

PRIMERAS JORNADAS REGIONALES DE ACÚSTICA AdAA 2009

19 y 20 de noviembre de 2009, Rosario, Argentina



AdAA2009-A002R

Relación entre la absorción acústica y la porosidad total en un suelo volcánico

Felipe Antonio Torres^(a), Jose Luis Barros^(a), Oscar Thiers^(b).

(a) Instituto de Acústica, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile, Casilla 567, Valdivia, Chile. E-mail: felipetc@gmail.com - jbarros@uach.cl

(b) Instituto de Silvicultura, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, Casilla 567, Valdivia, Chile. E-mail: othiers@uach.cl

Abstract

There are several methods for determining physical properties of soils; however, many of them require too much time and have high costs. This study proposes a methodology to obtain the total porosity of soil from acoustical measurements. Through specific acoustic impedance measurements of a volcanic soil correlation levels are obtained between average absorption coefficient and the porosity of soil samples. On the other hand, the behaviour of the theory of the *quasi-homogeneous absorber material* is studied for the soil under test, arriving at good approximations. Finally, through a linear relationship between porosity and average absorption coefficient a simple alternative model is proposed that allows to obtain the total porosity of the soil as a function of the volume moisture, the average absorption coefficient and other physical, chemical and/or biological parameters that may have some influence on the sound absorption of the soil, represented by constants obtained through a statistical analysis.

Resumen

Existen diversos métodos que permiten determinar propiedades físicas de los suelos, sin embargo, muchos de ellos requieren de un tiempo y costo elevado. En este estudio se propone una metodología que permite obtener la porosidad total de un suelo a partir de mediciones acústicas. A través de mediciones de impedancia acústica específica de un suelo volcánico se obtienen niveles de correlación entre la porosidad y el coeficiente de absorción medio de las muestras extraídas. Se concluye que no sólo la porosidad tiene un efecto en la determinación del coeficiente de absorción medio, sino también cabe la posibilidad que otros parámetros físicos, químicos y/o biológicos puedan tener algún nivel de correlación con la variable acústica. Por otra parte, se estudia el comportamiento de la teoría del *material absorbente cuasi-homogéneo* para el suelo analizado, obteniéndose buenas aproximaciones. Finalmente, a través de un análisis estadístico se determinan los coeficientes que relacionan linealmente el coeficiente de absorción medio y la porosidad. Utilizando dichos coeficientes, se propone un modelo simple que permite obtener de forma alternativa la porosidad total de un suelo en función de la humedad volumétrica y el coeficiente de absorción medio.

1 Introducción

La información respecto a la variabilidad de diversas propiedades de los suelos es esencial para la toma de decisiones en variados campos de aplicación. La dificultad de obtener sus características de forma rápida y económica continúa siendo una de las mayores limitantes, sin embargo, numerosos investigadores y fabricantes han desarrollado diversas técnicas que han permitido obtener propiedades físicas y químicas a través de conceptos eléctricos, electromagnéticos, ópticos, mecánicos, acústicos, entre otros (Adamchuk et al. 2004). Los principales parámetros desarrollados a través de estudios acústicos han sido el contenido de humedad (Adamo et al. 2004), la textura (Lui et al. 1993) y la compactación (Tekeste et al. 2002; Lu et al. 2004) dentro del suelo. Gran parte de ellos se basan en el comportamiento de la velocidad de propagación sonora en el medio.

Otro de los parámetros físicos de gran importancia es la porosidad total debido a su gran variabilidad en distintas clases de suelos. En la actualidad existen varias formas de determinarla. El método clásico consiste en obtener su valor a partir de la relación entre la densidad aparente y densidad real de una muestra de suelo, sin embargo, existen técnicas más refinadas que entregan información relativamente precisa del espacio poroso en el suelo. Una de ellas es la del picnómetro de aire, la cual determina el agua, el volumen del suelo y además el volumen de aire ocupado en él mediante una técnica basada en la ley de Boyle (Black 1965).

En este estudio se propone una alternativa acústica para la obtención de la porosidad total en función de la humedad volumétrica y el coeficiente de absorción medio. Una vez que son determinados estadísticamente los coeficientes que forman parte del modelo de un suelo determinado, se hace necesario determinar el contenido de humedad volumétrica. Se han desarrollado diversos métodos, además de los acústicos, que permiten obtenerla, de costos y precisiones diferentes y su uso depende de los objetivos de la determinación. Algunos de ellos son: gravimétrico, resistencia, tensiómetro y aspersionador de neutrones (Buckman & Brady 1966; Honorato 2000). Finalmente, para la obtención del coeficiente de absorción medio se utiliza el método de función de transferencia establecido en la norma ISO 10534-2 (ISO 10534-2 1998).

