



Revista de la Construcción

ISSN: 0717-7925

revistadelaconstruccion@uc.cl

Pontificia Universidad Católica de Chile  
Chile

SANHUEZA, C.; PALMA, J.; VALENZUELA, P.; ARANEDA, O.; CALDERÓN, K.  
Evaluación del comportamiento geotécnico de suelos volcánicos chilenos para su uso como material  
de filtro en la depuración de aguas residuales domésticas  
Revista de la Construcción, vol. 10, núm. 2, abril, 2011, pp. 66-81  
Pontificia Universidad Católica de Chile  
Santiago, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127622720007>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

*"Evaluation of the  
geotechnical behavior of  
Chilean volcanic soils as  
filter material for domestic  
water treatment"*

# Evaluación del comportamiento geotécnico de suelos volcánicos chilenos para su uso como material de filtro en la depuración de aguas residuales domésticas



## Autores

- SANHUEZA, C. Pontificia Universidad Católica de Chile
- PALMA, J. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
- VALENZUELA, P. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
- ARANEDA, O. Pontificia Universidad Católica de Chile
- CALDERÓN, K. Pontificia Universidad Católica de Chile

Fecha de recepción 3/4/2010

Fecha de aceptación 10/7/2011

## Resumen

Existen investigaciones realizadas en Chile que han permitido concluir que determinados suelos, que han sido depositados a lo largo de los años como producto de la actividad volcánica, pueden considerarse aptos para ser empleados como material de filtro en la depuración de aguas residuales domésticas. Estos suelos han estado siendo estudiados por investigadores de la Universidad de Chile, quienes han logrado definir las principales características de los suelos volcánicos chilenos más importantes y, de acuerdo a las propiedades estudiadas, tales como porosidad, área superficial y densidad,

entre otras, han permitido suponer que estos materiales presentan un adecuado comportamiento como filtro de aguas. Como resultado de esta investigación se ha podido, por una parte, complementar la información geotécnica que existe sobre suelos volcánicos chilenos, tales como su conductividad hidráulica y, por otra, se ha podido evaluar la influencia de algunos parámetros de diseño, tales como el espesor de capa del suelo volcánico y la tasa de aplicación del agua residual, en la depuración de aguas residuales domésticas.

**Palabras clave:** Suelos Volcánicos; Permeabilidad; Filtros

## Abstract

*Investigations carried out at Chile have determined that certain soils placed over the years as a product of the volcanic activity can be suitable for use as filter material in domestic wastewater purification. These soils have been studied by Universidad de Chile researchers, who have defined the main characteristics of the most important Chilean volcanic soils and, according to the properties studied (such as porosity, surface area and*

*density, among others) have alleged that these materials exhibit water filter behaviour. As results of this research, first of all, the existing geotechnical information on Chilean volcanic soils has been complemented, such as hydraulic conductivity and, has been evaluating the influence design parameters, such as thickness of volcanic soil layers and the application rate of wastewater, in the purification of domestic wastewater.*

**Keys words:** Volcanic Soils; Permeability; Filters

## 1. Introducción

En Chile, de acuerdo al censo del año 2002, aproximadamente el 14% de la población total vive en zonas rurales que carecen, en muchos casos, de redes de alcantarillado público que permitan el saneamiento de las aguas residuales domésticas (ARD) y que, por lo tanto, deben buscar soluciones adecuadas a su realidad.

Actualmente, la mayoría de las soluciones tienen por objeto que los efluentes sean vertidos en cauces superficiales o en el propio terreno. En este último caso, el suelo se considera como etapa final del tratamiento, actuando como un filtro biológico, en el que el desarrollo de los fenómenos químicos, físicos y bioquímicos logran la depuración de las aguas vertidas, cuya calidad dependerá de las características del suelo, del agua residual y de la tasa de aplicación de dicha agua.

Existen investigaciones realizadas en la Universidad Católica de Valparaíso que han permitido concluir que determinados suelos, que han sido depositados a lo largo de los años como producto de la actividad volcánica que hay en Chile, pueden considerarse aptos para ser empleados como material de filtro en la depuración de ARD, específicamente, aquellas obtenidas a partir de fosas sépticas.

Estos suelos han estado siendo estudiados por investigadores de la Universidad de Chile, quienes han logrado definir las principales características de los suelos volcánicos chilenos y, de acuerdo a las propiedades estudiadas, tales como porosidad, área superficial y densidad, entre otras, han permitido suponer que estos materiales presentan un adecuado comportamiento como filtro de aguas.

Sin embargo, hay propiedades geotécnicas de estos suelos que aún no han sido investigadas, tales como su conductividad hidráulica, que junto a otras variables, como el espesor de capa y tasa de aplicación del ARD, influyen en la definición de un filtro de suelo volcánico chileno empleado para depurar ARD.

## 2. Suelos volcánicos de Chile

En Chile existe un gran número de volcanes considerados geológicamente activos, donde la actividad volcánica desarrollada durante siglos ha permitido la formación y depositación de grandes cantidades de cenizas volcánicas, generando importantes superficies de terreno derivados de este tipo de materiales.

Los suelos derivados de cenizas volcánicas poseen propiedades particulares que los hacen ser considerados diferentes a otros materiales. Estas propiedades se originan debido a la presencia dominante en la arcilla de un conjunto de minerales no cristalinos y paracristalinos que condicionan su comportamiento y utilización.

En Chile, los suelos derivados de materiales volcánicos representan entre el 50% y 60% del total de suelos arables que hay en el país (Tosso, 1985), concentrándose en forma importante entre las regiones Metropolitana y Décima.

### 2.1 Cenizas volcánicas

Las cenizas volcánicas son fragmentos finos de roca volcánica, con un tamaño de partículas inferior a 2 mm de diámetro. Están compuestas fundamentalmente por vidrio volcánico, que al descomponerse genera partículas con tamaños inferiores a 0,08 mm (arcillas y limos). Estas partículas son denominadas alofanas e imogolitas, las cuales son responsables de algunas propiedades singulares que caracterizan el comportamiento de estos suelos (Wesley, 1998), especialmente, cuando se encuentran en presencia de agua. Los suelos formados por cenizas volcánicas son geotécnicamente conocidos como suelos alofánicos (Paredes & Verdugo, 2004).

En Chile, los suelos alofánicos cubren una importante superficie de terreno, alcanzando aproximadamente 3.757.000 hectáreas, de las cuales el 89% corresponde a suelos Trumaos y el resto a Ñadis (Hermosilla & Cárdenas, 2007).

El tamaño variado, la gran cantidad de poros, la estructura atómica amorfa y la textura finamente dividida, son entre otras características, las que permiten explicar la rapidez en el proceso de alteración del vidrio volcánico, formando los componentes de alteración con predominio de las partículas antes mencionadas, alofán e imogolita (Flórez et al., 2006).

