



Transporte (50 años de Simulación)



Biodegradación (50 años de Simulación)

Figura 2. Pluma contaminante (concentración de 10^{-3} mg/l) después de 50 años de transporte y biodegradación.

ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DISPERSIÓN EN UN MEDIO POROSO

JULIO VALLEJOS A.¹

CARLOS ESPINOZA C.²

WALTER WILMANS C.³

RESUMEN

Para el estudio de problemas de transporte de sustancias contaminantes en medios porosos saturados y no saturados, es necesario disponer de información sobre la tasa a la cual se producirá la dispersión de dichos compuestos. Dicha estimación requiere del conocimiento de parámetros como el coeficiente de dispersión hidrodinámica o de la dispersividad.

Este artículo presenta una metodología de análisis para la determinación del coeficiente de dispersión a través del uso de un permeámetro de carga constante, en el cual se incorpora un trazador salino, cuya concentración se determina mediante un conductivímetro electrónico o uno manual, dependiendo de la duración y complejidad de la experiencia.

Se presentan los aspectos metodológicos más relevantes de este estudio, y se desarrolla un análisis teórico para la obtención de la información requerida.

¹ Ingeniero Civil, GP Consultores.

² Ingeniero Civil, Ph.D., Académico, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

³ Ingeniero Civil, Ayudante de Investigación, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

1. INTRODUCCIÓN

Este artículo muestra los resultados de experiencias desarrolladas en una instalación experimental (permeámetro), que tienen por finalidad determinar el coeficiente de dispersión del suelo en un sector del valle de Copiapó, en donde se estudia la aplicación en terreno del sistema de tratamiento Suelo-Acuífero, SAT (Vallejos, 2001). Normalmente, los permeámetros se utilizan para estimar valores de conductividad saturada para distintos tipos de suelo. Con una pequeña modificación en la instalación experimental, y la aplicación de una metodología de experimentación y análisis apropiada, es posible determinar además de la conductividad hidráulica, un coeficiente de dispersión para el suelo en estudio.

Las experiencias en la instalación experimental se desarrollaron en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Ingeniería Civil, División Recursos Hídricos y Medio Ambiente, perteneciente a la Universidad de Chile, a partir del mes de octubre del año 2000. Se realizaron estudios preliminares para validar la metodología planteada para estimar el coeficiente de dispersión, las cuales se desarrollaron en los meses de octubre y noviembre del año 2000.

La validación de esta técnica se realizó utilizando un suelo de alta permeabilidad, arena homogénea, con el fin de que estas experiencias preliminares no resultaran demasiado extensas. Este artículo incluye una descripción de la instalación experimental, la metodología de experimentación y análisis de datos, la validación de la metodología y su posterior aplicación para el suelo en estudio (Copiapó).

2. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

El permeámetro es un dispositivo que permite medir la conductividad hidráulica saturada de un suelo en laboratorio. Los permeámetros cuentan con una cámara en la cual se ubica la muestra de roca o suelo. En este caso la instalación experimental (Figura 1) cuenta, además de la cámara de suelo, con una cámara de carga, piezómetros, y una cámara de descarga para estimar la conductividad hidráulica del suelo. Para estimar el coeficiente de dispersión del suelo, se agregó una cámara o estanque de medición de datos. A continuación se describen las características de las componentes de la instalación experimental:

Cámara de Carga. La cámara de carga consiste en un cilindro de acrílico de 29.0 cm de diámetro, que cuenta con un vertedero de descarga a 58,0 cm desde el fondo, para mantener un nivel de agua constante. En los estudios de dispersión el trazador se ingresa en esta cámara.

Cámara del Suelo. La cámara de suelo consiste en un cilindro de acrílico de 29.0 cm de diámetro y 90 cm de largo, de los cuales los primeros 15 centímetros contienen una grava, que sirve como material de soporte a la muestra de suelo, los siguientes 60 cm contienen la muestra de suelo, y los restantes 15 cm contienen agua.

Cámara de Descarga. la cámara de descarga consiste en un tubo de acrílico de 29.0 cm de diámetro y 35.0 cm de largo. La instalación tiene un vertedero de descarga el cual está conectado a la cámara de medición de datos.