2 Teoría

Existen numerosas teorías que caracterizan el comportamiento acústico de un determinado material, siendo algunas de ellas la teoría de *Rayleigh* (Rayleigh 1896), *Biot* (Biot 1956a; Biot 1956b), entre otras (Mechel 1995). Una teoría simple muy utilizada es la del *material absorbente cuasi-homogéneo* (Möser & Barros 2004), la cual considera 3 parámetros estructurales:

- Porosidad σ
- Resistividad al flujo Ξ
- Factor de estructura κ

A diferencia de la teoría de *Rayleigh* que considera una distribución homogénea y paralela de poros circulares, la teoría del *material absorbente cuasi-homogéneo* plantea una distribución aleatoria de éstos. El comportamiento que presenta una onda sonora dentro de un material varía respecto al que posee al propagarse a través del aire, de esta forma, tanto la longitud de onda λ , el número de onda k y la velocidad de propagación c sufren modificaciones. Para fines prácticos, comúnmente se sitúa sobre una pared rígida un material absorbente de espesor h . En este caso, la onda incidente que se propaga a través del material

se refleja al encontrar como obstáculo la pared. De esta forma, la impedancia acústica específica Z_s sobre la superficie de la muestra queda definida de la forma:

$$Z_s = -j\rho c \frac{\sqrt{\kappa}}{\sigma} \sqrt{1 - j \frac{\Xi \sigma}{\omega \rho \kappa}} \cot \left(hk \sqrt{\kappa} \sqrt{1 - j \frac{\Xi \sigma}{\omega \rho \kappa}} \right), \quad (1)$$

donde ρ es la densidad del aire y ω es la frecuencia angular. Si se utiliza un tubo de impedancia cuyo material es suficientemente rígido de manera que la transmisión de la energía hacia el exterior sea prácticamente nula, es posible obtener el coeficiente de absorción a partir de la relación:

$$\alpha = \frac{4 \operatorname{Re} \left\{ Z_s / \rho c \right\}}{\left[\operatorname{Re} \left\{ Z_s / \rho c \right\} + 1 \right]^2 + \left[\operatorname{Im} \left\{ Z_s / \rho c \right\} \right]^2}. \quad (2)$$

El coeficiente de absorción es un valor dependiente de la frecuencia, sin embargo, con el fin de sustituir la curva por un valor único se obtuvo el coeficiente de absorción medio para un rango de frecuencia entre 500 Hz y 3500 Hz. La figura 1 muestra cómo es su variación en función de la porosidad para distintos valores de factor de estructura. Para dicha figura, se consideró una relación inversamente proporcional entre la porosidad y la resistividad al flujo (Mechel 1995) suponiendo que la resistividad al flujo dentro del material Ξ_i es constante (3).

$$\Xi = \frac{\Xi_i}{\sigma}. \quad (3)$$

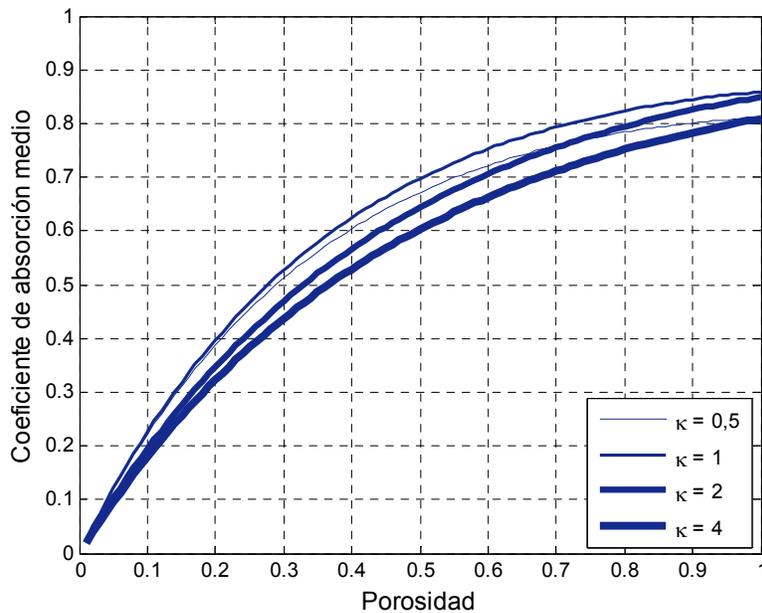


Figura 1. Variación del coeficiente de absorción medio en función de la porosidad para distintos factores de estructura.

A pesar de que en las aplicaciones habituales en Ingeniería Acústica el coeficiente de absorción promedio no presta mayor utilidad, es interesante observar la relación existente con la porosidad. El coeficiente de absorción puede presentar marcadas oscilaciones al utilizar distintas combinaciones de parámetros estructurales, sin embargo, este comportamiento no se manifiesta para el coeficiente de absorción medio en donde la curva tiende a crecer a medida que aumenta la porosidad, independiente del factor de estructura utilizado. Para distintos factores de estructura se obtienen pequeñas variaciones en las curvas, aunque para constantes Ξ_i mayores, estas variaciones tienden a ser insignificantes. Además, para dichas constantes, las curvas tienden a presentar un comportamiento lineal entre las variables en cuestión.

