



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA



---

---

**“Sistema electrónico de control y monitoreo del flujo y transporte de  
contaminantes en el agua subterránea a escala de laboratorio”**

Tesis que para obtener el título de  
Ingeniero en Electrónica

Presenta

**Eduardo Castañeda Barrera**

Asesor: **Dr. Jaime Gárfias Solíz**

Co-asesor: **Dr. Javier Salas García**

Toluca, México

Septiembre de 2015

*"No existen más que dos reglas para escribir:  
tener algo que decir y decirlo"*

Oscar Wilde (1854-1900)

# AGRADECIMIENTOS

---

*A mi familia, por su incondicional apoyo mantenido a través del tiempo para el cumplimiento de mis metas.*

*A mis amigos, por ser parte fundamental en mi vida social y académica y motivarme para culminar este proyecto.*

*Al Dr. Javier Salas García y al Dr. Jaime Gárfias Solíz, por sus asesorías y sus acertadas observaciones en la elaboración de esta tesis.*

*Finalmente, a aquellos que marcaron cada etapa de mi camino universitario y que me brindaron su apoyo para la culminación de esta tesis.*

# DEDICATORIA

---

*A mis padres, por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación,  
tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente  
mantenido a través del tiempo.*

*Todo este trabajo ha sido posible gracias a ustedes*

# ÍNDICE

---

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	
1.1	Antecedentes .....	1
1.2	Enfoques metodológicos en el estudio de la concentración de la intrusión salina .....	3
1.3	Objetivo del sistema de monitoreo .....	4
1.4	Hipótesis .....	5
1.5	Organización de la tesis .....	5
<b>2</b>	<b>ANTECEDENTES EN EL MONITOREO DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN EL AGUA SUBTERRÁNEA</b>	
2.1	Introducción .....	7
2.2	Ley de Darcy .....	8
2.3	Dispositivos y métodos para monitorear la intrusión salina .....	10
2.4	Experimentación en medios físicos de laboratorio .....	10
<b>3</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>	
3.1	Requisitos del sistema .....	14
3.2	Descripción general del sistema de monitoreo de conductividad eléctrica .....	15
3.3	Soporte físico de sistema (Hardware) .....	16
3.3.1	Estructura mecánica del tanque de experimentación .....	16
3.3.2	Determinación de las propiedades del medio poroso saturado en el tanque .....	19
3.3.3	Funcionamiento del sistema de control hidráulico .....	20
3.3.4	Sistema de medición de la distribución espacial y temporal del contaminante .....	23



# 1. INTRODUCCIÓN

---

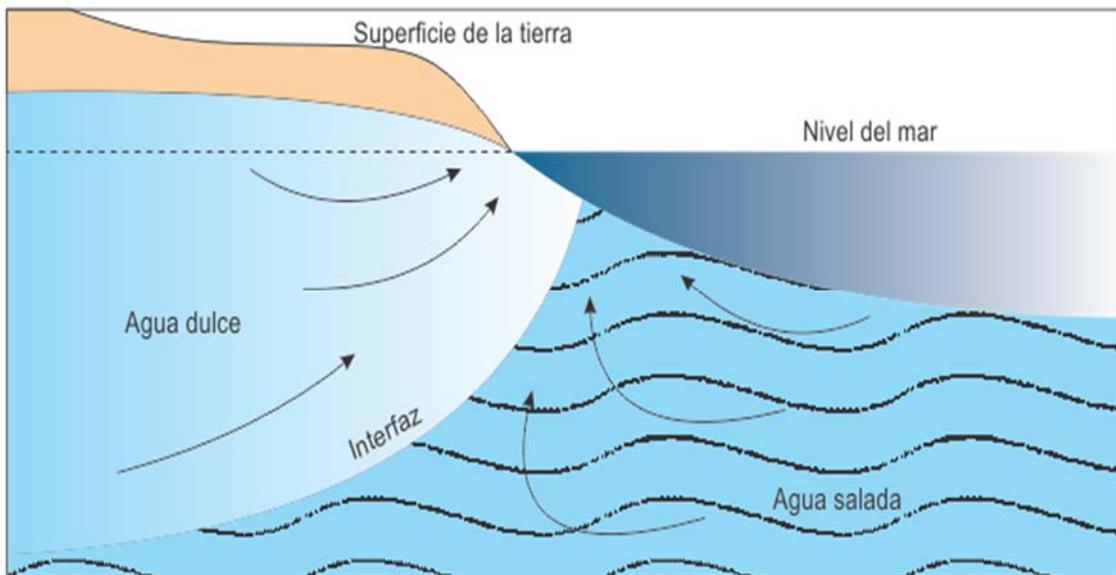
## 1.1 ANTECEDENTES

El agua es vital para la existencia de todos los organismos vivos, por ello, la localización de los asentamientos humanos depende en gran medida de la cercanía a fuentes de agua. Sin embargo, a medida que los asentamientos humanos aumentan, también se eleva la demanda de agua. Así, su calidad y cantidad van en detrimento (Carr et al., 2008).