Cámara de medición de datos. es una cámara rectangular de acrílico utilizada para determinar el coeficiente de dispersión del suelo, en la cual se mide la conductividad del agua utilizando un conductivímetro manual, o un sensor de conductividad eléctrica.

Para medir la conductividad eléctrica en la cámara de medición de datos, se pueden utilizar:

Sensor de Conductividad Eléctrica. corresponde a un sensor de conductividad Modelo 125, fabricado por Precision Measurement Engineering. Se cuenta además con un panel de control para la operación del equipo, una tarjeta de adquisición de datos y un computador para el registro de mediciones. El sensor entrega datos de voltaje que son función de la conductividad eléctrica y la temperatura, y que son interpretados y registrados mediante un programa, desarrollado en el software Labview, instalado en el computador.

Conductivímetro Manual. corresponde a un instrumento de tipo portátil, Modelo M90, fabricado por Corning Incorporated Science. Este instrumento consta de dos partes, sensor y lector; el sensor de conductividad permite además leer temperatura. El instrumento puede medir además pH y oxígeno disuelto, utilizando un sensor específico para cada caso.

El permeámetro puede trabajar a carga constante y carga variable. Para las pruebas a carga constante, es necesario establecer un régimen estacionario del flujo que pasa por la muestra de suelo, y trabajar con una pérdida de carga total no mayor al 50% de la longitud de la muestra de suelo, para asegurar el cumplimiento de la ley de Darcy.

3. METODOLOGÍA DE EXPERIMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

Como se mencionó anteriormente, las experiencias en permeámetro tienen como finalidad la estimación de la conductividad hidráulica y el coeficiente de dispersión del suelo en estudio. Tanto en las experiencias para estimar el coeficiente de dispersión, como para la conductividad hidráulica del suelo, se utilizó el permeámetro a carga constante.

3.1 Determinación de conductividad hidráulica (K)

La conductividad hidráulica, K , es una medida de la capacidad del suelo para transmitir agua y depende tanto de las características del suelo como del fluido. Para determinar el coeficiente de permeabilidad mediante el método de carga constante, se utiliza la Ley de Darcy, que indica que la tasa o velocidad a la cual el fluido pasa por un estrato de suelo es proporcional al gradiente hidráulico ($\Delta h/L$) que genera este movimiento. Utilizando el supuesto anterior se puede obtener finalmente la siguiente expresión para determinar esta constante de proporcionalidad (K):

$$K = \frac{V \cdot L}{A \cdot t \cdot \Delta h} \quad (1)$$

donde K es la conductividad hidráulica de la muestra [L/T], V es el volumen de agua aforado durante un tiempo t [L^3], L es la longitud de la muestra [L], A es el área perpendicular al escurrimiento [L^2], t es el tiempo [T], y Δh es la pérdida de carga a través del permeámetro [L]

3.2 Determinación coeficiente de dispersión

Una manera directa de estudiar las características dispersivas de un sistema acuífero o de un suelo, es mediante la incorporación de una sustancia (trazador) que se pueda identificar y medir con facilidad, y que al mismo tiempo sea capaz de moverse a la misma velocidad del agua. El movimiento de este trazador está sujeto a fenómenos de dispersión, interacción con el terreno y, en el caso de trazadores radiactivos, a fenómenos de decaimiento. (Custodio, 1976). La Figura 2 muestra una experiencia en la cual se utilizó Rodamina B para observar el fenómeno de dispersión en un medio poroso.

En las experiencias realizadas para determinar el coeficiente de dispersión se utilizó un trazador conservativo, en este caso Cloruro de Sodio (NaCl), debido a que el ión cloruro presenta una solubilidad elevada (difícil de separarse del agua por precipitación o retenido por filtración mecánica), prácticamente no interactúa con el terreno, y es estable. La metodología de experimentación se puede separar en tres etapas, las que se mencionan a continuación:

Curva de Equivalencia Salinidad – Conductividad

Para estimar el coeficiente de dispersión del suelo, es necesario conocer la concentración de Cloruro de Sodio que atraviesa el estrato de suelo en función del tiempo. Por esa razón, los valores de conductividad obtenidos mediante el sensor de conductividad eléctrica, o el manual, deben ser asociados a una concentración de sal conocida (salinidad).