3 Metodología

Para llevar a cabo las mediciones de impedancia acústica específica, se utilizó un sistema de medición cuyo principal elemento fue un tubo de impedancia (figura 2(a)), bajo el procedimiento descrito en la norma ISO 10534-2 (ISO 10534-2 1998). Se diseñó un adaptador en su terminación de manera de poder utilizar muestras de suelo obtenidas a través de métodos estandarizados (Schlatter et al. 2003), cuyas dimensiones limitaron el rango de frecuencia de trabajo entre 546 Hz y 3562 Hz según lo establecido en la norma. Las muestras se obtuvieron a partir de una calicata realizada en un suelo formado por cenizas volcánicas. Se extrajeron 10 muestras para un primer horizonte (entre 0 cm y 5 cm) (figura 2(b)) y otras 10 para un segundo (entre 40 cm y 45 cm) (figura 2(c)) utilizando cilindros metálicos de 100 cm³ y 4 cm de longitud.

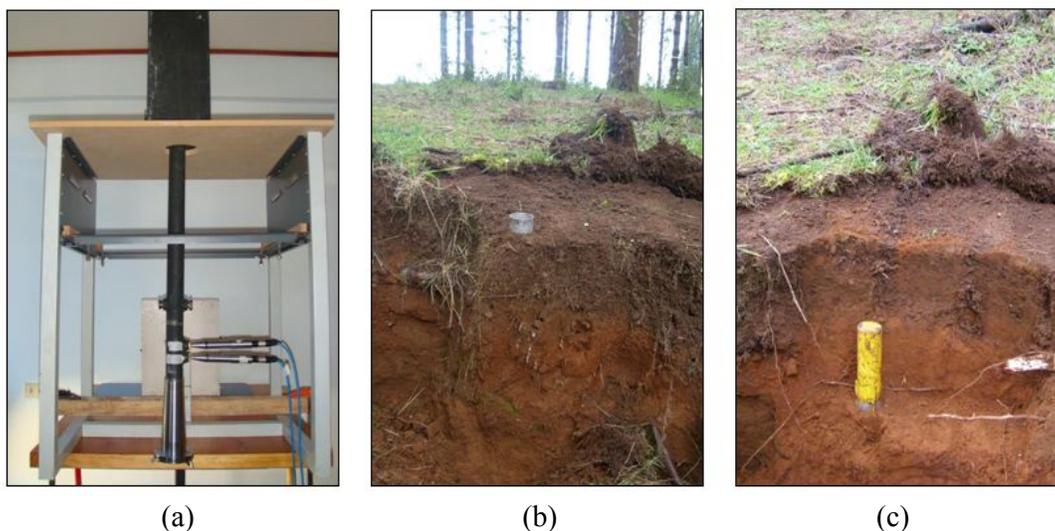


Figura 2. (a) Vista del sistema vertical de medición (b) Calicata horizonte 1
(c) Calicata horizonte 2

Con el fin de conocer la variación del comportamiento acústico de las muestras frente a variaciones de humedad, éstas fueron sometidas a 3 tratamientos modificando el contenido de humedad, obteniéndose su masa en cada uno de los estados. Una vez que fue calibrado el sistema de medición, se midió la impedancia acústica específica de cada muestra para luego determinar su coeficiente de absorción. Esto se realizó en reiteradas ocasiones, tal como lo

muestra la línea de tiempo de la figura 3. De esta forma, se obtuvieron 10 mediciones por estado de humedad para cada horizonte. El proceso de secado produjo un efecto de contracción irreversible por lo que las muestras luego de ser medidas en esta condición fueron desechadas.

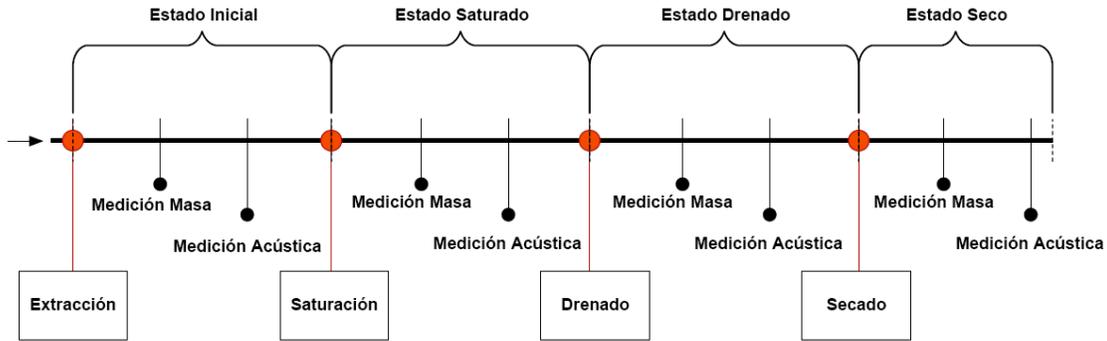


Figura 3. Línea de tiempo de los tratamientos aplicados a las muestras de suelo.