Estudios realizados a partículas de alofán muestran dos posibles morfologías: una en forma esférica y la otra en forma de toro de revolución, con una pequeña abertura (Paterson, 1977). La principal característica de estas estructuras es que permiten que el agua ingrese al interior de las partículas, quedando adherida por enlaces atómicos de la misma manera en que el agua se adhiere a la superficie exterior. Por otro lado, pueden quedar moléculas de agua enlazadas en las aberturas producidas por la estructura de los alofanas.

Respecto a las partículas de imogolita, su morfología fibrosa permite formar una especie de telar tejido, el cual también permite el paso del agua tanto en la parte interior de los tubos, como entre ellos quedando esta adherida en la superficie.

De esta manera, los suelos volcánicos presentan un comportamiento geomecánico diferente al tradicional. Entre ellos, que poseen una gran capacidad de retención de agua, humedades naturales elevadas, bajas densidades secas, elevados ángulos de fricción y cambios en su estructura dependiendo del tipo de secado empleado (Paredes & Verdugo, 2004; Hermosilla & Cárdenas, 2007).

## 2.2 Procesos de formación de suelos volcánicos

Los depósitos de cenizas volcánicas, como resultado de la intensa actividad volcánica, son un caso especial no fácil de asociar a los procesos clásicos de erosión, en los cuales se comienza con la desintegración de la roca y se produce un progreso vertical hacia abajo. Esto se debe, entre otras razones, a que los depósitos de cenizas volcánicas forman una serie de perfiles o capas a partir de erupciones que van conformando vastas áreas con buen drenaje. Con esto, el proceso de erosión puede así continuar sucediendo a grandes profundidades, simplemente, debido a que los depósitos de cenizas volcánicas profundos han sido sometidos a procesos erosivos por períodos de tiempo más largos que aquellos que se encuentran más próximos a la superficie (Little, 1969).

Estos materiales se encuentran dentro del grupo de suelos residuales, por lo que su comportamiento queda definido por su estructura, el tamaño de las partículas y la mineralogía de las arcillas presentes. Por otro lado, estos materiales pueden ser agrupados según la clasificación propuesta por Little (1969), según su perfil de erosión. Sin embargo, esta clasificación presenta ciertas desventajas, dentro de las cuales se encuentra el que no es posible correlacionar sus propiedades con la de otros suelos dentro de la misma clasificación.

Según la agrupación de suelos propuesta por Little (1969), las cenizas volcánicas se encuentran dentro de un subgrupo correspondiente a suelos residuales fuertemente influenciados por minerales arcillosos especiales, no encontrados dentro de los suelos sedimentarios.

Los minerales arcillosos presentes en este tipo de depósitos corresponden a un caso inusual, como es el alofán, el cual presenta una estructura del tipo amorfo y partículas con una débil estructura cristalina.

## 2.3 Características del trumao

El Trumao se define como un suelo alofánico, con presencia de partículas de alofán, imogolita y varios filosilicatos, en el cual predominan arcillas no cristalinas o paracristalinas. Es de color café amarillento y su clasificación USCS corresponde a MH, limo de alta compresibilidad, a pesar de presentar características de arcilla. Se estima su edad entre 500 y 20.000 años.

Corresponde a un suelo muy común en la depresión intermedia de las regiones ubicadas en el sector centro-sur de Chile, abarcando una superficie aproximada de 3.334.000 ha, con origen y formación de carácter volcánico.

Todos los suelos volcánicos ubicados en esta zona tienen por origen materiales piroclásticos que incluyen cenizas de carácter basáltico-andesítica, arenas, pómex, o bien, provienen de la retransportación de estos materiales. Estos suelos corresponden a la edad Cuaternaria y, en el caso del Trumao, al volcanismo Würm o post-Würm.

Para el caso de la zona centro-sur de Chile, estos suelos se formaron por la abundante actividad volcánica, junto a las acciones glaciales del Pleistoceno, con lo que remodeló en gran forma el paisaje de la zona. Se suma a lo anterior la potente acción lahárica.

En síntesis, los principales factores que han influido en su formación, han correspondido a la gran cantidad de precipitaciones en la zona; al relieve; al pH, el cual debe estar dentro de un rango comprendido entre 4,6 y 7,6 para que el vidrio volcánico pueda descomponerse en partículas de alofán e imogolita (Parfitt et al., 1989); al grado de percolación; a la topografía; y, a la temperatura, entre otras.

En este suelo se pueden distinguir tres horizontes, cada uno con características particulares:

- Horizonte A: espesor de capa mínima de 0,80 m. Colores muy oscuros debido al alto porcentaje de carbón orgánico (8 a 40%). Texturas francas.
- Horizonte B: estructura de débil desarrollo, la profundidad a la cual se encuentra fluctúa en 1 o más metros. Su color es pardo amarillento oscuro. Consta de una textura franca o franca limosa o arcillosa, el carbón orgánico alcanza concentraciones que están alrededor de un 2 a un 5%.
- Horizonte C: es muy similar al horizonte B, con la diferencia que presenta menor o nula actividad biológica y la concentración de carbono orgánico resulta ser de un 0,5 a un 2%.

De acuerdo a sus propiedades, es considerado un buen material para utilizar como filtro. Sin embargo, esta positiva calidad se ve opacada debido a que presenta diversos problemas químicos (Rojo, 2004).

## Propiedades geotécnicas del suelo volcánico: trumao

El Trumao es un suelo muy poroso, con densidades aparentes bajas pero que se va incrementando con la profundidad. En estado seco se comporta de manera muy esponjosa, mientras que en condiciones húmedas, de forma grasa y jabonosa. Es característico de estos suelos tener un pH cercano a 5,6 (Ellies *et al.* 1993).

### 3.1 Propiedades físicas

A partir de ensayos realizados en terreno, se pudo comprobar que la densidad natural seca es del orden de 0,89g/cc, con una humedad natural del 77% y una densidad húmeda de 1,52g/cc.

Los ensayos llevados a cabo para esta investigación, arrojaron como resultado un valor de límite líquido igual a 50 y un índice de plasticidad de 16.

Algunos suelos residuales sufren cambios irreversibles dependiendo del método de secado empleado en laboratorio, tal como lo comprobaron los investigadores Paredes y Verdugo (2004) al estudiar el comportamiento geomecánico de algunos suelos del sur de Chile. Esto es particularmente cierto cuando los materiales contienen alofán o halocita.

Con respecto a la presencia de alofán, las partículas arcillosas con contenidos de humedad natural pueden tener un comportamiento plástico, mientras que al ser secados en horno, pueden sufrir un cambio en su estructura y no se comporten plásticamente. Este aspecto fue estudiado por investigadores de la Universidad de Chile, concluyendo que el secado al horno y al sol alteraba la estructura original del suelo, modificándose significativamente los límites de Atterberg y la densidad Proctor (Paredes & Verdugo, 2004).

Los resultados obtenidos del análisis granulométrico, en conjunto con los resultados de los límites de Atterberg, permiten clasificar el suelo como MH.