Olivares (2000) desarrolló varias calibraciones para un sensor de conductividad eléctrica, y mostró que la relación entre voltaje y salinidad tiene un comportamiento de tipo lineal. Este resultado permite generar una curva de calibración a partir de dos o tres soluciones salinas conocidas. Para evitar problemas por mediciones fuera de los rangos del instrumento, las concentraciones de sal en la etapa de calibración y experimentación deben ser del orden del 1%. En el caso de un conductivímetro manual, la etapa de calibración es similar, y consiste en asociar para cada una de las soluciones un valor de conductividad eléctrica.

Etapas de Experimentación

Las ecuaciones utilizadas para estimar la conductividad hidráulica y el coeficiente de dispersión del suelo suponen un flujo de agua constante a través de la muestra de suelo. Para asegurar que la experiencia cumple con la situación anterior, es necesario realizar una serie de aforos al caudal de salida del permeámetro (Q1), hasta que éste se estabilice, lo que indica que el flujo alcanzó un régimen permanente. Luego, se afora el caudal que se descarga por el vertedero (Q2), para estimar la pérdida de masa de sal, para la posterior estimación del coeficiente de dispersión (Figura 1). Una segunda tarea de tipo preliminar, consiste en pesar una cantidad de sal (NaCl) conocida, la cual será ingresada al estanque de entrada.

Uno de los supuestos que se utiliza en el análisis de los datos obtenidos mediante esta experimentación, consiste en que el ingreso del trazador a la cámara de carga es "instantáneo". Para que ocurra esta mezcla de forma "instantánea", se instaló en el extremo de salida de la manguera de alimentación un difusor, el cual genera un grado de turbulencia en esta cámara tal que produce una mezcla rápida del trazador con el agua. Durante la experimentación se mide en forma continua el valor de la conductividad eléctrica en la cámara de salida ubicada al final del dispositivo experimental. Esta medición se mantiene hasta que el valor de la conductividad recupere los valores anteriores a la inyección de la sal.

En el caso de utilizar el sensor de conductividad eléctrica, se programa el computador para que mida voltaje en un intervalo de tiempo definido y a una tasa de adquisición de datos determinada. De igual forma que en el caso del conductivímetro manual, es necesario conocer el momento de inicio de la toma de datos y el ingreso de sal a la cámara de carga para el análisis posterior.

Etapas de Análisis

Para la determinación del coeficiente de dispersión del suelo, es necesario observar el comportamiento del trazador en cada uno de los tramos de la instalación experimental. Experiencias con un trazador colorimétrico (Rodamina) permitieron identificar tres comportamientos muy definidos, los que se describen a continuación.

- Zona 1: Corresponde a la cámara de carga, la cual actúa como un reactor de mezcla completa en la que la concentración de ingreso del contaminante, en este caso NaCl, decae

exponencialmente a una tasa $1/\theta_H$ (θ_H , tiempo de retención hidráulico).

- Zona 2: Corresponde a la cámara de suelo, en la cual se observan los efectos del fenómeno de dispersión, y cuyo coeficiente de dispersión es el que nos interesa estudiar.
- Zona 3: Corresponde a la cámara de descarga, la cual se comporta como un reactor del tipo flujo pistón. Al actuar el estanque de salida como flujo pistón, la respuesta del conductivímetro sufre cierto desfase asociado al tiempo de retención de este estanque.

Mariño (1974) resolvió analíticamente el fenómeno de dispersión en un medio poroso, considerando una concentración de entrada que decae exponencialmente a una razón γ (constante). Esta solución explica en forma adecuada el presente problema, dado que el comportamiento que presenta el ingreso del trazador a la cámara de carga se puede analizar considerando esta última como un estanque de mezcla completa, que en $t=0$ presenta una concentración C_0 (Masa Trazador/Volumen del estanque), debido a la mezcla instantánea de este trazador en el estanque de carga, por el cual pasa un caudal constante Q1. Al realizar un balance de masa para distintos instantes de tiempo, se puede estimar que el trazador decae exponencialmente a una razón $\gamma = 1/\theta_{H1}$, siendo θ_{H1} el tiempo de retención asociado al estanque de entrada.