Para la saturación de las muestras se situaron los cilindros sobre recipientes revestidos en su base con filtros, cuya función fue lograr una saturación homogénea ascendente a nivel capilar. Luego, cuidadosamente se rellenaron los recipientes con agua y se dejaron reposar las muestras por 96 horas hasta que sus superficies presentaron un brillo evidente. Para el drenaje los cilindros fueron cubiertos inferiormente con filtros de manera de evitar la pérdida de materia sólida durante este tratamiento. Las muestras se mantuvieron en condiciones ambientales adecuadas durante dos semanas dentro de un contenedor específico, de manera que el agua contenida en los poros gruesos, también conocida como agua excedente, drenara en respuesta a la fuerza gravitacional. De esta forma, el agua remanente quedó contenida en los microporos. Finalmente, las muestras se sometieron a secado en un horno apropiado a una temperatura constante de 105 °C durante una semana. De esta forma, el agua se eliminó a través de evaporación. En caso de existir agua remanente en la estructura de los cristales del suelo, su contribución fue prácticamente nula, por lo que se supuso que en este estado el contenido de humedad en la muestra fue de 0 %.

A partir de las relaciones de masa de las muestras en sus distintos estados fue obtenida la porosidad σ , definida como el cociente entre el volumen de aire existente en los poros en cualquier estado de humedad V_{aire_x} y el volumen total de la muestra V_{total} . Una forma de determinarla es a través de la ecuación (4).

$$\sigma = \frac{V_{aire_x}}{V_{total}} = \left(\frac{M_{sat} - M_x}{\rho_{agua} - \rho_{aire}} \right) \frac{1}{V_{total}}, \quad 0 \leq \sigma \leq 1, \quad (4)$$

donde M_{sat} es la masa de la muestra en estado saturado, M_x la masa en cualquier estado de humedad y ρ la densidad del respectivo medio. Por otra parte, la humedad volumétrica θ

corresponde al cociente entre el volumen de agua que posee la muestra en cualquier estado V_{agua_x} y el volumen total de ésta V_{total} .

La porosidad fue relacionada con el coeficiente de absorción medio determinando su grado de correlación. La elección de un valor representativo de absorción y no la curva en todo su rango de frecuencia simplificó considerablemente el análisis estadístico. Por otra parte, permitió obtener altos niveles de correlación entre las variables. Además, se obtuvieron una serie de parámetros físicos característicos de los suelos de cada horizonte. Estos fueron: densidad aparente ρ_A , densidad real ρ_R , porosidad total σ_T , porosidad gruesa σ_G y porosidad media-fina σ_{MF} , los cuales son independientes del estado de humedad en que se encuentre muestra. Finalmente, se utilizó la prueba t de Student con un 95 % de confiabilidad de manera de determinar la similitud entre los parámetros físicos de ambos horizontes.

La porosidad total se define como el cociente entre el volumen máximo de agua que es capaz de retener la muestra V_{agua_max} y el volumen total de ésta V_{total} . Su valor fue obtenido a partir del cociente entre la densidad aparente y la densidad real (5). Para el estado seco, la porosidad coincide teóricamente con la porosidad total de un suelo.

$$\sigma_T = \frac{V_{agua_max}}{V_{total}} = \left(1 - \frac{\rho_A}{\rho_R}\right), \quad 0 \leq \sigma_T \leq 1. \quad (5)$$

Los descriptores estadísticos utilizados para caracterizar las muestras en sus distintos estados de humedad, es decir, a partir de 10 mediciones en cada estado fueron: media aritmética, máximo, mínimo, desviación estándar y coeficiente de variación. Estos mismos descriptores se utilizaron en las tablas que presentan los parámetros físicos obtenidos.

4 Resultados

4.1 Modelado teórico

A través de la teoría del *material absorbente cuasi-homogéneo* para una capa porosa de espesor finito se modelaron las mediciones del coeficiente de absorción realizadas, con el fin de conocer su comportamiento en materiales de menor porosidad que los materiales absorbentes comúnmente utilizados. Se creó un programa computacional que realizó un barrido sistemático de las diversas combinaciones de los tres parámetros estructurales que rigen esta teoría (porosidad, resistividad al flujo y factor de estructura), entregando finalmente la curva con el menor error cuadrático medio (ECM) respecto a la medición con un costo computacional despreciable. Para la porosidad se utilizó un rango entre 0,01 y 1, con un paso de 0,01. El rango para la resistividad al flujo fue entre 0 Rayl/cm y 600 Rayl/cm, con un paso de 1 Rayl/cm. Finalmente, para el factor de estructura el rango fue entre 0,1 y 15, con un paso de 0,1. La teoría permite obtener una buena aproximación entre las mediciones y las curvas teóricas en todos los estados de humedad, sin embargo, esto no asegura que los parámetros utilizados en el modelado son los característicos de cada muestra, sino que simplemente permiten aproximar de una buena forma las mediciones. En algunos casos es posible que diferentes combinaciones de parámetros entreguen un mismo valor de error cuadrático medio o muy similar, de esta forma, se imposibilita poder determinar cuáles parámetros son más adecuados para el modelado, sobre todo cuando las variaciones porcentuales son considerables. La figura 4 junto con la tabla 1 muestran un ejemplo de lo enunciado.