Uno de los problemas de calidad del agua subterránea está relacionado con la intrusión salina en acuíferos costeros. En términos generales, se llama intrusión salina al movimiento permanente o temporal del agua salada tierra adentro, desplazando u ocupando el volumen correspondiente al agua dulce. El agua captada en un acuífero costero se contamina por efecto de la salinización cuando la zona activa de la captación se ve afectada por la zona de mezcla de ambos fluidos o por el propio frente salino. Sin embargo, no es éste el único proceso de salinización, puesto que si la captación se establece en una masa de agua subterránea dulce por sobre el agua salada, puede producirse una ascensión de agua salada formando un domo o cono salino en la zona de la extracción del recurso hídrico. Otras veces esta contaminación puede provenir de la infiltración de agua de otros acuíferos salinizados, que comúnmente se producen por deficiencias en la construcción y operación de un pozo de extracción.

El problema de la intrusión marina empezó a producirse en zonas costeras con alta densidad de población, donde la demanda de agua dulce era apremiante. Hoy en día, este problema se observa en acuíferos costeros en muchos países del mundo. En los últimos años se han desarrollado una serie de métodos de análisis y modelos para la interpretación del fenómeno, junto a la tecnología necesaria de observación, control y prevención del problema.

Las zonas de agua dulce y salada en los acuíferos costeros están separadas por una zona de transición (a veces conocido como la zona de dispersión), dentro de la cual existe la mezcla entre el agua dulce y salada (Figura 1.1). Dentro de la zona de transición, el agua dulce que fluye hacia el océano se mezcla con agua salada por los procesos de dispersión y difusión molecular (Barlow, 2003). Debido a la mezcla de agua dulce y salada dentro de la zona de transición, se establece una circulación de agua salada en la que parte de ésta es arrastrada hacia el agua dulce y devuelta al mar.



**Figura 1.1** Patrones del flujo del agua subterránea y zona de transición (interfaz) de agua dulce-salada en un acuífero costero idealizado. (Modificado de Barlow, 2003)

Los esfuerzos por enfrentar los problemas en materia de contaminación del agua subterránea han ido acompañados de una exhaustiva labor de comprensión así como una caracterización de los procesos que rigen el transporte de contaminantes en las aguas subterráneas. Sin embargo, debido a que no se ha implementado la instrumentación electrónica adecuada para medir las variables deseadas, el tiempo en realizar estos estudios resulta prolongado y tedioso. El papel que juega la electrónica en dicha problemática cobra cada vez mayor relevancia en términos de la producción de equipos electrónicos, que permitan caracterizar la naturaleza de los problemas de contaminación de aguas subterráneas, la evaluación de modelos matemáticos que los reproducen, así como la cuantificación de los parámetros que determinan la eficacia de algún método de tratamiento.

## **1.2 ENFOQUES METODOLÓGICOS EN EL ESTUDIO DE LA CONCENTRACIÓN DE LA INTRUSIÓN SALINA**

A fin de entender la metodología que se emplea para la caracterización de la intrusión salina, es necesario entender los procesos que tienen lugar en dicho fenómeno. El agua dulce del acuífero y el agua salada del mar son miscibles, por lo tanto, lo que existe es una zona de transición, más que un paso abrupto entre ambas. Esta zona de transición está causada principalmente por el fenómeno de dispersión, interviniendo también el de difusión molecular, aunque en menor grado. Asimismo, la zona puede variar en espesor, desde unos cuantos metros en acuíferos relativamente estables y sin influencia de bombeo, hasta centenares de metros en acuíferos muy sobreexplotados, con pozos que se bombean y se detienen a menudo. La hipótesis de una interfaz abrupta puede conducir a grandes errores.