El transporte de trazador en la Zona 2 (cámara de suelo) puede ser modelado mediante una ecuación de transporte advectivo-dispersivo, que se presenta en la ecuación (2), junto a las condiciones iniciales y de borde respectivas.

$$D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2a)$$

$$C(x,0) = 0 \quad x \geq 0 \quad (2b)$$

$$C(0,t) = C_0 \cdot \exp(\gamma \cdot t) \quad (2c)$$

$$C(\infty,t) = 0 \quad t \geq 0 \quad (2d)$$

donde x es la coordenada cartesiana, C_0 es la concentración inicial de contaminante, u es la velocidad media de escurrimiento, D es el coeficiente de dispersión, y γ es la tasa de decaimiento de la concentración de trazador. El coeficiente de dispersión en una columna de suelo se puede considerar proporcional a una propiedad específica del suelo, la dispersividad α , y a la velocidad media del escurrimiento, u . De esta manera se tiene que $D = \alpha \cdot u$.

Para realizar el análisis de los datos y la estimación del factor de dispersión, se utilizó un esquema de cálculo basado en la técnica de momentos temporales (Espinoza y Valocchi, 1997). Se define como momento temporal de orden "i" al término indicado en la ecuación (3)

$$M_i(x) = (-1)^i \lim_{p \rightarrow 0} \frac{d^i \tilde{C}(x,p)}{dp} = \int_{-\infty}^{+\infty} C(x,t) \cdot t^i \cdot dt \quad (3)$$

donde M_i es el momento temporal de orden i , \tilde{C} es la concentración de contaminante en el espacio de Laplace, y p es el parámetro de transformación de Laplace. Además, es posible definir a partir de los momentos temporales anteriores, las siguientes expresiones para los momentos adimensionales de orden 1 y 2:

$$\mu_1(x) = \frac{M_1(x)}{M_0(x)} \quad (4)$$

$$\mu_2(x) = \frac{M_2(x)}{M_0(x)} - \left(\frac{M_1(x)}{M_0(x)} \right)^2 \quad (5)$$

Como se había dicho anteriormente, el estanque de salida actúa como un reactor de flujo pistón. El efecto que ocasiona un reactor de flujo pistón en el problema, es un desfase en la respuesta en un tiempo θ_{H2} , que está relacionado con el tiempo de retención del estanque de salida.

Realizando un análisis matemático del problema planteado en la ecuación (2), e incorporando los procesos que ocurren en las zonas 1 y 3, se puede determinar la siguiente expresión para la concentración de contaminante en el espacio de Laplace:

$$\bar{C}(x, p) = \frac{C_0}{p + 1/\theta_{H1}} \cdot \exp\left(\frac{u - \sqrt{4 \cdot D \cdot p + u^2}}{2 \cdot D} \cdot x - p \cdot \theta_{H2}\right) \quad (6)$$

donde θ_{H1} es el tiempo de retención en el estanque de ingreso, y θ_{H2} es el tiempo de retención en el estanque de salida. Al desarrollar analíticamente los términos para los momentos de orden 0, 1 y 2 (M_0 , μ_1 y μ_2 , respectivamente) se encuentran las siguientes relaciones:

$$M_0 = C_0 \cdot \theta_{H1} \quad (7)$$

$$\mu_1(x) = \theta_{H1} + \theta_{H2} + \frac{L}{u} \quad (8)$$

$$\mu_2(x) = \theta_{H1}^2 + \frac{2 \cdot D \cdot L}{u^3} \quad (9)$$

donde L es la longitud total del permeámetro. Para calcular un momento temporal de orden "i" en una muestra discreta, como es el caso de los datos obtenidos en permeámetro, el cálculo se puede realizar utilizando la expresión siguiente:

$$M_i(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} C(x, t) \cdot t^i \cdot dt \approx \sum_j C_i(x, t_j) \cdot (t_j)^i \quad (10)$$

De los datos experimentales, es posible calcular utilizando la ecuación (10), los momentos de orden cero, primer y segundo orden (M_0 , M_1 , M_2), y a partir de estos valores determinar μ_1 y μ_2 . Con estos valores numéricos y las ecuaciones (7) - (9) es posible caracterizar el suelo en estudio. De la ecuación (9), es posible estimar el valor del coeficiente de dispersión, D.

