quebrada. Éste por lo general está asociado “a lluvias muy esporádicas, de corta duración y gran intensidad, cubriendo una zona reducida, con morfología empinada” (Hauser 1997). Es bien sabido que son dos los factores principales que afectan la transportabilidad de un suelo. El primero es la capacidad del suelo para permitir la infiltración de agua y el segundo es la capacidad del suelo de resistir el arrastre por agua e influye contribuyendo al proceso aluvial (Salazar 2014). El presente artículo estudia una variable antes que se genere el transporte del suelo por escurrimiento de agua, a saber la velocidad del frente húmedo. Dos factores que influyen en la velocidad del frente húmedo son la intensidad de lluvia y la pendiente del lecho. Mientras el suelo absorbe el agua que cae en formas de gotas, no se puede generar una película de líquido encima del suelo que podría producir el arrastre de partículas. Esta capacidad depende de la permeabilidad del suelo y también de la profundidad del estrato superficial hasta un estrato de suelo o roca con una permeabilidad menor (por ejemplo Salazar 2005, Salazar 2011, Sinaba et al. 2013, Salazar 2014).

2. Área de Estudio

Los suelos ensayados provienen de tres quebradas de la ciudad; Caracoles, Baquedano y Jardines del Sur (ver Figura 1). El proceso de selección se basó en cuatro factores. El primero referido a la morfología de la quebrada. El segundo factor referido al daño potencial que puede provocar un aluvión en función de la presencia de sectores urbanos dentro o en la desembocadura de la quebrada. El tercer factor considera el grado y tipo de activación para el aluvión de 1991. Finalmente se considera el material detrítico en la quebrada disponible para ser removido.

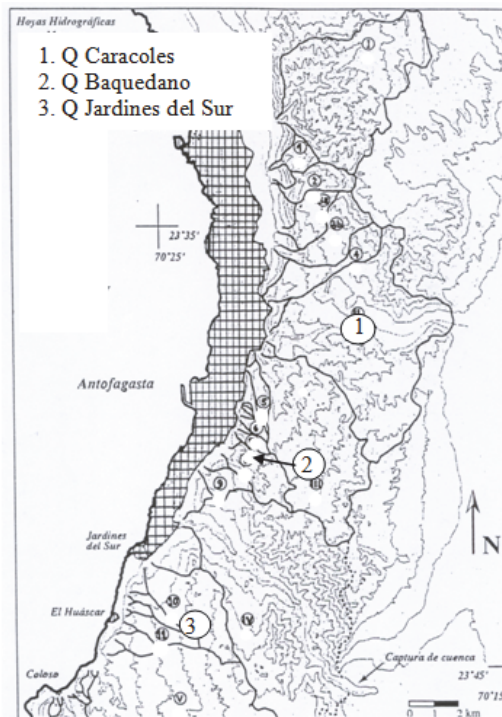


Figura 1. Ubicación de las tres quebradas del estudio (modificado de Vargas et al. 2000).

Las tres quebradas elegidas tienen morfologías distintas. Quebrada Caracoles es ancha, con varios tributarios y una pendiente central alta. Quebrada Baquedano es estrecha, tortuosa y con una pendiente alta. Quebrada Jardines del Sur es más abierta, con menos pendiente, pero también con bastantes curvas. Todas las quebradas tienen poblaciones importantes aguas abajo y en el caso de Baquedano existen casas en el cauce mismo. Las poblaciones aguas abajo de Caracoles y Baquedano son densas y con muchas estructuras de baja calidad, haciéndolas más vulnerables al daño por un aluvión. Bajo la quebrada de Jardines del Sur existen casas de alto valor y lógicamente de mayor calidad constructiva. Además la tubería principal que lleva agua potable a la ciudad pasa por la Quebrada Caracoles. Todas las quebradas elegidas participaron significativamente en el aluvión de 1991.

3. Metodología

Se desarrolló un infiltrómetro de laboratorio con simulador de lluvia y pendiente variable para ensayar muestras de suelo con varias intensidades de lluvias (Figura 2). Cuenta con una sección transversal rectangular (20cmx30cm), permitiendo el escurrimiento a través del sentido longitudinal al final del cual se instaló una compuerta móvil que permitiera recolectar el material escurrido. A la compuerta móvil se adaptó un receptáculo para poder medir el escurrimiento y la cantidad de suelo arrastrado por el agua (González 2001, Barrios 2002).