Respecto al peso específico de los sólidos, muestras de suelo volcánico extraídas de la zona sur de Chile para esta investigación y, tras la aplicación de la norma

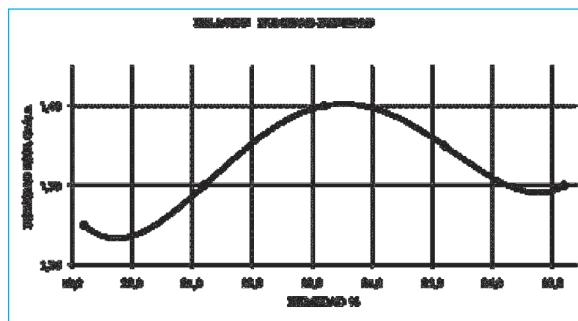
chilena NCh1532Of.80, arrojaron como resultado un valor de 2,47g/cc.

En cuanto a la permeabilidad de los suelos residuales, esta es generalmente mayor que en el caso de suelos sedimentarios. Esto se debe a las características microestructurales que presentan las partículas de arcillas y su estructura abierta. Sin embargo, su permeabilidad puede ser drásticamente disminuida por efecto del remoldeo y la compactación de la probeta, las cuales tienden a romper dicha estructura.

### 3.2 Propiedades mecánicas y de compactación

La determinación de la densidad Proctor se llevó a cabo según la norma NCh1534/2Of.2008, la cual establece consideraciones especiales para los suelos con presencia de partículas de alofán. La DMCS de este material corresponde a 1,40g/cc, para una humedad óptima de compactación del 24% (figura 1).

**Figura 1** Curva compactación Proctor suelo volcánico Trumao



Respecto a los parámetros de resistencia al corte del Trumao, se tienen valores para el ángulo de fricción de 43,3°; mientras que, para la cohesión se indica un valor muy bajo, llegando a 0t/m², dando como consecuencia una aproximación a un suelo tipo arenolimososo más que a una arcilla (Paredes & Verdugo, 2004).

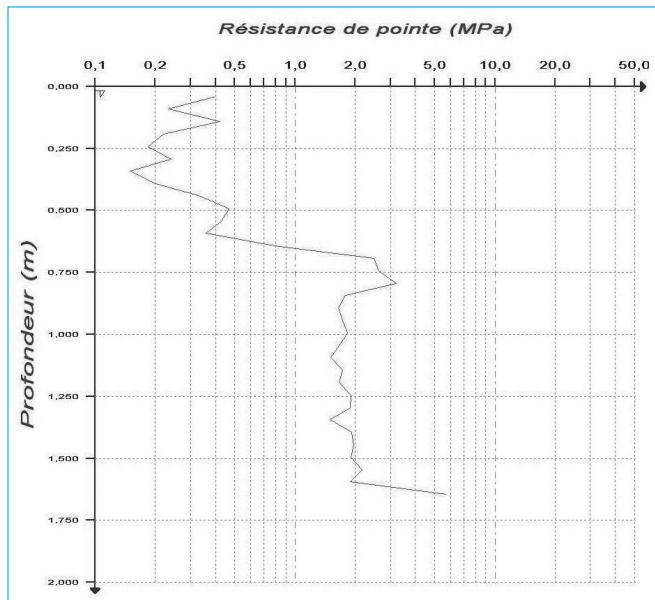
En cuanto a la resistencia a la torsión, Ellies *et al.* (1995), utilizaron una veleta de torsión en condiciones saturadas para lograr determinar la resistencia que este suelo presenta a la torsión. Su principal conclusión es que la resistencia a la torsión disminuye a medida que aumenta la profundidad de este suelo, lo cual puede deberse al aumento de los poros de drenaje

lento en desmedro de la disminución de los poros de agua útil que son de menor tamaño.

Por otro lado, previo a la extracción de muestras en terreno para efectuar los ensayos de esta investiga-

ción, se llevó a cabo un ensayo PANDA (Pénétromètre Autonome Numérique Dynamique Assisté) [NF P 94-105], el cual corresponde a un ensayo de penetración dinámica, cuyos resultados se muestran en la figura 2.

**Figura 2** Resistencia a la penetración por punta del suelo volcánico Trumao



La resistencia del suelo volcánico en función de la profundidad, ha permitido comprobar los distintos horizontes encontrados durante la exploración del terreno. Se observa que la resistencia de punta es baja, oscilando entre 0,15 y 6 MPa. La mayor resistencia se registra a 1,625 m de profundidad. En la tabla 1 se presenta un resumen con las principales propiedades físicas, mecánicas y de compactación del suelo volcánico conocido como "Trumao".

**Tabla 1** Parámetros físicos, mecánicos y de compactación del Trumao

Propiedad	Valor
%Finos Densidad seca	70% 0,89g/cc
Humedad natural	77%
Límite líquido	50
Índice de plasticidad	16
DMCS	1,40g/cc
%Wópt	24%
Resistencia a la penetración (qd)	0,15 a 6 MPa

Nota: Todos los resultados han sido obtenidos a partir de ensayos en terreno y en laboratorio normalizados por normas chilenas o extranjeras, efectuados a muestras de suelo volcánico (Trumao) ubicadas en un sector a 54 kilómetros de la ciudad de Chillán.

## Estimación de la permeabilidad

La conductividad hidráulica de un suelo es una propiedad no siempre constante, ya que depende de la estructura del suelo y de las condiciones en que este se encuentre (Hillel, 1998; Hartge y Horn, 1999). Además, si se considera la compleja geometría de los poros, se obtiene como resultado un complicado trabajo para establecer una relación entre textura y propiedades hidráulicas del suelo.

Esta propiedad varía entre un material y otro de manera significativa, siendo los suelos granulares los que presentan mayor permeabilidad, mientras que los arcillosos, la menor. Por otra parte, los andisoles como el caso del Trumao, tienen una alta conductividad hidráulica a bajas tensiones, debida, principalmente, a su gran cantidad de macroporos y distribución uniforme (Ellies & Vyhmeister, 1981). Sin embargo, a altas tensiones estos suelos mantienen una alta conductividad hidráulica (Allies & Vyhmeister, 1981).

Existe una amplia gama de métodos para determinar las características hidráulicas del suelo en campo o en laboratorio, incluso, a partir de correlaciones empíricas. Los métodos de campo permiten la determinación *in situ* de las características hidráulicas, pero presentan dudas sobre el volumen de muestra real necesaria. Las técnicas de laboratorio requieren más preparación de la muestra, pero permiten mayor número de medidas y mejor control de las condiciones experimentales. La mayoría de las técnicas tienen rangos específicos de aplicabilidad con respecto al tipo y a la saturación del suelo (Van Genuchten, 1980; Klute, 1986).

### 4.1 Métodos para determinar la conductividad hidráulica en laboratorio

En laboratorio se pueden efectuar dos pruebas para determinar la permeabilidad de un material: la prueba de carga constante (materiales de grano grueso) y la prueba de carga variable (materiales finos).