4. VALIDACIÓN METODOLOGÍA EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS

La validación de la metodología experimental y la estimación del coeficiente de dispersión se realizaron utilizando un suelo de características homogéneas y de una permeabilidad alta, razón por la cual se usó como instrumento de medición el conductímetro eléctrico.

Se realizó un análisis granulométrico de la muestra de arena utilizando un sistema de tamices, obteniéndose la siguiente distribución granulométrica para el suelo:

$$D_{10} = 0.734 \text{ mm}, D_{50} = 1.309 \text{ mm}, \text{ y } D_{60} = 1.403 \text{ mm}$$

El coeficiente de uniformidad (CU) para la muestra es de 1.9, con lo que se podría considerar que la muestra es muy homogénea (poca variedad en el tamaño del grano). Para el caso de este suelo, se estimó mediante el permeámetro un coeficiente de permeabilidad de 0.76 cm/s, valor que se encuentra en el rango de permeabilidades asociadas a arenas bien distribuidas para sedimentos no consolidados.

Para determinar la curva de concentración de sal en función del tiempo, necesaria para determinar el coeficiente de dispersión de este suelo, se realizaron una serie de experiencias. La Figura 3

corresponde a una de éstas, en la cual se tomaron datos durante 2 horas, a una tasa de adquisición de 4 datos por segundo (alrededor de 28800 datos). En la Figura 3 se observan dos curvas, las cuales corresponden al voltaje medido y un promedio móvil. Debido a la sensibilidad del instrumento, se consideró necesario filtrar los datos, y por este motivo se tomó un promedio móvil de 5 datos para atenuar la variabilidad de la curva de voltaje, y trabajar de esa manera con una serie de datos con menor dispersión. El coeficiente de dispersión que se ajustó mejor a la curva experimental para un estrato de suelo de longitud 60 cm, corresponde a un valor de dispersividad igual a $\alpha=0.8$ cm, lo que se encuentra dentro de los rangos para este tipo de suelo (Gelhar, 1992).

5. APLICACIÓN SUELO EN ESTUDIO (COPIAPÓ)

El permeámetro fue rellenado con suelo del terreno en el cual se ubica actualmente la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas de la Ciudad de Copiapó, que presenta las características indicadas en la Tabla 1:

Tabla 1. Caracterización suelo, Planta de Tratamiento Aguas Servidas, Copiapó.

Clasificación	Arena Limosa con presencia de gravas (SP)
Composición	Arena 75%, Grava 20%, Finos 5%
Porosidad [%]	19.0
pH	8.0
Humedad natural [%]	1.7
Capacidad de intercambio catiónico	16.0
Peso específico [Kg/m ³]	2714

De la granulometría realizada en terreno para el suelo de Copiapó, se observa que corresponde a un suelo bien distribuido, con presencia de gruesos (bolones de hasta 20 cm de diámetro equivalente), por lo que fue necesario descartar el material retenido en malla 2.5, con la finalidad de aminorar los efectos de borde y la generación de canales preferenciales que pudieran ocurrir en el permeámetro e influir en los resultados de dispersividad y conductividad hidráulica saturada. En la Tabla 2 se caracteriza el suelo que se utilizó para rellenar el permeámetro

Tabla 2. Suelo Permeámetro Copiapó.

Longitud [cm]	Peso de suelo [kg]	Porosidad [%]	D ₅₀ [mm]
60,0	74,0	32	0,82

Se realizaron una serie de experiencias con el suelo de Copiapó, utilizando un permeámetro de carga constante para estimar la conductividad hidráulica saturada. De esta serie de experiencias, se obtuvo una conductividad hidráulica saturada promedio de 4.3×10^{-3} cm/s, lo que equivale a 3.7 m/día. Este valor es coincidente con aquellos que la literatura provee para materiales de características similares; las arenas limosas presentan valores de permeabilidad entre 10^{-3} - 10^{-5} cm/s.

