

Sobre la transportabilidad de suelos en quebradas en Antofagasta y su influencia en el inicio de un evento aluvional

On the soil erosion in ravines of Antofagasta and its influence on the onset of a mudflow event

Fecha de entrega: 29 de julio 2014

Fecha de aceptación: 11 de noviembre 2014

Iván Salazar

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica del Norte, Avda. Angamos 0610, Antofagasta, Chile, isalazar@ucn.cl

El presente artículo presenta los resultados de un estudio experimental sobre la transportabilidad de partículas de suelo por el arrastre de agua en las primeras etapas de un evento lluvioso. El suelo en consideración proviene de tres quebradas de la ciudad de Antofagasta que fueron afectadas por eventos aluviales en el pasado y se clasifican como arenas y gravas cementadas con sales solubles. El trabajo se compone de un estudio paramétrico realizado en un infiltrómetro del laboratorio con un simulador de lluvia de intensidad variable y con una pendiente de la muestra de suelo también variable. Así se pudo estudiar el efecto de la pendiente y la intensidad de lluvia sobre el progreso del frente húmedo al bajar por el suelo, la cantidad de agua escurrida, y la cantidad y granulometría del material arrastrado por el agua. También se analizó para los tres suelos en estudio tanto la granulometría como su densidad in situ, antes y después de agregar agua, para así investigar el efecto que tendría el agua sobre el arreglo de las partículas al producirse la disolución de la cementación de sal. Los resultados muestran que la granulometría del suelo puede afectar a dos aspectos de la transportabilidad del suelo. Primero afecta la capacidad de infiltración del suelo, es decir, si el agua de lluvia infiltra o escurre encima. Segundo, si el agua escurre, la granulometría determina si el arreglo de partículas puede resistir las fuerzas de arrastre. El estudio muestra, dentro de los rangos considerados, que la pendiente no afectó mucho la generación de escurrimiento ni la cantidad de material arrastrada.

This article presents the results of an experimental study on the transportability of soil particles by runoff water in the early stages of a rainfall event. The soil under consideration comes from three ravines in the city of Antofagasta known to have been affected by detritus flow events in the past and made up of mainly cemented sands and gravels with soluble salts. A parametric study was carried out using a laboratory infiltrometer with a rain simulator with variable intensity and a soil sample also with a variable slope. With this apparatus it was possible to analyse the effect of rain intensity and slope on the progress of the wetting front, the quantity of runoff and the quantity and grading characteristics of the soil removed by the runoff. Also analysed were the grading characteristics of the soil from each ravine and their in situ densities before and after the addition of water, in order to study the changes that this can induce on the arrangement of particles when dissolution of the salt cement occurs. The results show that the grading of a soil can affect two principal aspects of its transportability. Firstly, the grading affects the capacity for infiltration of the soil and the occurrence of runoff. Secondly, it affects the in situ soil structure which in turn affects the resistance of the particles against drag forces exerted by the runoff. The study also shows that within the ranges considered, the angle of the slope did not affect the generation of runoff nor the quantity of material removed.

Palabras claves: transportabilidad de suelos, flujo de detritos, infiltración

Keywords: soil transportability, debris flow, infiltration

Introducción

La ciudad de Antofagasta en el Norte Grande de Chile 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 (Araya, 1992; Vargas *et al.*, 2000; Salazar, 2005). Debido al clima desértico del Norte de Chile y por lo tanto una ausencia casi total de vegetación para proteger los taludes, este fenómeno se genera en lugares ubicados en una pendiente fuerte. La topografía de la ciudad también colabora para la generación de aluviones. La ciudad sube abruptamente del mar hacia la cordillera de la costa que está cortada transversalmente con una serie de quebradas (Vargas *et al.*, 2000).

El presente artículo estudia una variable en la generación de un aluvión que es el transporte del suelo por escurrimiento de agua. Esto ocurre cuando la tasa de agua que entra en el suelo supera la tasa de infiltración máxima del mismo. En este momento, cuando el agua empieza a escurrir sobre el suelo y, dependiendo de las fuerzas de interacción entre las partículas de suelo y el agua, la situación puede convertirse en un evento aluvional.

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. 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 (ver por ejemplo, Salazar, 2005, 2011; Sinaba *et al.*, 2013).