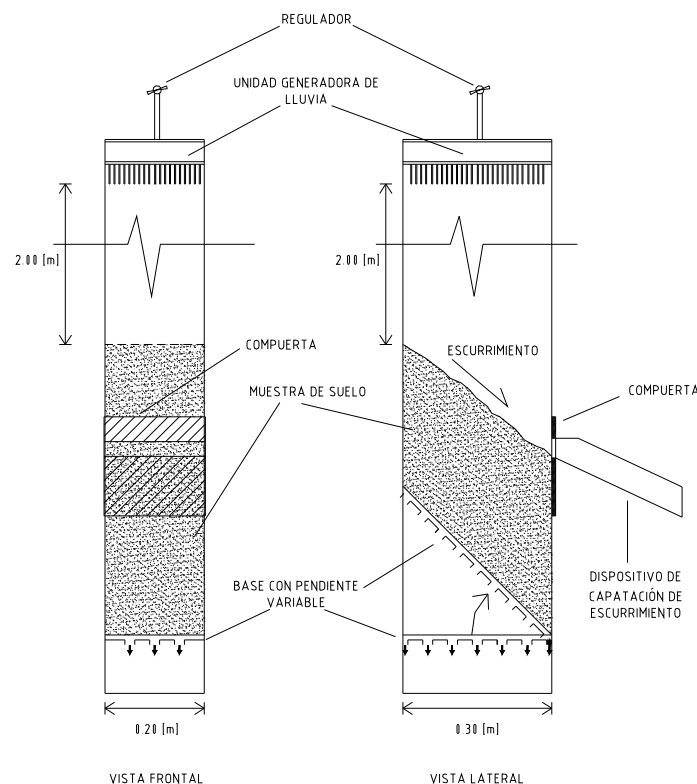


Figura 2. Diagrama del Infiltrómetro

Además se incorporó una base móvil pivoteada en la cara frontal del aparato, la que permite variar la pendiente de la muestra. La base tiene orificios para permitir la salida del aire con el avance del frente húmedo y después el agua del efluente. La unidad generadora de lluvia se compone de 551 de agujas hipodérmicas que producen gotas de 2,5mm diámetro con 1cm entre sí (González 2001). La altura de caída de gotas es 2m, lo que logra simular una velocidad de impacto de un 70% de la velocidad terminal (la velocidad con la cual gotas de lluvia llega a la tierra). La muestra de suelo es depositada en el infiltrómetro por simple vaciado y luego es apisonada en capas con una vara para lograr una densidad semejante a la encontrada in situ. En los casos en que la pendiente era muy

pronunciada fue necesario humedecer la muestra para que no se desarme al momento de poner en la posición inclinada. Se realizó un estudio paramétrico con el infiltrómetro sobre muestras de suelo de cada quebrada. Además del tipo de suelos, los parámetros variados fueron la intensidad de lluvia y la pendiente de la muestra. En cada ensayo se midió el avance del frente húmedo con respecto al tiempo.

El avance del frente húmedo se controló a través de medidas en las marcas laterales del infiltrómetro. Estas mediciones mostraron una dispersión que pudo deberse a la inclinación de la muestra, a la heterogeneidad del suelo o a la intensidad de lluvia. El frente húmedo mostró un comportamiento no uniforme en su avance. En cuanto al comportamiento propiamente tal del frente húmedo y su avance a través de la muestra, en las tres quebradas se observó un desarrollo más o menos constante en cada ensayo, obteniéndose velocidades de avance con poca variación durante los controles (cada 5 minutos). Los gráficos de las Figuras 3, 4 y 5 muestran que los ensayos con mayor velocidad del frente húmedo, de los presentados, para los suelos de las tres quebradas son aquellos con valor de intensidad más alto. Así mismo se aprecia que para intensidades iguales, la velocidad de infiltración es levemente mayor, sobre todo al principio, para aquellas muestras con mayor pendiente. Las mediciones se realizaron en las marcas manteniendo la verticalidad, independientemente de la pendiente de la muestra. Los gráficos de profundidad v/s tiempo fueron realizados con valores de profundidad promedio, por lo que se desprende que los valores de velocidad también son promedio.