Para determinar el coeficiente de dispersividad asociado al suelo de Copiapó, se realizaron experiencias utilizando el conductímetro manual, debido a que el suelo en estudio presentaba valores de conductividad hidráulica no muy altos, por lo que el paso de contenido de sal por el estrato de suelo no ameritaba la utilización del sensor automático de conductividad eléctrica. La Figura 4 muestra la curva de conductividad para una de las experiencias realizadas. Como se puede observar de la Figura 4, la experiencia realizada tuvo una duración de cuatro días, aproximadamente. La experiencia se realizó de manera de minimizar la pérdida de sal causada por el caudal descargado por el vertedero (Q2), ajustando el caudal de ingreso de manera que fuera similar al de salida del permeámetro.

El caudal que atravesó el estrato de suelo (Q1) durante la experiencia se estimó en 0.88 cm³/s. Los datos de conductividad se llevaron a valores de concentración utilizando una relación de

equivalencia. Esta relación se generó utilizando dos soluciones salinas: la primera corresponde a agua destilada, la cual presentó una conductividad de $4 \mu\text{S}$, y la segunda a una solución al 1% con una conductividad asociada de $16,85 \text{ mS}$.

El análisis de estos datos de concentración en función del tiempo (Figura 4) se realizó utilizando un programa en FORTRAN 90, que utiliza el método de los momentos temporales para estimar las propiedades del medio poroso. Con los resultados que se obtuvieron de este análisis, se ajustó el valor del coeficiente de dispersión utilizando la solución analítica de Mariño (1974). En la Fig. 4 se muestra el coeficiente de dispersión que mejor se ajusta a la curva experimental para un estrato de longitud de 60 cm , al cual corresponde un valor de dispersividad igual a $\alpha = 0.15 \text{ cm}$.

Este valor de dispersividad se debe considerar como una referencia, ya que una columna de laboratorio no puede contener ni reproducir la situación de terreno, la cual puede presentar fenómenos de estratificación y heterogeneidad importantes. Además, en este caso específico, fue necesario descartar el material retenido por la malla 2.5, con la finalidad de evitar la formación de canales de flujo preferenciales.

Gelhar (1992) realizó una recopilación de valores de coeficientes de dispersión observados en experiencias realizadas para diferentes configuraciones de flujo de la napa (natural e inducido), material de acuífero, y escala de experimentación, entre otros. De esta recopilación se observa que los valores de dispersividad se encuentran en el rango de 10^{-2} a 10^4 m . para escalas de experimentación entre 10^{-1} a 10^5 m . La dispersión mecánica para experiencias realizadas a nivel de laboratorio entrega valores de dispersión del orden de centímetros, mientras que para escalas mayores son del orden de metros (Wang and Anderson, 1982). Se debe considerar además, que el permeámetro fue rellenado con material reconstituido; experiencias realizadas en laboratorio han demostrado que columnas de suelo no perturbadas muestran mayores valores para el coeficiente de dispersión que los observados en columnas reconstituidas. Sin embargo, el valor obtenido en permeámetro para el coeficiente de dispersión del suelo de Copiapó es representativo para la modelación de transporte de contaminantes en columnas de infiltración.

6. CONCLUSIONES

Se presentó una metodología para determinar el coeficiente de dispersión (dispersividad) para suelos naturales, utilizando un dispositivo experimental para el cálculo de conductividad hidráulica (permeámetro).

Esta metodología combina un esquema experimental con un enfoque analítico para estimar el valor del coeficiente de dispersión, a partir de la medición de la conductividad eléctrica (CE) de una muestra de agua, a la cual se ha agregado un trazador salino (NaCl).

Los resultados obtenidos para dos muestras de suelo han sido comparados con datos de la literatura y estos se encuentran dentro de los rangos esperados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el financiamiento de los proyectos FONDECYT 1990062 y FONDECYT 1010526.

REFERENCIAS

Custodio, E. 1976. "Hidrología Subterránea". Ediciones Omega.

Espinoza C. y A.J. Valocchi 1997. Stochastic analysis of one-dimensional transport of kinetically adsorbing solutes in chemically heterogeneous aquifers. *Water Resources Research*, 33(11).

Gelhar L.W. 1992. A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers. *Water Resources Research*, Volume 28, N°7, pp. 1955 - 1974.

Mariño, M.A. 1974. Dispersion of contaminants in porous media flow. *Water Resources Research*, Volume 10, N°5, pp. 1013 - 1018.