El segundo factor es la capacidad del suelo de resistir el arrastre por agua e influye contribuyendo al proceso aluvial una vez que se sobrepase la capacidad de infiltración y el agua empieza a escurrir sobre la superficie. Existen varios parámetros que influyen en la capacidad de las partículas de suelo de permanecer en su lugar original y para suelos no cohesivos la mayoría de ellos depende de aspectos relacionados con la granulometría.

Los suelos de Antofagasta son, en general, arenas o gravas limosas cementadas con sales solubles y tienen un contenido de humedad muy bajo, o nulo (Aguilera,

1994). La introducción de agua en tales suelos cambia significativamente las propiedades mecánicas de los mismos (Alonso y Gens, 1994). Dicho cambio es en parte debido a la disolución de las sales de cementación, lo que produce una reducción en la resistencia de las partículas a ser arrastradas por el agua. Esta llega primero en forma de gotas y luego en forma de una capa de agua que pasa por encima del suelo saturado juntándose con agua que escurre desde las partes rocosas arriba con poca capacidad para infiltración.

Otro cambio posible con la introducción de agua en suelos cementados con sales solubles es que las sales precipitadas ocupan espacios dentro de la matriz de suelo y la disolución de ellas provoca un incremento en el índice de vacíos e y un subsecuente aumento en la permeabilidad si las partículas no pueden acercarse (Abduljawwad y Al-Amoudi, 1995). Al acomodarse las partículas, se espera por una parte que se produzca un aumento en la densidad del suelo y una reducción en la permeabilidad y por ende en la capacidad de infiltración. Por otra parte es de esperar un aumento en la resistencia de las partículas a ser transportadas por el agua. Se estudian tres quebradas de la ciudad de Antofagasta y se analizan las características de sus suelos que pueden afectar su susceptibilidad de ser transportados por el agua al inicio de un evento lluvioso. El estudio se compone de un trabajo experimental basado en ensayos de infiltración en el laboratorio con simulador de lluvia y pendiente variable. También se incluye una clasificación de una selección de suelos de la ciudad en términos de la granulometría y arreglo de partículas in situ.

El área de estudio

Los suelos ensayados provienen de tres quebradas de la ciudad: Caracoles, Baquedano y Jardines del Sur (Figura 1). El proceso de selección consideró cuatro factores. En primer lugar está la morfología, es decir, el tamaño, forma y pendiente de la quebrada. En segundo lugar está el daño potencial que puede provocar un aluvión, por ejemplo la presencia de poblaciones dentro o en la desembocadura de la quebrada. En tercer lugar está el grado y tipo de activación para el aluvión de 1991. Finalmente se considera el material detrítico en la quebrada disponible para ser removido.

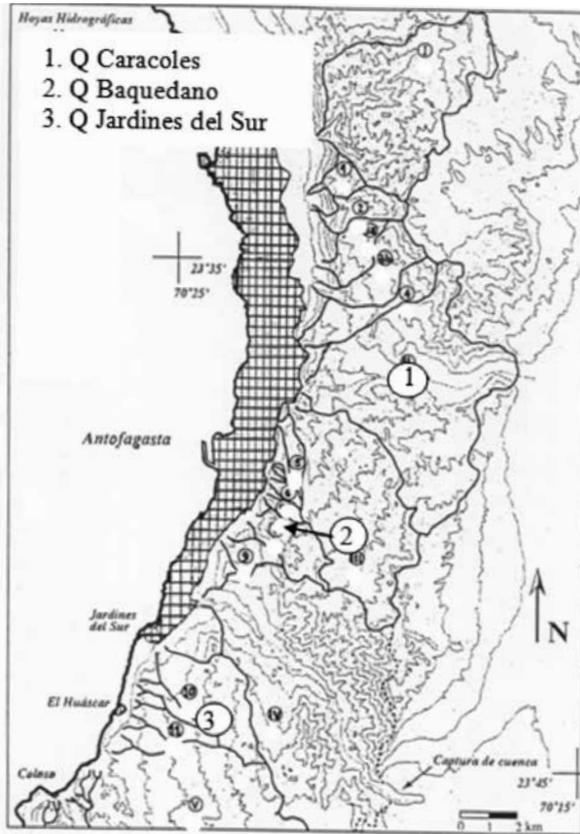


Figura 1: Ubicación de las tres quebradas del estudio (modificado de Vargas *et al.*, 2000).