La prueba de carga constante se basa en mantener el suministro de agua de manera tal, que la diferencia entre la carga de entrada sea igual a la de salida en todo momento del ensayo. Una vez establecida la tasa constante de flujo, el agua es recolectada en una probeta graduada durante cierto tiempo. El valor de la permeabilidad,  $k$ , queda definida como:

$$k = \frac{QL}{Aht} \quad (1)$$

Donde:  $k$ , Coeficiente de permeabilidad (cm/s);  $Q$ , Volumen total de agua (cc);  $L$ , Distancia que debe recorrer el fluido al interior de la masa del material (cm);  $A$ , Área de la sección transversal de la muestra (cm<sup>2</sup>);  $h$ , Pérdida de carga hidráulica (cm);  $t$ , Tiempo en el cual se recoge el agua (s).

En la prueba de carga variable se considera una diferencia inicial de carga  $h_1$  en el tiempo  $t = 0$ . A continuación, se permite que el agua fluya a través del material, de manera que la diferencia final de carga en el tiempo  $t_2$  sea igual a  $h_2$ . De este modo, la tasa de flujo  $q$  del agua, a través del material en cualquier tiempo se expresa por:

$$q = k \frac{h}{L} A = -a \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

A partir de la ecuación (2) se obtiene el coeficiente de permeabilidad bajo este método, como:

$$k = 2,303 \frac{aL}{At} \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \quad (3)$$

Donde:  $k$ , Coeficiente de permeabilidad (cm/s);  $a$ , Área de la sección transversal de la probeta (cm<sup>2</sup>);  $L$ , Distancia que debe recorrer el fluido al interior de la masa del material (cm);  $A$ , Área de la sección transversal de la muestra (cm<sup>2</sup>);  $t$ , Tiempo en el cual se recoge el agua (s);  $h_1$ , Carga hidráulica en el punto 1 (cm);  $h_2$ , Carga hidráulica en el punto 2 (cm).

Por otro lado, la norma ASTM "Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter" (ASTM, 2000) permite determinar la conductividad hidráulica de materiales con poros saturados usando un permeámetro de paredes flexibles.

Este método es aplicable a un flujo de agua unidimensional y laminar, donde la masa de suelo debe encontrarse 100% saturada y se asume válida la ley de Darcy.

La permeabilidad de la muestra de suelo queda definida como:

$$k = \frac{a^* L}{A^* \Delta t} \ln \left( \frac{h_1}{h_2} \right) \quad (4)$$

Donde  $a^*$  es el área de la sección transversal de la probeta graduada que se encarga de entregar agua al suelo (m<sup>2</sup>);  $y$ ,  $\Delta t$  es el tiempo que demora en producirse la diferencia de las cargas hidráulicas  $h_1$  y  $h_2$ .

La ecuación (4) es aplicable según la definición del método B de dicha norma al caso en estudio, ya que se cumple que existe una presión constante aguas abajo.

Otra alternativa, se basa en la propuesta de Reynolds & Elrick (1985), quienes plantearon la siguiente ecuación:

$$K_{fs(RyE)} = \frac{Q \cdot C}{2 \cdot \pi \cdot H^2 + \pi \cdot a^2 \cdot C + 2 \cdot \pi \cdot H / \alpha^*}$$

En este caso, Q representa el caudal de infiltración en ( $L^3/T$ ); H, el nivel de agua en el agujero de infiltración en (L); C, corresponde a un factor de forma adimensional; a, es el radio del pozo de infiltración; y,  $\alpha^*$ , es un parámetro que caracteriza el efecto de la zona no saturada del suelo en (1/L).

Se debe tener en cuenta que cuando el suelo se encuentra con alto porcentaje de humedad no representará un flujo en condiciones no saturadas. Por lo que en este caso el valor puede resultar poco representativo.

Por otro lado, el valor que se le asigna a  $\alpha^*$  es una estimación, lo que puede conllevar a ciertas imprecisiones.

Glover (Luna, 2003), por otra parte, fue uno de los primeros en desarrollar un método que permitiera definir de manera analítica el caudal de infiltración, considerando en este caso solo el flujo debido al gradiente de presión tanto en las paredes como en el fondo de la perforación, considerando todo el suelo alrededor del pozo como totalmente saturado.

$$K_{fsG} = \frac{Q \cdot C}{2 \cdot \pi \cdot H^2} \quad (6)$$

En este caso Q representa el caudal de infiltración en ( $L^3/T$ ); H, el nivel de agua en el agujero de infiltración en (L); y, C; corresponde a un factor de forma adimensional.

Este modelo no considera el flujo producto de la acción de la gravedad (flujo gravitacional), por lo que proporciona valores demasiado altos cuando la altura de la carga hidráulica es baja. Por esta razón, y a partir de experiencias, se concluyó que a mayores alturas este modelo se ajusta mejor a la realidad.

Por otra parte, Laplace (Luna, 2003) propuso un método, que en comparación con el anterior, considera el flujo debido al gradiente de presión de las paredes y el fondo del pozo. Además, considera al suelo del contorno en condiciones totalmente saturadas:

$$K_{fsL} = \frac{Q \cdot C}{2 \cdot \pi \cdot H^2 + \pi \cdot a^2 \cdot C} \quad (7)$$

En este caso, Q representa el caudal de infiltración en ( $L^3/T$ ); H; el nivel de agua en el agujero de infiltración en (L); C; corresponde a un factor de forma adimensional y a es el radio del pozo de infiltración.

Para este modelo, la variabilidad de los resultados son menores con respecto al modelo de Glover.

#### 4.2 Métodos para determinar la conductividad hidráulica en terreno

Al igual que en laboratorio, se pueden llevar a cabo en terreno tanto pruebas de carga variable como de carga constante al interior de pozos o perforaciones. En el caso de pruebas de carga variables, estas pueden ser en régimen de carga variable creciente o decreciente.

En terreno también pueden llevarse a cabo pruebas sencillas, rápidas y de bajo costo, como es el caso del "Slug Test" y el método de "Porchet", muy común en la práctica chilena.

El método de Porchet (Espinoza, 2006) entrega un valor de infiltración global de la masa de suelo. Consiste en llenar de agua una cavidad y medir el descenso de la superficie libre, debido a la infiltración que se produce tanto por el fondo como por las paredes de la perforación. Esta capacidad de infiltración se determina a partir de las alturas de las cabezas hidráulicas, en dos instantes de tiempo predefinidos, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$f = \frac{R}{2(t_2 - t_1)} \ln \frac{2h_1 + R}{2h_2 + R} \quad (8)$$

Donde R es el radio de la excavación realizada para ejecutar el ensayo;  $h_1$  y  $h_2$  las alturas de agua para los tiempos  $t_1$  y  $t_2$ , respectivamente.

#### 4.3 Métodos empíricos para determinar la conductividad hidráulica

Conocidas son las relaciones empíricas propuestas por algunos autores, las cuales permiten estimar el coeficiente de permeabilidad de un material a partir de otras propiedades.