Una vez que el acuífero se ha contaminado, los esfuerzos han de dirigirse en uno de estos dos sentidos: eliminar o extraer el penacho o lengua de contaminación, o bien evitar su propagación. En cualquier caso, es importante recordar que el efecto del bombeo del agua subterránea establece gradientes hidráulicos y pueden aumentar o disminuir la velocidad de desplazamiento del agua contaminada (FAO, 1981). Sin embargo, para determinar cuál sería la mejor estrategia para combatir la intrusión salina de una zona en particular se requiere de su caracterización en términos de la distribución de su concentración espacial y temporal.

Lo anterior ha dado lugar a la necesidad de construir modelos experimentales físicos, entre los que se hallan los tanques de simulación de intrusión salina a escala intermedia. De este modo, los experimentos en medios porosos heterogéneos, llevados a cabo en sistemas a escala de laboratorio, se han utilizado con frecuencia en la comprobación del comportamiento simulado por los modelos numéricos antes de su aplicación a medios heterogéneos en el campo. En este sentido, Silliman et al. (1998) proporcionan una revisión de algunas de estas investigaciones. Además, Fuster et al., (2008) resumen algunos trabajos de laboratorio, así como el método utilizado para tomar información de éstos. Sin embargo, una limitación adicional encontrada es que la mayoría de estos experimentos se realizan de forma manual y presencial, es decir, que requieren la intervención continua del investigador durante el experimento para controlar las variables del sistema y para tomar las mediciones de los instrumentos incorporados.

En este sentido, se requiere la fabricación de un sistema electrónico que sea capaz de determinar de forma automática y programable la evolución de un contaminante en un medio poroso homogéneo bajo distintas condiciones. De tal forma que reproduzca distintos escenarios del medio natural, como una herramienta útil en las investigaciones relacionadas con la conductividad eléctrica del agua salina en acuíferos costeros.

La instrumentación adecuada (transductores de presión y métodos de monitoreo y procesamiento de datos) permite que los experimentos en un medio poroso heterogéneo, a escala intermedia o ISE (por sus siglas en inglés de *intermediate scale experiments*), se usen para caracterizar la distribución espacial de niveles piezométricos, así como velocidades locales del agua en medios permeables con una mejor correlación espacial (Silliman et al., 1998). Como resultado de la mayor capacidad computacional que hace unos años existía, los datos obtenidos a partir de dicha instrumentación pueden ser integrados con mayor facilidad a un modelo numérico con el uso de microprocesadores, así como de protocolos de comunicación cada vez más eficaces.

### **1.3 OBJETIVO DEL SISTEMA DE MONITOREO**

Dada la importancia de los recursos hídricos en un acuífero costero, así como el fenómeno de la intrusión salina por efecto de la sobreexplotación de un acuífero, la presente tesis tiene

como finalidad diseñar y construir un sistema para cuantificar la evolución espacial y temporal de la conductividad eléctrica en un medio permeable, con el fin de conocer la dinámica del agua subterránea ante el avance de un frente salino.

Para alcanzar el objetivo de esta tesis, se propone el desarrollo de un dispositivo con interfaz *USB (Universal Serial Bus)* empleando un microcontrolador con matrícula PIC18F4550 (Microchip, 2009), el cual se encargará del cumplimiento de los objetivos particulares. En primer lugar, dicho microcontrolador coordinará las operaciones de: (1) la comunicación que establezca el dispositivo desarrollado en esta tesis con la computadora para transmitir los parámetros de operación al sistema y enviar los datos medidos a la computadora para su pos-procesamiento; (2) la adquisición de datos de conductividad eléctrica de una red tridimensional de sensores distribuidos en el interior de un tanque lleno con arena (medio poroso homogéneo); (3) el control y el monitoreo de la inyección de un contaminante de concentración conocida en el medio poroso homogéneo a través de un sistema de electroválvulas. La configuración del sistema se realizará desde la computadora. Los datos de los experimentos realizados en el reactor tendrán la resolución espacial y temporal suficiente para su incorporación en un modelo numérico de flujo y transporte de contaminantes, que para fines de análisis complementa un proyecto de evaluación de acuíferos contaminados y remediación.

#### **1.4 HIPÓTESIS**

Es posible diseñar un sistema de monitoreo y control de flujo y concentración de contaminantes en un medio homogéneo poroso a escala de laboratorio a partir de la medición de la conductividad eléctrica, con base en un sistema de adquisición de datos con interfaz *USB (Universal Serial Bus)* utilizando un microcontrolador PIC18F4550. Además de desarrollar una aplicación de escritorio que constituye la interfaz de comunicación entre el usuario y el microcontrolador, con un costo menor a equipos comerciales que se operan de forma manual para medir el mismo parámetro.