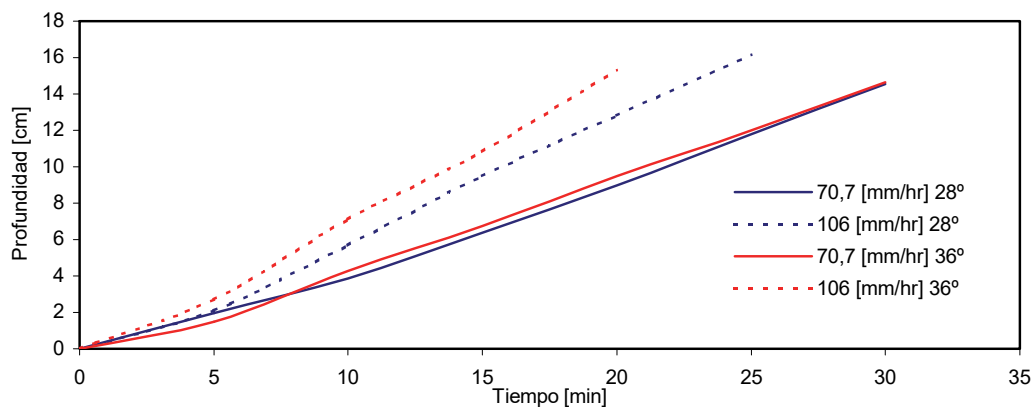


Figura 3. Profundidad del Frente Húmedo en el tiempo, Quebrada Baquedano.

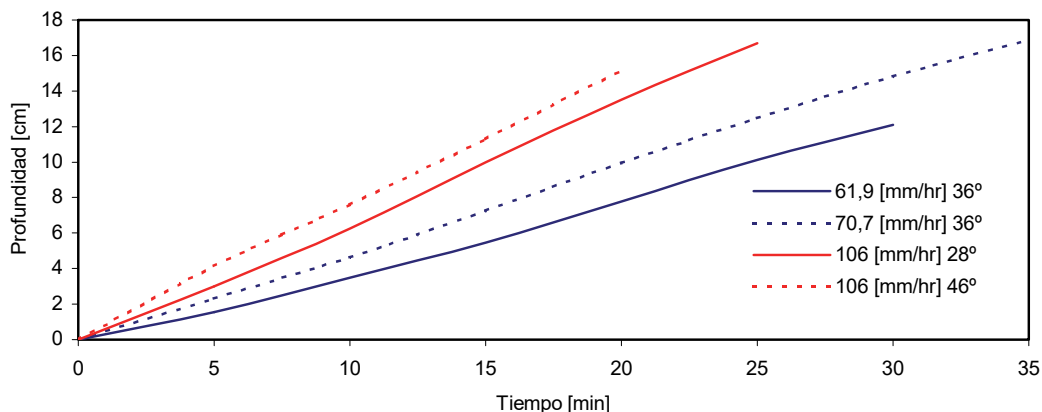


Figura 4. Profundidad del Frente Húmedo en el Tiempo, Quebrada Jardín del Sur.

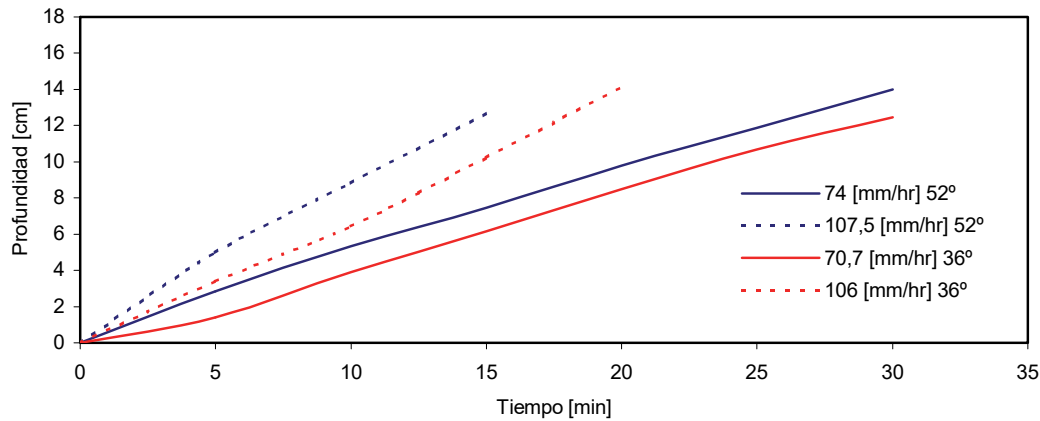


Figura 5. Profundidad del Frente Húmedo en el Tiempo, Quebrada Caracoles.