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. Debajo de 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.

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 de 20 cm x 30 cm, permitiendo el escurrimiento a través del sentido longitudinal al final del cual se instaló una compuerta móvil que permite recolectar el material escurrido y puede estar siempre al nivel de la superficie de la muestra, adaptándose a la socavación producto del paso del agua. A la compuerta móvil se le adapta un receptáculo para poder medir el escurrimiento y la cantidad de suelo arrastrado por el agua. Con esto se determina la granulometría de este material y se puede comparar con la granulometría de la muestra original.

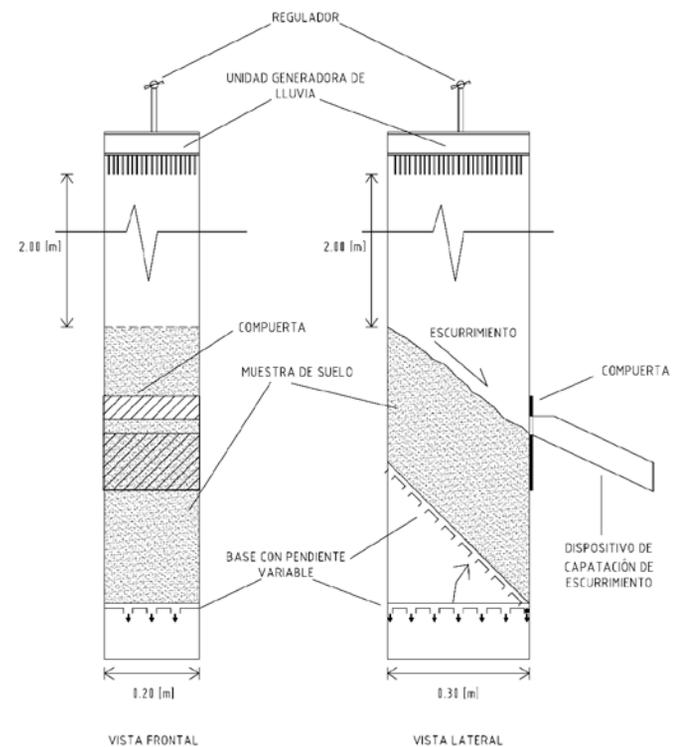


Figura 2: Diagrama del infiltrómetro

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 agujas hipodérmicas que producen gotas de 2.5 mm diámetro separadas 1 cm entre ellas. La altura de caída de las gotas es de 2 m, lo que logra simular una velocidad de impacto de un 70% de la velocidad terminal (la velocidad con la cual gotas de lluvia llegan a la tierra).

Se deposita cuidadosamente la muestra de suelo en el infiltrómetro tratando de mantener la estructura original y

intensidad (Figura 5a). El periodo de tiempo para el inicio del escurrimiento fue significativamente más corto en el caso de la quebrada de Caracoles, que en las quebradas Baquedano y Jardines del Sur. Los tiempos de estos últimos fueron semejantes aunque en el caso de Baquedano el escurrimiento no se inició sino hasta que se aplicó una intensidad de 141 mm/hr.

Este valor es interesante de analizar, por una parte y de acuerdo a los antecedentes del evento aluvional de 1991 (Varas, 1999; González, 2001; Barrios, 2002; Pinto, 2002; Salazar, 2005) existió una precipitación inicial con intensidad de 5 mm/hr, la primera hora y media, y al término de la lluvia, después de 2.5 hr, se registraron 42.5 mm, hecho que descarta una precipitación con intensidad única y que daría lugar a por lo menos 10 minutos de lluvia con intensidad de 141 mm/hr, para explicar el escurrimiento. Por otra parte no se ha considerado el hecho que la parte alta de Quebrada Baquedano está compuesta por afloramientos rocosos, que generaron escorrentía superficial hacia el cauce principal y que de alguna manera aceleraron la formación de escurrimiento en la quebrada sin la necesidad de tener una intensidad de lluvia tan elevada. El caudal promedio de escurrimiento (Figura 5b) aumentó con la intensidad de precipitación, siendo mayor en el caso de Caracoles y semejante para Baquedano y Jardines del Sur.