#### **1.5 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS**

A continuación se describe la manera en que los capítulos, que conforman esta tesis, contribuyen al alcance del objetivo.

El capítulo 2 titulado “Antecedentes en el monitoreo de la conductividad eléctrica en el agua subterránea”, proporciona un panorama general de los métodos utilizados para el monitoreo de la conductividad eléctrica en medios porosos, así como una descripción de los experimentos de laboratorio en medios porosos heterogéneos que han sido utilizados para el estudio de los sistemas saturados y no saturados. Entre algunas de sus aplicaciones que se le ha dado a estos experimentos se encuentra el estudio de la conductividad eléctrica en medios permeables.

El capítulo 3, “Materiales y métodos”, tiene por objetivo detallar los requisitos que debe de tener el sistema, es decir, lo necesario para determinar la evolución espacial y temporal de la conductividad eléctrica en un medio permeable. En este apartado se describe el sistema de control y monitoreo, se detalla el soporte físico del sistema, incluyendo la estructura mecánica del tanque de experimentación y el funcionamiento del sistema de control hidráulico. Se describe la tarjeta de adquisición de datos que forma parte del *hardware* del sistema, así como la estructura lógica del sistema (*software*), misma que incluye la interfaz de comunicación con el usuario y las variables de programación de control.

El capítulo 4, “Resultados y discusión”, tiene por objetivo describir las propiedades del sistema y su calibración, así como su funcionamiento para posteriormente procesar los datos obtenidos.

Finalmente, el objetivo del capítulo 5 es integrar de manera general los resultados del sistema y comparar con experimentos realizados, con el objeto de validar su implementación en el contexto de pruebas de laboratorio.

## **2. ANTECEDENTES EN EL MONITOREO DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN EL AGUA SUBTERRÁNEA**

---

### **2.1 INTRODUCCIÓN**

En el campo de la hidrología a través de la historia se han registrado experimentos de laboratorio para el monitoreo de la conductividad eléctrica en medios porosos, empleando dispositivos electrónicos cada vez más sofisticados. Lo anterior ha permitido la construcción de modelos experimentales físicos, entre los que se hallan los tanques de simulación de flujo y transporte de contaminantes a escala intermedia, los cuales, entre sus muchas aplicaciones permiten estudiar indirectamente la concentración de la intrusión salina a partir de la conductividad eléctrica, objeto de estudio de esta tesis.

En un acuífero costero, existe una relación de equilibrio natural entre el agua subterránea dulce del acuífero que descarga al mar y el agua salada de origen marino que entra tierra adentro, y que usualmente lo hace en forma de cuña apoyada en la base del acuífero dada su mayor densidad. La penetración de esta cuña dependerá de las características del acuífero: geometría y propiedades hidráulicas. La intrusión marina es un proceso dinámico, donde el frente de agua salada avanza tierra adentro en los periodos de menor recarga del acuífero y retrocede hacia el mar cuando la recarga es mayor (López Geta, 2007).

Se han aplicado diferentes métodos para el estudio de la intrusión salina en los acuíferos costeros. Los métodos son los siguientes: geoquímicos, con énfasis en los análisis de cloruros y bromuros, conductividad eléctrica en pozos; geofísicos como los de resistividad eléctrica verticales (SEV), transitorio electromagnético (TEM) y gravimetría (complementario); matemáticos utilizando el modelo SHARP e hidrodinámicos estudiando la evolución de la piezometría y gradientes hidráulicos (Castillo, 2003).

En este capítulo se presenta una descripción de métodos y experimentos que describen la concentración de la intrusión salina y de solutos conservativos en medios porosos. Primero se describe la ley de Darcy, que para el caso de esta tesis es una opción para calcular el flujo de agua a través de un medio poroso en condiciones de saturación en función de algunas condiciones de frontera del sistema y del medio poroso. Posteriormente, se describen algunos métodos y dispositivos descritos en la literatura científica que han permitido monitorear la intrusión salina incluyendo su resolución espacial y temporal. Así mismo, se da un breve resumen de experimentos realizados en tanques de escala intermedia, así como de los objetivos y métodos de adquisición de datos.