La mayoría de estas formulaciones están basadas en las características granulométricas del material y permiten

estimar de forma bastante aproximada, el valor de permeabilidad que es empleado en la etapa de diseño.

Hazen (1892, 1911) desarrolló una de las primeras fórmulas empíricas para determinar la permeabilidad de arenas saturadas, basada en el tamaño  $D_{10}$  del material y de un coeficiente empírico  $C_H$  denominado coeficiente empírico de Hazen. Normalmente, este coeficiente toma el valor de 100. La permeabilidad es obtenida mediante la siguiente formulación:

$$k = C_H \cdot D_{10}^2 \quad (9)$$

Hazen desarrolló esta fórmula para el diseño de filtros de arenas empleados para la purificación de agua, donde normalmente se emplean arenas limpias con un coeficiente de uniformidad  $C_u$  menor que 2 (Terzaghi y Peck, 1964). Muchos otros investigadores han definido valores para el coeficiente  $C_H$ , los cuales se encuentran en un rango entre 1 y 1000 (Taylor, 1942; Terzaghi y Peck, 1964; Lambe y Whitman, 1969; Das, 1997). Esta fórmula es generalmente limitada para  $0,01\text{cm} < D_{10} < 0,3\text{cm}$ .

La principal restricción que presenta esta fórmula, es que el coeficiente  $C_H$  ha sido definido para una temperatura del agua de  $10^\circ\text{C}$ , situación que limita su aplicabilidad para otras condiciones de temperatura.

Considerando esta condicionante, Kozeny (1927) y Karman (1938, 1956) desarrollaron una formulación semiempírica para predecir la permeabilidad en medios porosos, siendo posible incorporar valores de temperatura del agua distintos a  $10^\circ\text{C}$  y la granulometría completa del suelo, mediante la siguiente formulación:

$$k = \left(\frac{g}{\mu}\right) \cdot \left(\frac{1}{C_{k-c}}\right) \cdot \left(\frac{1}{S_0^2}\right) \cdot \left[\frac{e^3}{(1+e)}\right] \quad (10)$$

Donde: g, peso unitario del líquido; m, viscosidad del líquido;  $C_{k-c}$ , coeficiente empírico de Kozeny-Karman;  $S_0$ , superficie específica por unidad de volumen de partículas; e, razón de vacíos del suelo.

Cuando el líquido es agua ( $T^\circ = 20^\circ\text{C}$ ), la fórmula de Kozeny y Karman es igual a:

$$k = 1,99 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{1}{S_0^2}\right) \cdot \left[\frac{e^3}{(1+e)}\right] \quad (11)$$

En 1999, Arya *et al.* presentaron un método indirecto que busca relacionar la conductividad hidráulica,  $K(\theta)$ , en función del contenido de agua, con el valor de la conductividad hidráulica en condiciones saturadas ( $K_s$ ).

Según lo anterior, el cálculo de la conductividad hidráulica a un cierto contenido de agua  $K(\theta_i)$ , se resume en la siguiente fórmula:

$$K(\theta_i) = \frac{L}{A \Delta H} \sum_{j=1}^{j=i} Q_j, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

Donde: L, largo de la muestra;  $\Delta H$ , diferencia de cabeza hidráulica a través del largo de la muestra en dirección del flujo; A, área de la sección transversal del la muestra; y,  $Q_j$ , volumen de salida contribuido por la j-ésima fracción de poro.

Por otra parte, Schlichter (Angelone *et al.*, 2006) introduce a la fórmula de Hazen una corrección por compacidad (C) en función de la porosidad ( $\eta$ ):

$$k = 771 \cdot \frac{D_{10}^2}{C} \cdot (0,7 + 0,03t) \left(\frac{\text{cm}}{\text{seg}}\right) \quad (13)$$

**Tabla 2** Relación entre compacidad y porosidad (Angelone *et al.*, 2006)

$\eta$	0.26	0.38	0.46
C	83.4	24.1	12.8

Terzaghi, por su parte, considera una constante que toma en cuenta la porosidad y el tipo de material:

$$k = C_1 \cdot D_{10}^2 \cdot (0,7 + 0,03t) \left(\frac{\text{cm}}{\text{seg}}\right) \quad (14)$$

$$C_1 = C_0 \cdot \left(\frac{n - 0,13}{\sqrt[3]{1-n}}\right)^2 \quad (15)$$

Donde n es la porosidad del material; y,  $C_0$  es un coeficiente que dependerá del material, según la relación que se presenta en la tabla 3:

**Tabla 3** Valores de  $C_0$  según tipo de material (Angelone et al., 2006)

Material	$C_0$
Arena grano redondo	800
Arena grano anguloso	460
Arena con limos	< 400

Loudon establece una fórmula más compleja para determinar la permeabilidad:

$$\log_{10}(k \cdot S^2) = 1,365 - 5,15h \quad (16)$$

Donde  $h$  representa la porosidad;  $S$  la superficie específica, según tabla 4; y,  $k$  representa el coeficiente de permeabilidad a 10°C.

**Tabla 4** Valor de la superficie específica en función de la abertura del tamiz

Tamiz	Superficie específica
4 – 10	13.5
10 – 16	38.9
16 – 30	71.5
30 – 60	156.2
60 – 100	311
100 – 200	572

#### 4.4 Estimación de la permeabilidad del suelo volcánico Trumao

En la investigación se llevó a cabo una campaña de ensayos, tanto en terreno como en laboratorio, para estudiar el comportamiento y estimar la permeabilidad del suelo volcánico extraído de la zona centro-sur de Chile. Por otra parte, se pudo estimar la permeabilidad en función de algunas correlaciones y modelos empíricos encontrados en la bibliografía.

#### 4.4.1 Permeabilidad in situ

En terreno se llevaron a cabo dos ensayos de permeabilidad bajo carga constante, de 2,7 y 4 cm, obteniendo como resultado, tras aplicar el modelo de Reynolds & Elrick, un coeficiente de permeabilidad de  $6 \times 10^{-5}$  cm/s.

#### 4.4.2 Permeabilidad de laboratorio

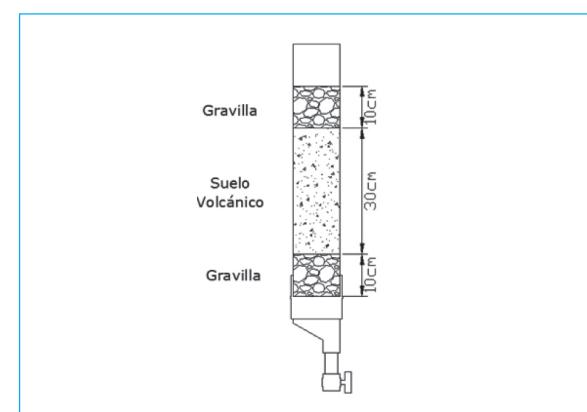
En laboratorio, se llevó a cabo un ensayo de permeabilidad bajo carga variable a una probeta de suelo volcánico, compactada al 95% del PM y con una humedad cercana a la humedad óptima, obteniendo como resultado un coeficiente de permeabilidad de  $8,74 \times 10^{-5}$  cm/s.