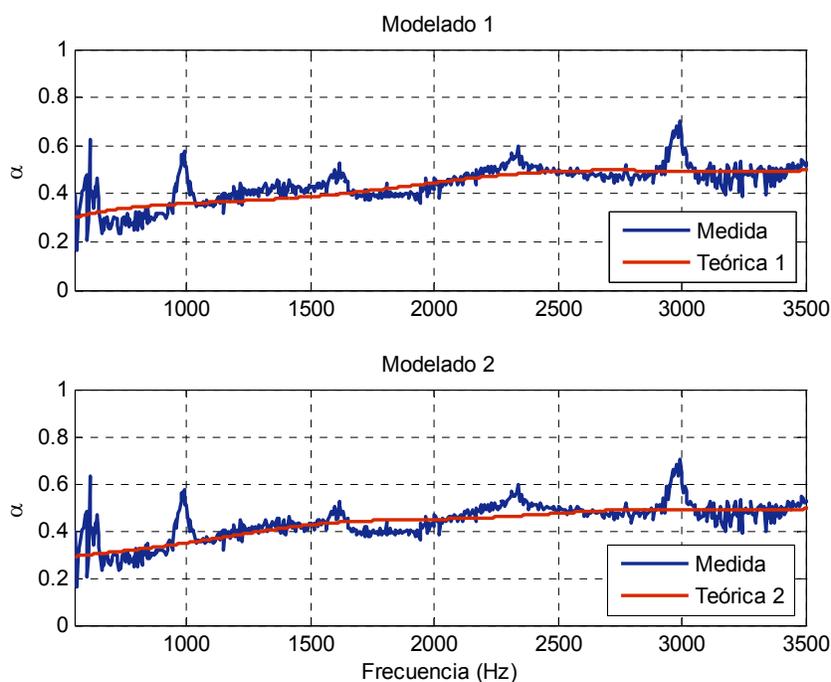


Figura 4. Modelados para muestra N° 5, horizonte 1 en su estado inicial.

Tabla 1. Parámetros teóricos utilizados para los modelados de la muestra N° 5, horizonte 1 en su estado inicial.

| Parámetro | Modelado | | |
|------------------------------|------------|------------|---------------|
| | Modelado 1 | Modelado 2 | Variación (%) |
| Resistividad flujo (Rayl/cm) | 210 | 270 | 22,22 |
| Factor estructura | 6,10 | 14,10 | 56,74 |
| Porosidad | 0,50 | 0,70 | 28,57 |
| ECM | 0,0019 | 0,0019 | 0,00 |

El objetivo del estudio no es encontrar una teoría existente que modele el comportamiento acústico de los suelos. Es por esta razón que no se profundiza en diversas teorías.

4.2 Coeficiente de absorción medio

Las tablas 2 y 3 muestran los valores del coeficiente de absorción medio obtenidos en los distintos estados de humedad.

Tabla 2. Coeficiente de absorción medio para el horizonte 1 en todos sus estados.

| Descriptor | Estado | | | |
|------------|---------|----------|---------|-------|
| | Inicial | Saturado | Drenado | Seco |
| Media | 0,374 | 0,186 | 0,348 | 0,772 |
| Mínimo | 0,272 | 0,117 | 0,261 | 0,737 |
| Máximo | 0,472 | 0,224 | 0,419 | 0,808 |
| Desv. Est. | 0,059 | 0,035 | 0,048 | 0,020 |
| CV (%) | 15,764 | 18,568 | 13,850 | 2,626 |

Tabla 3. Coeficiente de absorción medio para el horizonte 2 en todos sus estados.

| Descriptor | Estado | | | |
|------------|---------|----------|---------|-------|
| | Inicial | Saturado | Drenado | Seco |
| Media | 0,362 | 0,129 | 0,259 | 0,719 |
| Mínimo | 0,265 | 0,102 | 0,184 | 0,600 |
| Máximo | 0,506 | 0,165 | 0,362 | 0,794 |
| Desv. Est. | 0,073 | 0,020 | 0,066 | 0,062 |
| CV (%) | 20,167 | 15,461 | 25,411 | 8,693 |

Se observa que en estado seco el coeficiente de absorción medio posee el mayor valor, mientras que en estado saturado el menor, lo que confirma la gran influencia de la porosidad del suelo sobre la absorción acústica. Se verifica que para ambos horizontes la absorción media es superior en estado inicial que en el estado drenado, existiendo una mayor diferencia entre ellos para el horizonte 2. Además, para todos los estados el horizonte 1 presenta un mayor coeficiente de absorción medio respecto al horizonte 2.

4.3 Relación entre la porosidad y el coeficiente de absorción medio

Las tablas 4 y 5 muestran las porosidades obtenidas para cada horizonte, las cuales son relacionadas con el coeficiente de absorción medio a través de un diagrama de dispersión (figura 5).