La Figura 5a también muestra el tiempo de inicio del efluente, es decir, cuando el frente húmedo llega al fondo del infiltrómetro y se puede suponer que la muestra de suelo está saturada. Se podría comparar este momento in situ con la llegada del frente húmedo al estrato rocoso. La Figura 5b muestra el caudal del efluente a partir de este momento. El agua empezó a escurrir sobre el suelo de Caracoles antes que el frente húmedo llegase al fondo y el caudal de escurrimiento excedió al del efluente. Mientras en los otros dos casos el escurrimiento ocurrió después y el caudal efluente siempre se mantuvo mayor que el caudal de escurrimiento.

La variación entre las quebradas en los resultados anteriores se puede explicar considerando la capacidad de infiltración de los suelos. Pareciera que en el caso de Baquedano y Jardines del Sur mientras existe drenaje libre, con las intensidades y condiciones consideradas en este estudio, no ocurriría escurrimiento. No obstante el efecto

de la llegada del frente húmedo al fondo del infiltrómetro y la restricción al flujo que esto podría implicar es suficiente para iniciar escurrimiento, aunque la cantidad de agua entrando en el suelo es mayor que la que escurre.

El comportamiento del suelo de Caracoles sugiere que tenga menos capacidad para infiltrar agua y se evidencia por el hecho que escurre más agua de la que infiltra. En parte esto se podría explicar al estudiar las granulometrías de los tres suelos y, como se mencionó antes, el de Caracoles es bien gradado, lo que implica un arreglo más denso y por lo tanto una permeabilidad menor.

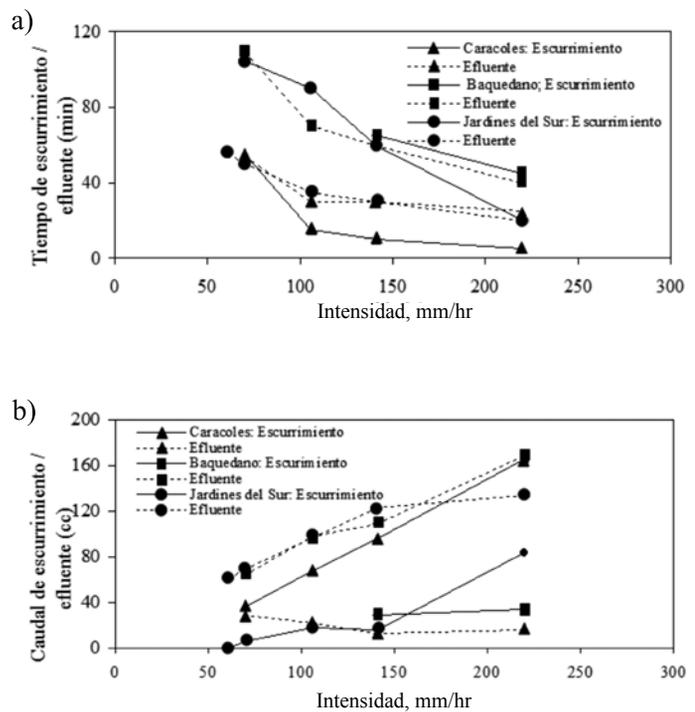


Figura 5: Escurrimiento y efluente versus intensidad de lluvia para una pendiente de 36°, a) tiempo y b) caudal

Las Figuras 6a y 6b muestran los resultados de los ensayos de infiltración con pendiente variable. De los datos determinados es difícil llegar a una conclusión sobre el efecto de la pendiente. De los gráficos se puede concluir que con esta intensidad y dentro del rango de pendientes ensayados, la pendiente no tiene un efecto significativo. No obstante en un evento lluvioso real, en todas las quebradas llegaría más agua al cauce principal en forma de escurrimiento, lo que no se puede modelar en el laboratorio debido a la falta de infiltración sobre las cimas rocosas de los cerros. Esto es especialmente relevante en el caso de Quebrada Baquedano, donde existe mucha roca sin capa de suelo. Notar los altos valores de pendiente ensayados,

incluso por sobre 50°, estos valores se consideraron debido a la existencia de algunos sectores de quebradas muy empinadas.