Se realizó un análisis con pendiente fija (36°) e intensidad variable en los suelos de las tres quebradas. Para la intensidad se consideraron los valores de 61.9, 70.7, 106.0, 141.4 y 220.9 (mm/hr.). En la Figura 6 se observa que las velocidades promedio de avance del frente húmedo para las tres quebradas presentan valores y comportamientos similares. A medida que la intensidad de lluvia aumentaba mayores eran las velocidades de avance. Cabe recordar que las velocidades fueron calculadas según el tiempo que tardó el agua en recorrer la muestra hasta antes de tocar la base del infiltrómetro. Lo anterior se relaciona con la ocurrencia del escurrimiento ya que si éste ocurre antes que el agua llegue a la base (o se realice la última medición) se verá afectado el flujo vertical dentro de la muestra disminuyendo la velocidad del frente húmedo.

En las quebradas Baquedano y Jardín del Sur el escurrimiento, cuando ocurrió, se produjo después del efluente. Sin embargo, en Caracoles sucedió lo contrario y su efecto se notó con mayor fuerza para la intensidad de 220.9 (mm/hr) donde la velocidad promedio del frente tuvo un valor notoriamente menor a las otras dos quebradas. Al revisar las densidades de cada quebrada podría haberse esperado que Baquedano ($\rho_s=1.71 \text{ gr/cm}^3$) tuviera la menor velocidad y Jardín del Sur ($\rho_s=1.57 \text{ gr/cm}^3$) la mayor, sin embargo esto no sucedió. Lo anterior se puede explicar a través de la granulometría de cada suelo, ya que Caracoles ($\rho_s=1.60 \text{ gr/cm}^3$) resultó tener un suelo bien gradado lo que significa que los huecos pueden ser llenados por las partículas más pequeñas lo que dificulta la infiltración y por ende el avance del frente húmedo, además la presencia de gravas ayudó a la retención del agua. Estas razones pueden ser la consecuencia de la velocidad ligeramente menor que presentó el frente húmedo de esta quebrada con respecto a las otras dos, que por su parte tienen suelos con granulometrías uniformes lo que incide en que sean mal gradados y que no haya partículas del tamaño y en la cantidad suficiente para llenar los huecos entre los granos.

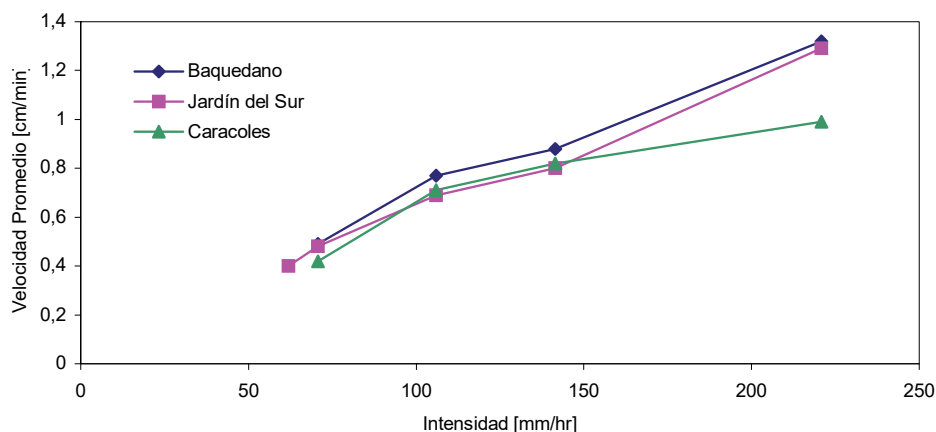


Figura 6. Velocidad promedio del frente húmedo v/s Intensidad de lluvia (pendiente 36°).