Tabla 4. Porosidad para el horizonte 1 en todos sus estados.

| Descriptor | Estado | | | |
|------------|---------|----------|---------|-------|
| | Inicial | Saturado | Drenado | Seco |
| Media | 0,190 | 0,000 | 0,172 | 0,702 |
| Mínimo | 0,158 | 0,000 | 0,130 | 0,675 |
| Máximo | 0,226 | 0,000 | 0,199 | 0,740 |
| Desv. Est. | 0,024 | 0,000 | 0,024 | 0,022 |
| CV (%) | 12,671 | - | 13,766 | 3,169 |

Tabla 5. Porosidad para el horizonte 2 en todos sus estados.

| Descriptor | Estado | | | |
|------------|---------|----------|---------|-------|
| | Inicial | Saturado | Drenado | Seco |
| Media | 0,213 | 0,000 | 0,121 | 0,703 |
| Mínimo | 0,170 | 0,000 | 0,074 | 0,680 |
| Máximo | 0,293 | 0,000 | 0,198 | 0,721 |
| Desv. Est. | 0,038 | 0,000 | 0,039 | 0,014 |
| CV (%) | 17,778 | - | 32,511 | 2,004 |

Como era de esperar, las muestras secas presentan la mayor cantidad de aire, mientras que en estado saturado todos los poros existentes se encuentran llenos de agua por lo que su porosidad es nula. Se observa que en estado inicial la porosidad es superior para el horizonte 2, sin embargo, observando las tablas 2 y 3 se aprecia un menor coeficiente de absorción medio en este horizonte, lo que indica que no sólo la porosidad tiene un efecto en el coeficiente de absorción medio. Visto de otra forma, de ser la porosidad el único parámetro influyente en la absorción acústica de suelos, el coeficiente de absorción medio para el estado saturado y para el estado seco habría tenido un valor igual o muy similar para ambos horizontes. La mayor diferencia de aire existente entre los estados inicial y drenado para el horizonte 2 justifica el hecho de una mayor variación del coeficiente de absorción medio para este horizonte entre estos estados.

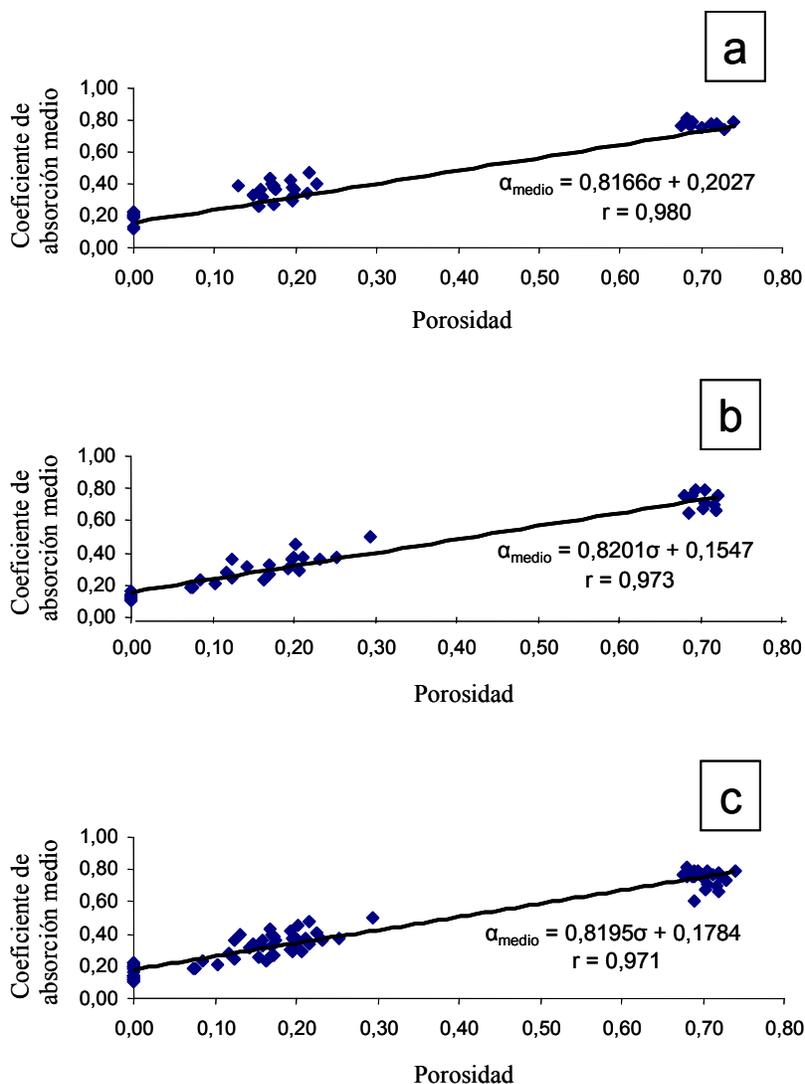


Figura 5. Relación entre la porosidad y el coeficiente de absorción medio para: (a) Horizonte 1 (b) Horizonte 2 (c) Ambos horizontes.

Realizando una regresión lineal simple se obtiene una alta correlación positiva entre ambas variables tanto para el horizonte 1, horizonte 2 y ambos juntos, obteniéndose en todos los casos coeficientes de Pearson superiores a 0,97. De esta forma, se infiere que a mayor porosidad, es decir, mayor contenido de aire en la muestra, aumenta el coeficiente de absorción medio.

4.4 Similitud de los suelos de ambos horizontes

Las tablas 6 y 7 presentan los parámetros físicos obtenidos para los horizontes 1 y 2 respectivamente. Además, la tabla 7 muestra la prueba t de Student realizada a cada variable respecto a ambos horizontes.