#### 4.4.3 Aplicación de modelos empíricos para estimar la permeabilidad

En laboratorio se confeccionó una probeta del mismo suelo volcánico empleado en la determinación de la permeabilidad de los dos casos anteriores, con el objeto de llevar a cabo un ensayo a escala para estimar la permeabilidad en función de los modelos empíricos antes descritos.

El diseño del modelo a escala consistió en la utilización de tubos de PVC de 110 mm de diámetro, unidos a una válvula y llave de paso que permitía la salida del agua. La altura total de la probeta fue de 50 cm (Figura 3).

**Figura 3** Modelo a escala de la probeta de suelo volcánico empleada en la determinación de la permeabilidad por modelos empíricos



Para llevar a cabo los ensayos se empleó agua destilada, la cual fue ingresada a la probeta en forma diaria, en la mañana y en la tarde.

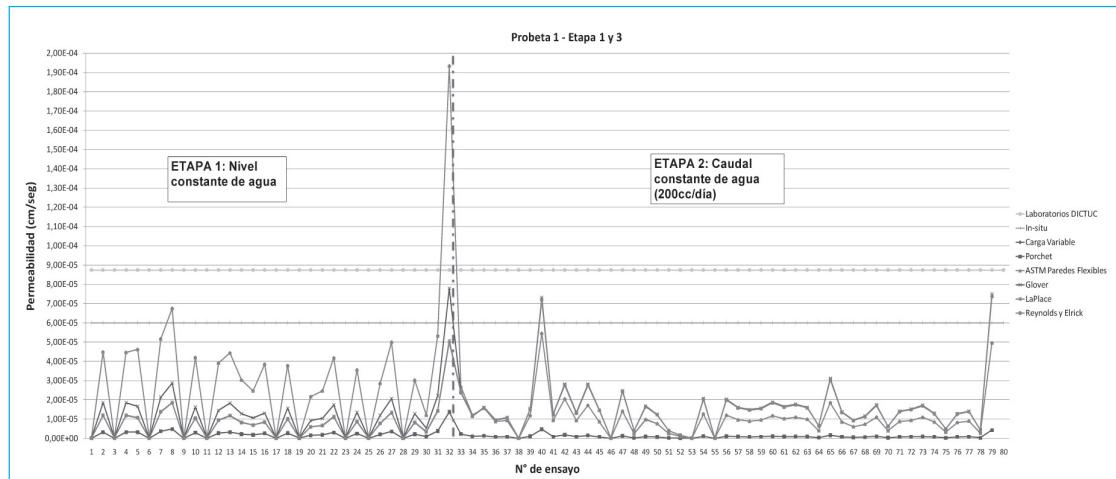
Terminado el periodo de ensayo, se procedió a calcular la permeabilidad del suelo siguiendo algunos de los métodos empíricos presentados anteriormente, cuyos resultados se muestran en la tabla 5. Para ello, se han considerado valores promedio de todos los obtenidos.

Los resultados obtenidos por los distintos métodos, han sido graficados y se muestran en la figura 4.

**Tabla 5** Valores de permeabilidad promedio según formulaciones empíricas

Método	k (cm/s)
Carga variable	2,47x10-5
Método de Porchet	1,80x10-6
Norma ASTM, 2000	2,47x10-5
Método de Glover	1,58x10-5
Método de LaPlace	1,35x10-5
Método de Reynolds & Elrick	1,33x10-5

**Figura 4** Variación de la permeabilidad por autor en las fases 1 y 3



A partir de los resultados graficados en la figura 4, se deduce que los valores de permeabilidad obtenidos a partir de los modelos propuestos por los autores Glover, LaPlace y Reynolds & Elrick, registrados en cada medición, siguen la misma tendencia. Por otro lado, se observa la misma situación entre los resultados obtenidos por la norma ASTM(2000) y el método de carga variable.

Respecto a los valores promedio obtenidos, se observa que ninguno se encuentra dentro del rango de variación de los valores de las pruebas de terreno y de laboratorio, existiendo algunas mediciones puntuales en las que el valor de k se sitúa dentro de ese rango.

## 5. Uso de suelos volcánicos chilenos en la construcción de filtros para depurar aguas residuales domésticas

Valenzuela et al. (2008), presentaron los primeros resultados sobre la efectividad de filtros de suelos volcánicos chilenos en la depuración de ARD, dejando algunas variables por estudiar, como la variación del espesor de la capa de suelo o la tasa de aplicación del agua residual.

## 5.1 Configuración del filtro de suelo volcánico (Trumao)

En laboratorio se confeccionaron cuatro probetas del mismo suelo volcánico empleado en la determinación de la permeabilidad, con densidades de compactación en torno al 95% de la densidad Proctor y humedad de compactación cercana a la óptima. En cada una de las probetas se varió tanto el espesor de la capa (E) como la tasa de aplicación del agua residual (K).

Los espesores de capa definidos fueron de 15 cm y 30 cm.

## 5.2 Definición de la tasa de aplicación del agua residual doméstica

En cuanto a los valores de las tasas de aplicación del agua residual doméstica, estas fueron definidas para una aplicación equivalente diaria de 50L/m<sup>2</sup>, lo que llevó a un resultado de 200 cc y otra de 220 cc, distribuidas en dos veces al día, cada una de 100 cc y 110 cc, respectivamente.

## 5.3 Metodología de ensayo en laboratorio y parámetros de calidad del agua residual

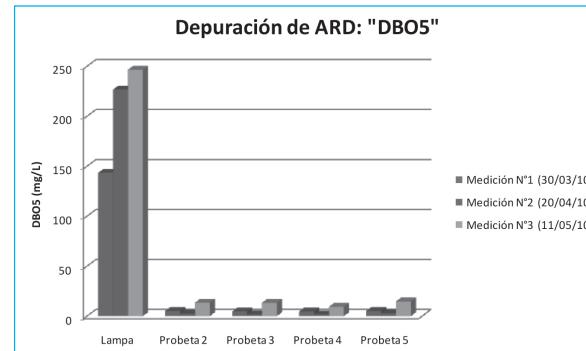
Para evaluar la efectividad del filtro, el agua residual empleada fue analizada antes y después del proceso de depuración, durante un periodo de tiempo aproximado de tres meses, con mediciones cada tres semanas. Los ensayos para medir los parámetros de calidad del agua fueron:

- Parámetros químicos orgánicos: DBO5
- Parámetros biológicos: Coliformes totales
- Parámetros físicos: Sólidos totales

## 5.4 Resultados obtenidos y análisis previo

En la figura 5 se observan los resultados obtenidos luego de la depuración del agua residual doméstica, empleando filtros de suelos volcánicos (Trumao), para el parámetro de calidad DBO5 en cada una de las tres mediciones efectuadas en el periodo de tiempo de la investigación a la fecha.