Se realizó también un análisis con intensidad fija de 106 (mm/hr) y pendiente variable en los suelos de las tres quebradas. Se utilizaron pendientes de 28°; 36°; 46° y 52°. La pendiente de 46° se tomó para completar la serie de ensayos de cuatro pendientes distintas, las otras corresponden a las pendientes representativas de Baquedano, Jardín del Sur y Caracoles respectivamente. En la Figura 7 se observa que las velocidades promedio de avance del frente húmedo para las tres quebradas, al igual que el caso con pendiente fija, presentan valores y comportamientos similares, con la diferencia que en esta ocasión el crecimiento de la velocidad fue menor. Sin embargo se mantuvo la tendencia de aumento de la velocidad a medida que la pendiente aumentó. De lo anterior se puede inferir que la pendiente influye en la velocidad del frente húmedo, esto es esperable ya que al tener un suelo horizontal o con pendiente cero el agua que ingrese a él tendrá un flujo vertical, pero además existirá un flujo lateral menor. Al aumentar la pendiente este flujo lateral tenderá a desaparecer en el sentido de la pendiente uniéndose al flujo vertical.

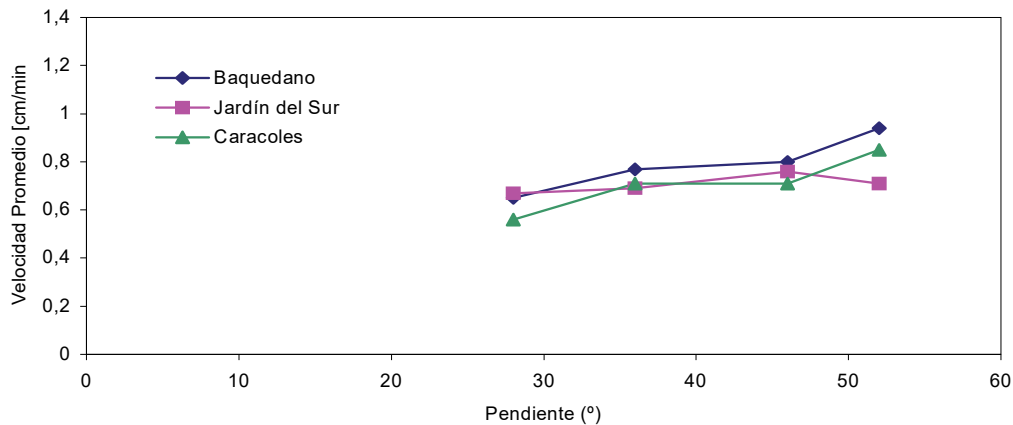


Figura 7. Velocidad promedio del frente húmedo v/s Pendiente (intensidad 106 mm/hr).

4. Conclusiones

Los resultados del trabajo experimental presentados en este artículo muestran que el aumento de la intensidad de lluvia para una pendiente fija trae como consecuencia un aumento en la velocidad del frente húmedo, sea cual sea el tipo de suelo. La granulometría de cada suelo también influye en la velocidad del frente húmedo aunque en menor medida que la intensidad. De hecho la ocurrencia del escurrimiento incide en que quebradas como Baquedano y Jardín del Sur, que tienen granulometrías semejantes entre ellas pero muy distintas a la de Caracoles, presenten velocidades de avance muy parecidas entre las tres. Lo anterior se puede explicar al ver que Caracoles resultó tener un suelo bien gradado lo que significa que los huecos pueden ser llenados por las partículas más pequeñas lo que dificulta la infiltración y por ende el avance del frente húmedo, además la presencia de gravas ayudó a la retención del agua. Estas razones pueden ser la consecuencia de la velocidad ligeramente menor que presentó el frente húmedo de esta quebrada con respecto a las otras dos, que por su parte tienen suelos con granulometrías uniformes lo que incide en que sean mal gradados y que no haya partículas del tamaño y en la cantidad suficiente para llenar los huecos entre los granos, lo que facilitaría el avance del frente. Todo esto sumado a la influencia de la densidad de cada suelo puede llevar a los valores de velocidad promedio del frente húmedo alcanzados. Con respecto a la influencia de la pendiente, manteniendo una intensidad fija, se aprecia que la pendiente influye en la velocidad del frente húmedo, aunque en menor medida que la intensidad, favoreciendo el flujo vertical en desmedro del flujo lateral dentro de la muestra. Es difícil estimar en qué porcentaje influye una u otra causa de las mencionadas, en el comportamiento del frente húmedo de cada quebrada debido que están muy relacionadas entre ellas. La granulometría de un suelo incide en la capacidad de infiltración de él y por consiguiente en la facilidad de acumulación de agua superficial con la posible ocurrencia de escurrimiento durante un evento lluvioso.