Tabla 6. Descriptores de los parámetros físicos para el horizonte 1.

| Descriptor | Parámetro físico | | | | |
|------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|----------------|-------------------|
| | ρ_A (g/cm ³) | ρ_R (g/cm ³) | σ_T (%) | σ_G (%) | σ_{MF} (%) |
| Media | 0,60 | 2,17 | 72,26 | 17,18 | 55,08 |
| Mínimo | 0,58 | 2,07 | 70,79 | 12,99 | 51,65 |
| Máximo | 0,62 | 2,34 | 75,12 | 19,89 | 57,95 |
| Desv. Est. | 0,02 | 0,08 | 1,29 | 2,36 | 2,60 |
| CV (%) | 2,89 | 3,50 | 1,79 | 13,77 | 4,72 |

Tabla 7. Descriptores de los parámetros físicos para el horizonte 2. Además, denotan en rojo diferencias significativas entre las muestras de ambos horizontes con un 95 % de confiabilidad.

| Descriptor | Parámetro físico | | | | |
|------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|----------------|-------------------|
| | ρ_A (g/cm ³) | ρ_R (g/cm ³) | σ_T (%) | σ_G (%) | σ_{MF} (%) |
| Media | 0,59 | 2,20 | 72,99 | 12,05 | 60,94 |
| Mínimo | 0,55 | 2,13 | 71,17 | 7,43 | 54,90 |
| Máximo | 0,67 | 2,32 | 74,71 | 19,81 | 65,33 |
| Desv. Est. | 0,03 | 0,06 | 1,00 | 3,92 | 3,32 |
| CV (%) | 5,29 | 2,53 | 1,37 | 32,51 | 5,45 |
| Prueba t | 0,576 | 0,304 | 0,174 | 0,002 | 0,000 |

Ambos horizontes presentan una densidad aparente ρ_A cercana a 0,6 g/cm³ muy inferior a la real ρ_R . Para el horizonte 2, se obtienen valores de densidad real ligeramente mayores que en el horizonte 1, posiblemente debido a la mayor concentración de materia orgánica en la cercanía de la superficie, al igual como lo indican estudios anteriores realizados en la zona (Navarrete 2006). La porosidad total σ_T en ambos horizontes supera el 70 % del volumen total de la muestra, lo que revela la gran cantidad de agua que es capaz de retener este tipo de suelo. Los valores difieren levemente a los obtenidos a partir de la porosidad en estado seco. A pesar de que la porosidad total en ambos horizontes es similar, los tipos de porosidad que la componen son claramente diferentes, existiendo un mayor porcentaje de porosidad gruesa σ_G y un menor porcentaje de porosidad media-fina σ_{MF} en el horizonte 1. Finalmente, se observa además el bajo coeficiente de variación presente en todos los parámetros de ambos horizontes, exceptuando a la porosidad gruesa. Para profundizar respecto a las propiedades físicas de los suelos se recomienda a Honorato (Honorato 2000).

5 Discusión

A través de los resultados obtenidos se pone de manifiesto que no sólo la porosidad juega un rol en la determinación del coeficiente de absorción medio en el suelo estudiado, sino que también cabe la posibilidad de que otras variables físicas, químicas y/o biológicas

tengan algún grado de correlación con la variable acústica. Resulta muy complejo desarrollar una teoría que considere todas estas variables, la cual además tendría poca utilidad práctica debido a la dificultad de obtener los valores de los parámetros involucrados. Sin embargo, para el suelo estudiado se encontró una relación lineal entre la porosidad y el coeficiente de absorción medio, donde las constantes A y B representan los restantes parámetros que rigen la absorción acústica (6).

$$\alpha_{medio} = A\sigma + B. \quad (6)$$

Los poros de una muestra en cualquier estado de humedad están constituidos por una cierta relación de aire y agua, por lo que la suma de la porosidad y la humedad volumétrica dan como resultado la porosidad total (7).

$$\sigma + \theta = \sigma_T. \quad (7)$$

Además, también es posible relacionar la porosidad con el coeficiente de absorción medio, dejando como variable dependiente la porosidad (8).

$$\sigma = C_1\alpha_{medio} + C_2. \quad (8)$$

Reemplazando la ecuación (8) en (7), se obtiene (9).

$$\sigma_T = C_1\alpha_{medio} + C_2 + \theta. \quad (9)$$

De esta forma, se encuentra una ecuación del plano que relaciona la porosidad total como variable dependiente con el coeficiente de absorción medio y la humedad volumétrica, parámetros fáciles de obtener a través de mediciones. Mediante este modelo, se propone una alternativa para obtener la porosidad total de un suelo, evitando realizar las mediciones convencionales en laboratorio. Dichas mediciones convencionales consisten básicamente en determinar la densidad aparente y la densidad real de una muestra de suelo a partir de relaciones de masa que ésta posee luego de ser llevada a estados de saturación y secado, lo cual requiere de un tiempo considerable. Si bien, en una primera etapa el método propuesto requiere de un arduo trabajo para establecer los coeficientes C_1 y C_2 , una vez obtenidos estadísticamente dichos coeficientes, el método requiere de un tiempo considerablemente menor debido a que las mediciones de humedad pueden efectuarse en terreno y las de absorción en un tubo de impedancia requieren sólo un par de minutos.