Olivares, M. 2000. Estudio experimental y numérico de procesos de mezcla en estuarios estratificados. Memoria para optar al Título de Ingeniero civil. Universidad de Chile.

Vallejos, J. 2001. Elaboración de Bases de Diseño para el Tratamiento Suelo Acuífero (SAT). Aplicación Caso Copiapó. Memoria para optar al Título de Ingeniero civil. Universidad de Chile.

Wang, H. y M.P. Anderson. 1982. *Introduction to groundwater Modelling*. Academic Press.

Figura 3. Curvas de voltaje en función del tiempo.



Figura 4. Curvas de concentración en función del tiempo.

equivalencia. Esta relación se generó utilizando dos soluciones salinas: la primera a agua destilada, la cual presentó una conductividad de 4 μS , y la segunda a un 1% con una conductividad nominal de 18 μS .

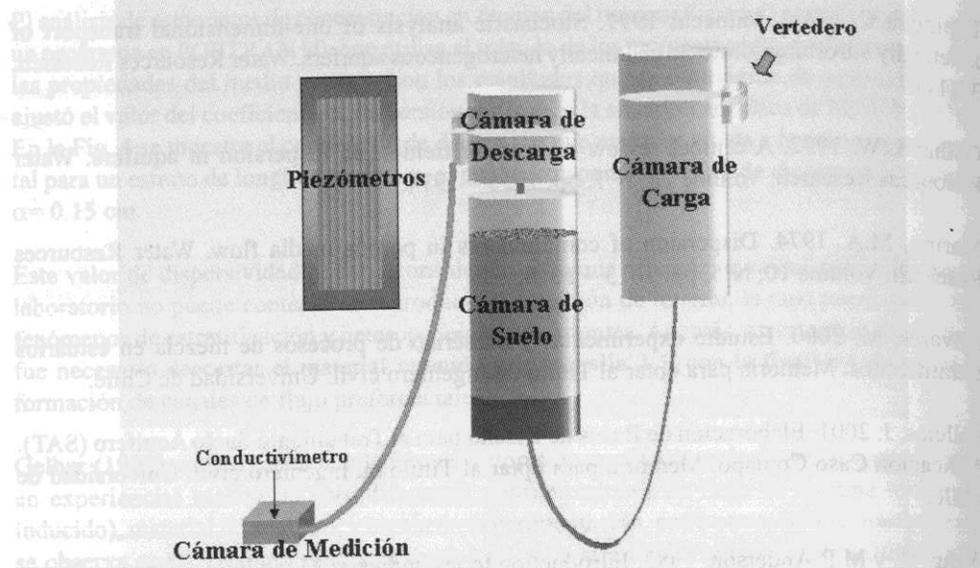


Figura 1. Representación esquemática permeámetro.