**Figura 5 Efectividad del filtro de suelo volcánico en la depuración del agua residual, en relación a la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5)**



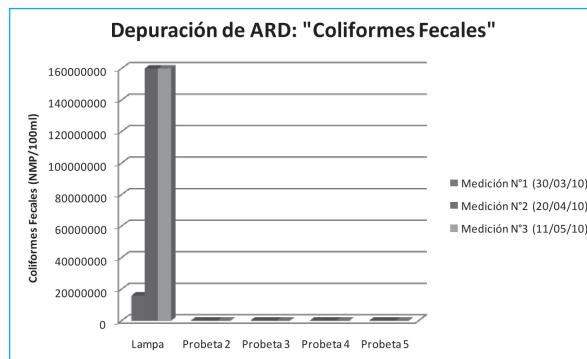
La efectividad de los filtros utilizando el suelo volcánico Trumao comprende valores en todas las mediciones iguales o superiores al 94% de depuración. Además, los promedios de las probetas suelen ser iguales o superiores al 95%.

En relación a la normativa, se han considerado valores de referencia internacional y posibles usos que se le puede dar en cada caso. De esta manera, la Directiva europea N°91/271 del 21 de mayo de 1991, contempla un valor máximo para este parámetro de 25mg/L, lo cual se cumple, ya que el valor más alto registrado por la mediciones de depuración hasta el momento fue de 14,7mg/L. Para la normativa venezolana, por ejemplo, con el Decreto N°883/1995, los límites se fijan para este parámetro en relación a la fuente receptora a la cual se depositará el ARD, en donde los valores se distribuyen de la siguiente manera: Ríos, estuarios, lagos, embalses y medio marítimo de 60mg/L, redes cloacales 350mg/L. En la normativa mexicana, con la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, se obtiene el valor límite de 30mg/L como el más restrictivo para ríos cuando se utiliza para la vida acuática.

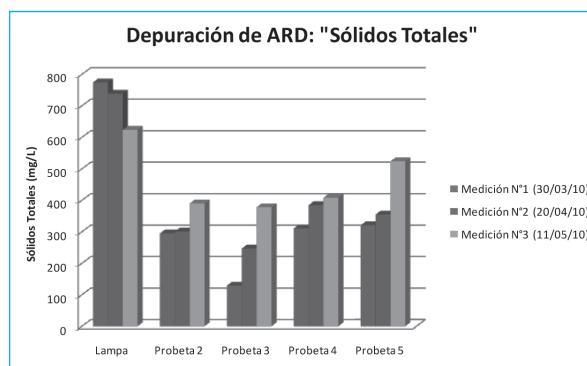
En la figura 6 se observan los resultados obtenidos luego de la depuración del agua residual doméstica, para el parámetro de calidad coliformes totales, observándose una efectividad en torno al 100%.

En relación a la normativa chilena, se establece en relación al parámetro coliformes totales, valores límites de 1000NMP/100ml, lo que claramente es cumplido de acuerdo a los resultados obtenidos (Decreto N°236/26: "Reglamento general de Alcantarillados Particulares, Fosas sépticas, Cámaras filtrantes, Cámaras de Contacto, Cámaras absorbentes y Letrinas Domiciliarias". Actualizado a Julio de 2004).

**Figura 6 Efectividad del filtro de suelo volcánico en la depuración del agua residual, en relación a la presencia de bacterias coliformes totales**



**Figura 7 Efectividad del filtro de suelo volcánico en la depuración del agua residual, en relación a la presencia de sólidos totales**



En la figura 7 se observan los resultados obtenidos luego de la depuración del agua residual doméstica, empleando filtros de suelos volcánicos (Trumao), para el parámetro de sólidos totales, en cada una de las tres mediciones efectuadas en el período de tiempo de la investigación a la fecha.

Al contabilizar los sólidos suspendidos y sólidos disueltos en un solo grupo general, que corresponde a los sólidos totales, es posible notar que la efectividad de los valores está en un rango muy amplio, entre 16% y 84%.

De acuerdo a los resultados obtenidos, es importante mencionar que los sólidos suspendidos tuvieron un mayor nivel de depuración que los sólidos disueltos, ya que los valores de los primeros parámetros alcanzan efectividades mayores al 90%.

Dos variables medidas fueron la influencia del espesor de la capa de suelo volcánico y la tasa de aplicación del agua residual doméstica, en la calidad de la depuración del agua.

Para los casos en que el espesor es de 15 cm, se refleja una leve alza en los valores al aplicar una tasa de agua residual de 550 cc, mientras que la depuración es mejor cuando se aplican 500 cc en las probetas. De esta manera, los mejores resultados se obtienen con la combinación de probetas de altura 15 cm y tasa de aplicación de 500 cc, para el parámetro DBO5.

En relación al parámetro coliformes totales, para los casos en que el espesor es de 15 cm, se refleja una leve alza en los valores al aplicar una tasa de agua residual de 550 cc, mientras que la depuración es mejor cuando se aplican 500 cc en las probetas. De esta manera, los mejores resultados se obtienen con la combinación de probetas de altura 15 cm y tasa de aplicación de 500 cc, para el parámetro coliformes totales.

En relación al parámetro sólidos totales, para los casos en que el espesor es de 30 cm, se refleja una leve alza en los valores al aplicar una tasa de agua residual de 550 cc, mientras que la depuración es mejor cuando se aplican 500 cc en las probetas. De esta manera, los mejores resultados se obtienen con la combinación de probetas de altura 30 cm y tasa de aplicación de 500 cc, para el parámetro sólidos totales.

## 6 Conclusiones

Como resultado de esta investigación se ha podido, por una parte, complementar la información geotécnica que existe sobre suelos volcánicos chilenos, tales como su conductividad hidráulica y, por otra, se ha podido evaluar la influencia de algunos parámetros de diseño, tales como el espesor de capa del suelo volcánico y la tasa de aplicación del agua residual, en la depuración de aguas residuales domésticas. De esta manera, las tres principales conclusiones en relación a los objetivos planteados son:

La permeabilidad del suelo volcánico conocido como Trumao, de acuerdo a los distintos métodos empleados, tales como ensayos de laboratorio, ensayos de terreno y pruebas con modelos a escala, sugieren un rango de variación entre  $1,33 \times 10^{-5}$  y  $8,74 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ . Este rango queda acotado de la siguiente manera:

Pruebas de laboratorio y terreno	$k = 6 \times 10^{-5}$ a $8,74 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$
Aplicación de métodos empíricos a modelos a escala	$k = 1,33 \times 10^{-5}$ a $2,47 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$

La variación del espesor de suelo volcánico influye en el nivel de depuración de determinados parámetros de calidad del agua. De esta manera, probetas de 15 cm de espesor de Trumao, proporcionan mejores resultados de depuración en relación a los parámetros DBO5 y coliformes totales, respecto a las probetas de 30 cm de espesor de Trumao.