Utilizando las muestras de ambos horizontes se grafica la figura 6. A través de una regresión lineal simple se obtiene la ecuación (10), la cual relaciona el coeficiente de absorción medio con la porosidad, donde $C_1 = 1,1501$ y $C_2 = -0,1901$.

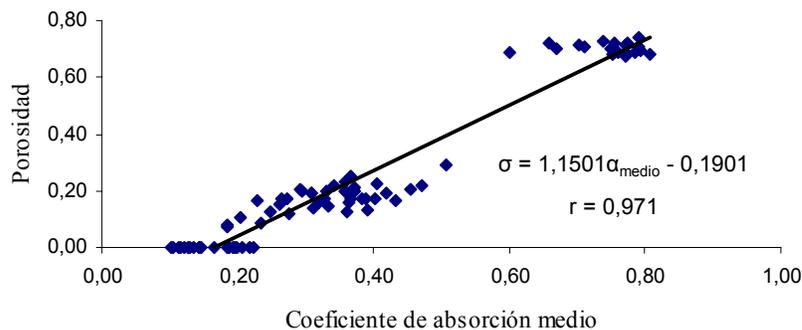


Figura 6. Relación entre el coeficiente de absorción medio y la porosidad para ambos horizontes.

$$\sigma = 1,1501\alpha_{medio} - 0,1901. \quad (10)$$

Finalmente, la ecuación (11) muestra el modelo que representa al conjunto de muestras obtenidas del suelo volcánico estudiado.

$$\sigma_T = 1,1501\alpha_{medio} - 0,1901 + \theta. \quad (11)$$

6 Conclusiones

La prueba t de Student arrojó como resultado un alto grado de similitud de los suelos de ambos horizontes, sin embargo, el tipo de poros con que estaban constituidos presentaron diferencias. Las muestras del horizonte 1 mostraron una mayor porosidad gruesa junto con mayores niveles de absorción en todos sus estados, lo que podría indicar que la porosidad gruesa tiene un mayor efecto que la porosidad media-fina sobre el coeficiente de absorción medio.

Para una segunda etapa de estudio, se espera poder determinar si la relación entre el coeficiente de absorción medio y la porosidad cumple un patrón lineal en diversos tipos de suelos, estableciendo la variación de las constantes C_1 y C_2 obtenidas. Para esto, es necesario aumentar el número de estados de humedad a los cuales son sometidas las muestras. De esta forma, concluir si es necesario poseer un solo modelo o diversos para cada tipo de suelo. Este trabajo es un estudio preliminar y abre una interesante línea investigativa.

Referencias

- Adamchuk, V.I.; Hummel, J.W.; Morgan, M.T.; Upadhyaya, S.K. (2004). "On-the-go soil sensors for precision agriculture". *Computers and Electronics in Agriculture*, 44, 71-91.
- Adamo, F.; Andria, G.; Attivissimo, F.; Giaquinto, N. (2004). "An acoustic method for soil moisture measurement". *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 53, 4, 891-898.
- Biot, M.A. (1956a). "Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid. I. Low frequency range". *Acoustical Society of America*, 28, 2, 168-178.
- Biot, M.A. (1956b). "Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid. II. Higher frequency range". *Acoustical Society of America*, 28, 2, 179-191.

- Black, C.A. (1965). "Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical properties, including statics of measurement and sampling". American Society of Agronomy, Wisconsin, USA.
- Buckman, H.; Brady, N. (1966). "Naturaleza y propiedades de los suelos". Unión topográfica editorial hispano americana, España.
- Honorato, R. (2000). "Manual de Edafología". Alfaomega grupo editor, México.
- ISO 10534-2. (1998). "Acoustic-Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes-Part 2: Transfer-function method".
- Liu, W.; Gaultney, L.D.; Morgan, M.T. (1993). "Soil texture detection using acoustic methods". American Society of Agricultural Engineers, 93-1015.
- Lu, Z.; Hickey, C.; Sabatier, J. (2004). "Effects of compaction on the acoustic velocity in soils". Soil Science Society of America Journal, 68, 7-16.
- Mechel, F.P. (1995). "Schall-absorber. Band II: Innere Schallfelder, Strukturen". S. Hirzel. Stuttgart, Deutschland.
- Möser, M.; Barros, J.L. (2009). "Ingeniería Acústica. Teoría y Aplicaciones". 2nda Edición. Springer, Berlin, Alemania.
- Navarrete, A. (2006). "Estado de desarrollo ex-situ de quillay (Quillaja saponaria Mol.), keule (Gomortega keule (Mol.) Baillon) y belloto del sur (Beilschmiedia berteriana (Gay) Kosterm.) en Valdivia". Tesis Ing. Forestal, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
- Rayleigh, L. (1896). "The theory of sound, Vol. 2". Dover, New York, USA.
- Schlatter, J. E.; Grez, R.; Gerding, V. (2003). "Manual para el reconocimiento de suelos". Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
- Tekeste, M.Z.; Grift, T.E.; Raper, R.L. (2002). "Acoustic compaction layer detection". American Society of Agricultural Engineers, 02-1089.