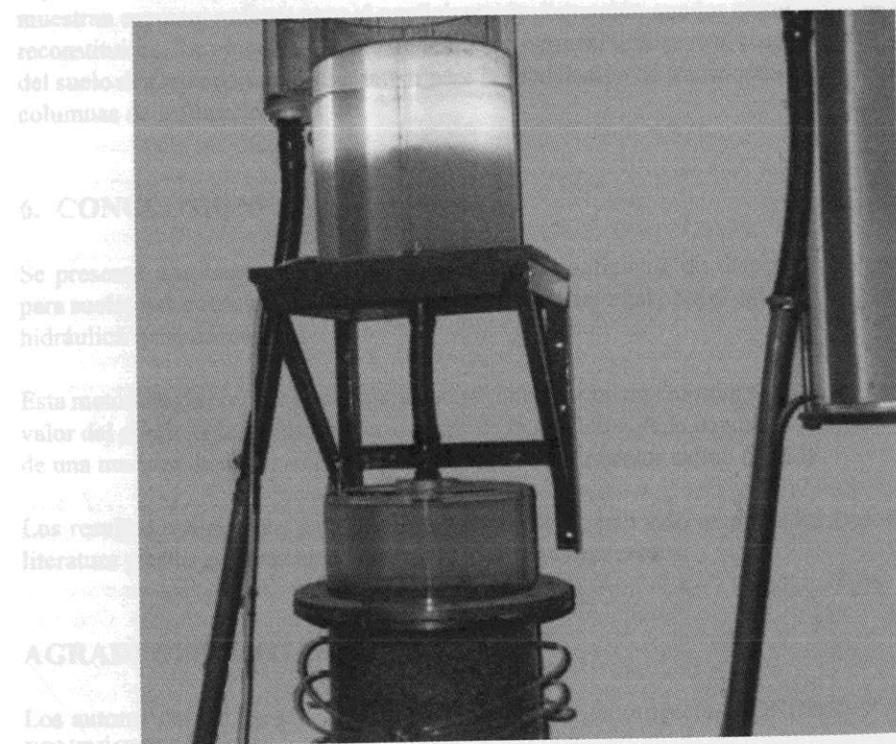


Figura 2. Experiencias determinación coeficiente de dispersión.

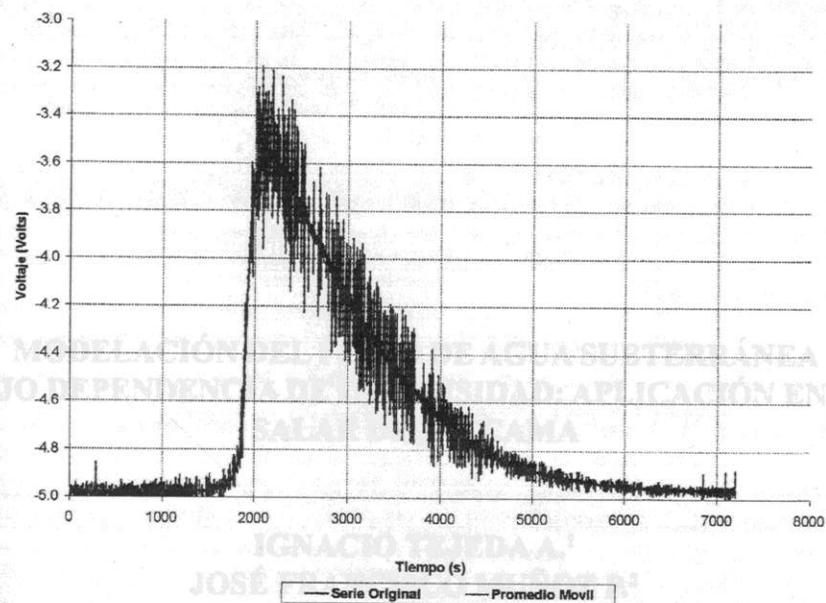


Figura 3. Curvas de voltaje en función del tiempo.

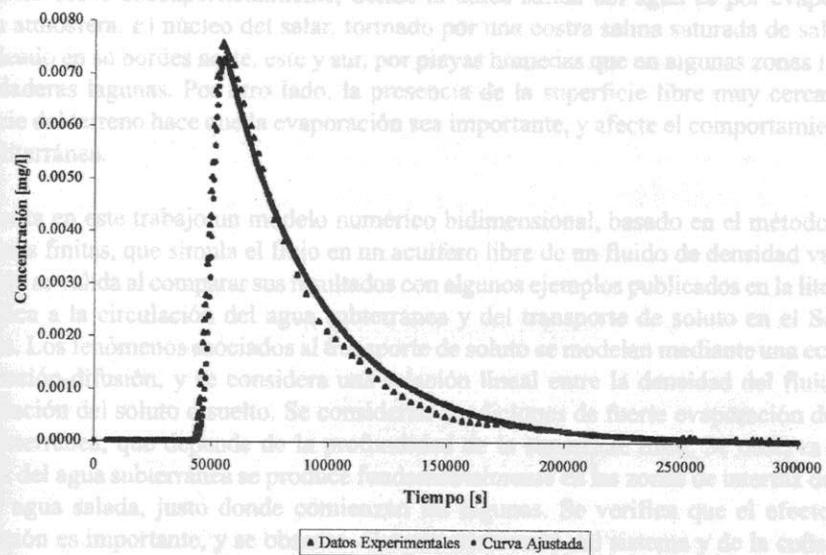


Figura 4. Curva de conductividad, experiencia Copiapó.