La variación de la tasa de aplicación del agua residual, 500 cc/día respecto de 550 cc/día, para todos los parámetros de calidad medidos, sugieren que tras la aplicación de 500 cc/día, se obtiene una mejor depuración del agua residual doméstica.

## Referencias

1. Angelone, S. et al. (2006), "Geología y Geotecnia – Permeabilidad de Suelos". Universidad Nacional del Rosario, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura.
2. Arya, L.M et al. (1999), "Scaling Parameter to Predict the Soil Water Characteristic from Particle-Size Distribution Data" SOIL SCI. SOC. AM. J. (63) mayo-junio 1999.
3. Arya, L.M et al. (1999), "Relationships between de Hydraulic Conductivity Function and the Particle-Size Distribution". SOIL SCI. SOC. AM. J. (63) septiembre-octubre 1999.
4. ASTM, D2434-68. (2000), "Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head)".
5. ASTM, D5084-00. (2000), "Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of satured porous materials using a flexible wall permeameter".
6. Besoain, E. et al. (2000), "Mineralogía y génesis de algunos suelos de cenizas volcánicas de Chiloé continental, Chile".
7. Consejo de las comunidades europeas CEE (1991), Directiva N° 91/271: "Sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas". Bruselas, Bélgica, pp. 133.
8. Das, B. M. (1997) "Advanced soil mechanics". Taylor & Francis, Washington D.C.
9. Dirección Nacional de Vialidad, Chile. (2008), "Suelo: Método para determinar la Granulometría, LNV 105", sección 8.102.1. Manual de Carreteras.
10. Ellies, A. et al. (1993b), "Modificaciones estacionales en la distribución del espacio poroso por tamaño de un suelo sometido a un variado uso forestal", Bosque 14(2): 31-36.
11. Ellies, A. (1995), "Efecto del manejo sobre las propiedades físicas de suelos trumao y rojo arcillosos". Universidad Austral de Chile. Bosque 16(2): 101-110.
12. Ellies, A. y Vyhmeister, E. (1981), "Algunos aspectos hídricos del horizonte superficial de tres tipos de suelos del sur de Chile." Agro Sur. 9(2): 94–100.
13. Espinoza C., Carlos. (2006). "Apuntes Curso CI51J Hidráulica de Aguas Subterráneas y su Aprovechamiento". Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
14. FAO (Food and Agric. Organization). (1968), "Approaches to soil Classification." World soil resources project N° 32. 143 p.

15. FAO/UNESCO. (1975), "Carte mondiale des sols au 1/5.000.000 Légende". 62 p.
16. Flórez, M. T. et al. (2006), "Alteración física de los fragmentos de matriz y de los vidrios volcánicos." Revista Académica Colombiana de Ciencias.
17. Fredlund, D.G et al. (1994), "Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve" CAN GEOTECH. J., VOL 31.
18. Hartge, K. H. and Horn, R. (1999), "Einführung in die Bodenphysik. Enke Verlag". Stuttgart.
19. Hazen, A. (1892). "Some physical properties of sand and gravels, with special reference to their use in filtration". 24th Annual Rep., Massachusetts State Board of Health, Pub. Doc. N°34, 539-556.
20. Hermosilla, S. M. and Cárdenas, R. J. (2007), "Determinación de alofán en suelos derivados de cenizas volcánicas del sur de Chile y análisis general de resultados", Universidad de La Frontera.
21. Hillel, D. (1998), "Enviromentals soils physics" Academic Press, New York.
22. Instituto Nacional de Normalización, NCh1532Of.80 "Mecánica de Suelos - Determinación de la Densidad de las Partículas Sólidas".
23. Instituto Nacional de Normalización, NCh1534/2.Of. 2008 "Mecánica de Suelos -humedad/densidad – Parte 2: Métodos de compactación con pisón de 4,5kg y 457mm de caída".
24. Karman, P. C. (1938). "The determination of the specific surface of powders". J. Soc. Chem. Ind. Trans., 57, 225.
25. Klute, A. (1986), "Methods of soil analysis, Part 1: Physical and mineralogical methods", 2nd ed. Madison, WI: ASA/SSSA.
26. Kozeny, J. (1927). "Ueber kapillare leitung des wassers im boden". Wien, Akad. Wiss., 136(2a), 271.
27. Lambe, T. and Withman, R. (1969). "Soil Mechanics". Wiley, New York.
28. Ley federal sobre Metrología y Normalización (1996). NOM-001-ECOL-1996: "Norma oficial mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales". México. Comité consultivo nacional de normalización para la protección ambiental, pp. 38.
29. Little, A. (1969), "The Engineering Classification of Residual Tropical Soils" Proc. 7th Int. Conf. Soil Mechanics Found. Eng (Mexico City, Mexico).
30. Luna, D. (2003), "Estandarización de ensayos de conductividad hidráulica de campo para el diseño de obras de infiltración". Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería.
31. Paredes, P. M. and Verdugo A. R. (2004), "Génesis y Estructura de los Suelos Alofánicos en Chile". V Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica. Universidad de Chile.
32. Paredes, P. M. and Verdugo A. R. (2004), "Comportamiento Geomecánico de Suelos Alofánicos". V Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica. Universidad de Chile.
33. Parfitt R. L. and Kimble J. M. (1989), "Structure of some Allophanes from New Zealand", Auckland, New Zealand.
34. Paterson, E. (1977), "Specific surface area and poroestructure of allophanic soil clay." Clay minerals, 12, p. 1-9.
35. República de Chile. Decreto N° 236/26 (2004): "Reglamento general de alcantarillados particulares, fosas sépticas, cámaras filtrantes. Cámaras de contacto, cámaras absorbentes y letrinas domiciliarias". Santiago, Chile. República de Chile, Ministerio de Salud, pp. 14.
36. República de Venezuela. Decreto N° 883 (1995): "Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos". Venezuela, pp. 16.
37. Reynolds, W.D. and Elrick, D.E. (1985), "In situ measurement of field saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the alpha-parameter using the Guelph permeameter." Soil Science. Octubre 1985. 140 (4).

38. Rojo F. (2004), "Suelos Trumaos." Facultad de Agronomía, Universidad de Chile.
39. Taylor, D. (1942). "Fundamentals of soil mechanics". Wiley, New York.
40. Terzaghi, K. and Peck, R. (1964). "Soil mechanics in engineering practice". Wiley, New York.
41. Tosso J. (1985), "Suelos Volcánicos de Chile". Ministerio de Agricultura, Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Santiago, Chile.
42. Valenzuela et al. (2008) "Depuración de aguas residuales domésticas utilizando suelos volcánicos chilenos" XXXI Congreso Interamericano AIDIS. Santiago, Chile.
43. Van Genuchten, M.Th. (1980), "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." Soil Sci Am J Vol. 44; p. 892-898. 1980.
44. Wesley, L. D. (1998), "Geotechnical characterization and behavior allophane clays". University of Auckland, Auckland – New Zealand.