Referencias

1. ABDULJAUWAD, S. – AL-AMOUDI, O. (1995): “*Geotechnical behaviour of saline sabkha soils*”. Géotechnique, Institution of Civil Engineers, Vol. 45, N° 3, pp. 425-445.
2. AGUILERA, M. (1994): “*Zonificación geotécnica de suelos de Antofagasta*”. Tesis de Título. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile.
3. ALONSO, E. – GENS, A. (1994): “*On the mechanical behaviour of arid soils*”. In Proc. of the 1st International Symposium on Engineering Characteristics of Arid Soils, P. G. Fookes & R. H. G. Parry (eds.), London, U.K., pp. 173–205.
4. ARAYA, V. (1992): “*Riesgo de aluviones perjudiciales en las quebradas de la costa de la II Región*”. Tesis de Título. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile.
5. BARRIOS, C. (2002): “*Estudio del escurrimiento superficial de agua sobre taludes de suelo y su aplicación a fenómenos aluviales en Antofagasta*”. Tesis de Título. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile.
6. GONZÁLEZ, L. (2001): “*Estudio de la infiltración de agua en suelos de Antofagasta y su aplicación en la generación de aluviones*”. Tesis de Título. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile.
7. JEUFFROY, G. (1977): “*Proyecto y construcción de carreteras*”. Tomo II, Materiales, Maquinaria, Técnicas de Ejecución de Obras. Editores Técnicos Asociados, S.A., Barcelona, España. ISBN 48-7146-111-0.
8. NORMA CHILENA OFICIAL NCh 165 Of 77. “*Áridos para morteros y hormigones – tamizados y determinación de la granulometría*”. Instituto Nacional de Normalización, Chile.
9. NORMA CHILENA OFICIAL NCh 1516 Of 79: “*Mecánica de suelos – Determinación de la densidad en el terreno – Método del cono de arena*”. Instituto Nacional de Normalización, Chile.
10. PINTO, J. (2002): “*Clasificación de los suelos de tres quebradas de Antofagasta en términos de su transportabilidad por el agua*”. Tesis de Título. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile.
11. VARAS, P. (1999): “*Metodología de estudio sobre escurrimiento superficial en los suelos de Antofagasta dado un evento lluvioso*”. Tesis de Título. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile.
12. SALAZAR, I. (2005): “*Estudio técnico del aluvión del 18 de Junio de 1991 en Antofagasta. Caso de algunas quebradas*”. Tesis de Título. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile.
13. SALAZAR, I. (2011): “*Beitrag zur Verringerung der Schadstoffkonzentration in heterogenen porösen Medien*”. Tesis doctoral, RWTH Aachen University, Alemania.
14. SALAZAR, I. (2014): “*Sobre la transportabilidad de suelos en quebradas en Antofagasta y su influencia en el inicio de un evento aluvional*”. Obras y Proyectos, n.16, pp. 42-48. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-28132014000200003&script=sci_arttext
15. SINABA, B. – BECKER, B. – WIEBKE, C. – SALAZAR, I. – SCHÜTTRUMPF, H. (2013): “*On the proceeding of a saturation front under ponded conditions*”. Obras y Proyectos, n.13, pp. 31-39. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-28132013000100003&lng=en&nrm=iso&tlng=en
16. VARGAS, G. – ORTLIEB, L. – RUTLLANT, J. (2000): “*Aluviones históricos en Antofagasta y su relación con eventos El Niño/Oscilación del Sur*”. Rev. geol. Chile, vol.27, n.2, pp. 157-176. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0716-02082000000200002