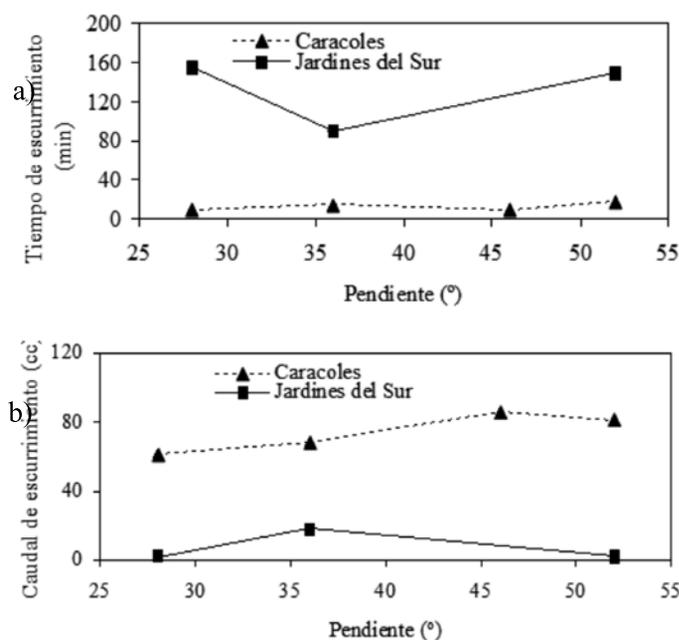


Figura 6: Escurrimiento superficial versus pendiente para una intensidad de 106 mm/hr, a) tiempo y b) caudal

La Figura 7 muestra el peso del material arrastrado para los ensayos de pendiente fija de 36° graficado en función del volumen total de agua escurrida durante cada ensayo. En el caso de Baquedano y Jardines del Sur se ve que menos agua escurrió pero se arrastró más suelo que en el caso de Caracoles. Esto muestra que un suelo bien gradado como el de Quebrada Caracoles no permite tanta infiltración, sin embargo su arreglo in situ denso impide el arrastre de partículas.

La Figura 8 muestra las granulometrías del material arrastrado durante un ensayo de infiltración (pendiente 36°, intensidad 141 mm/hr). Se ve que el suelo arrastrado de Baquedano y Jardines del Sur es un poco más fino que el suelo original, pero en los dos casos la curva granulométrica mantiene la misma forma. El suelo arrastrado de Caracoles es significativamente más fino y por lo tanto el material no es tan bien gradado como el original.

La Figura 9 muestra las granulometrías del material arrastrado del suelo de Jardines del Sur con intensidad variable y pendiente 36°. Se aprecia que la granulometría es más gruesa para el ensayo de 220 mm/hr, mientras que los ensayos de intensidad menor muestran escurrimientos de partículas más finas.

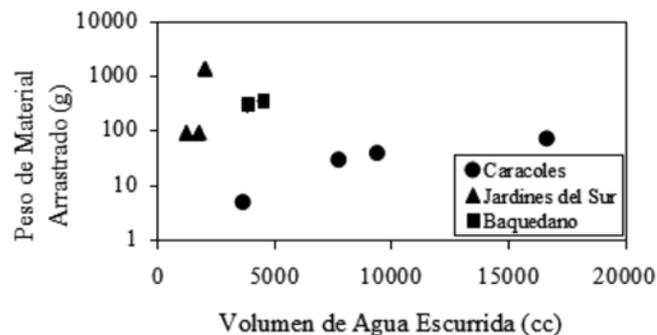


Figura 7: Peso de material arrastrado por volumen de agua escurrida

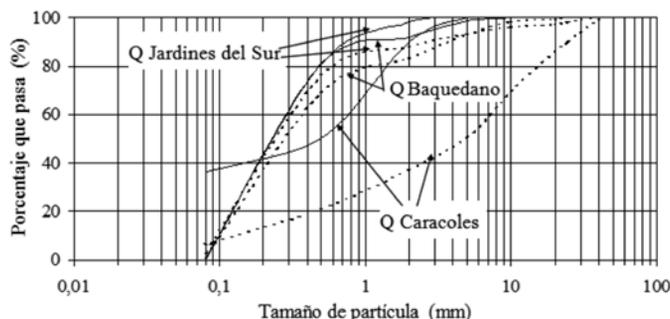


Figura 8: Granulometrías del material arrastrado en los ensayos de infiltración con pendiente 36° e intensidad de precipitación de 141 mm/hr. La línea punteada indica la curva granulométrica original, mientras que la línea continua indica la curva granulométrica de suelo arrastrado

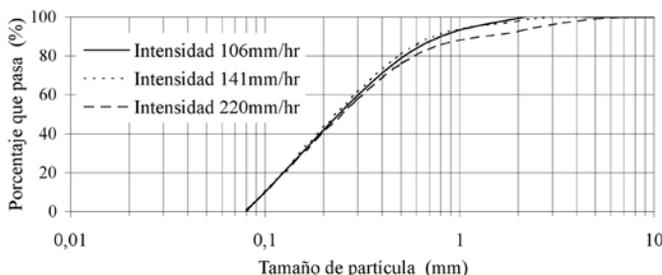


Figura 9: Granulometrías del material arrastrado en los ensayos de infiltración sobre el suelo de los Jardines del Sur con pendiente 36°.

La Figura 10 compara las granulometrías del suelo de Caracoles con pendiente e intensidad variable. Con menor pendiente no se nota tanto la diferencia entre las granulometrías arrastradas debido a las distintas intensidades, como en el caso del suelo de Jardines del Sur. Pero al aumentar la pendiente, además de arrastrar partículas de mayor tamaño, también aumenta la diferencia en la granulometría de material escurrido debido a distintas intensidades.

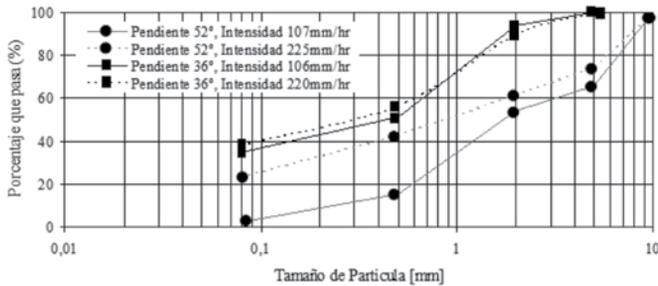


Figura 10: Granulometrías del material arrastrado en los ensayos de infiltración sobre el suelo de Caracoles con pendiente e intensidad de precipitación variable

Conclusiones

Los resultados del trabajo experimental presentados en este artículo muestran que la granulometría de un suelo puede afectar significativamente su transportabilidad. Por un lado un suelo bien gradado tiene menos capacidad para infiltrar agua debido a su arreglo denso y por lo tanto el agua escurre rápidamente encima del suelo aunque no todo el estrato esté saturado. Un suelo mal gradado tiene una capacidad mayor para infiltrar agua y el inicio de escurrimiento puede depender de la profundidad de un estrato con permeabilidad más baja, como el estrato rocoso. No obstante una vez que se inicia el escurrimiento, el agua puede dislocar las partículas de suelo más fácilmente.

La pendiente no afectó de manera significativa el inicio del escurrimiento ni el caudal de escurrimiento pero sí afectó la granulometría del material arrastrado. Con mayor pendiente el escurrimiento arrastra partículas mayores.

Referencias

Abduljawwad, S. and Al-Amoudi, O. (1995). Geotechnical behaviour of saline sabkha soils. *Géotechnique* 45, Nº 3, 425-445

Aguilera, M. (1994). *Zonificación geotécnica de suelos de Antofagasta*. Tesis de título. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile.

Alonso, E. and Gens, A. (1994). On the mechanical behaviour of arid soils. In *Proceedings of the 1st International Symposium on Engineering Characteristics of Arid Soils*, Fookes and Parry (eds.), London, U.K., 173-205

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.

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.

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.

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.

Norma Chilena Oficial NCh 165 Of 77. *Áridos para morteros y hormigones – tamizados y determinación de la granulometría*. Instituto Nacional de Normalización INN, Chile.

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 INN, Chile.

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.

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.

Salazar, I. (2011). *Beitrag zur Verringerung der Schadstoffkonzentration in heterogenen porösen Medien*. Doctoral thesis, RWTH Aachen University, Germany

Sinaba, B., Becker, B., Wiebke, C., Salazar, I. and Schüttrumpf, H. (2013). On the proceeding of a saturation front under ponded conditions. *Obras y Proyectos* 13, 31-39

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.

Vargas, G., Ortlieb, L. y Rutllant, J. (2000). Aluviones históricos en Antofagasta y su relación con eventos El Niño/Oscilación del Sur. *Revista Geológica de Chile* 27, No.2, 157-176