## 2.2 LEY DE DARCY

El flujo de agua a través de medios porosos está gobernado por una ley descubierta experimentalmente por Henri Darcy en 1856 (Badillo, 2002), la cual establece que el caudal de éste es proporcional al gradiente hidráulico (Whitlow, 1994). Al trabajar con dispositivos de diseño especial (Figura 2.1), Darcy encontró que para velocidades suficientemente pequeñas, el flujo de agua está expresada por:

$$Q = KA \frac{dh}{dl}, \quad (2.1)$$

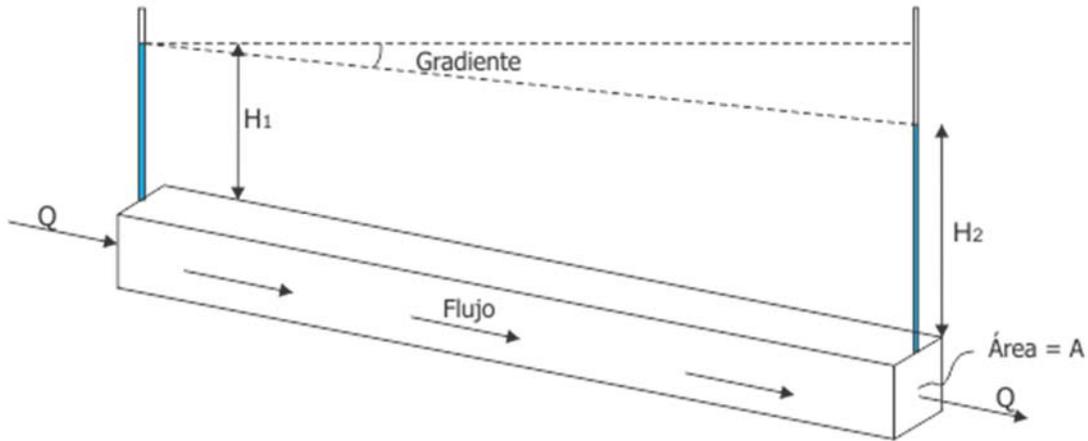
donde  $Q$  es el caudal, es decir, la cantidad de agua en una unidad de tiempo ( $m^3/s$ ),  $A$  es el área transversal de control ( $m^2$ ),  $dh \cdot dl^{-1}$  es el gradiente hidráulico, definido como la pérdida de carga  $dh$  a lo largo de una longitud  $dl$  (Delleur, 1999) y no tiene dimensiones.  $K$  representa la conductividad hidráulica ( $m/s$ ), o coeficiente de permeabilidad, la cual es una medida de la resistencia al flujo ofrecida por el medio poroso y depende de diversos factores

como: la densidad del medio poroso, la forma y orientación de las partículas de éste, la viscosidad del agua del suelo, la distribución del tamaño de las partículas, así como el grado de saturación (Whitlow, 1994).

La ley de Darcy es válida en términos del número de Reynolds,  $N_R$ ,

$$N_R = \frac{qD}{\nu}, \quad (2.2)$$

donde  $q$  es la velocidad ( $m/s$ ),  $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido ( $m^2/s$ ) y  $D$  es en ocasiones tomado como el diámetro eficaz de las partículas ( $m$ ). El número de Reynolds expresa la relación de la inercia de las fuerzas viscosas durante el flujo (Delleur, 1999). Para un flujo laminar, como generalmente ocurre en un medio poroso (Delleur, 1999), la ley de Darcy es válida si los valores del número de Reynolds no exceden el rango de 1 a 10. Por el contrario, cuando el flujo es turbulento, con  $100 < N_R < 1000$ , la ley de Darcy no es válida (Hiscock, 2005).



**Figura 2.1** Esquema simplificado del flujo en un medio poroso basado en la fórmula de Darcy (modificado de Whitlow 1994).

### **2.3 DISPOSITIVOS Y MÉTODOS PARA MONITOREAR LA INTRUSIÓN SALINA**

La exploración geofísica es la prospección de estructuras geológicas y de depósitos minerales realizada por medio de la medición de ciertas cantidades físicas, verificadas en la superficie del terreno como fenómenos que pueden ser interpretados por las leyes fundamentales de la física y el empleo de instrumentos adecuados (Castillo, 2003). Éstas originan cuatro métodos geofísicos: gravimétrico, magnético, sísmico y eléctrico. Los métodos de resistividad eléctrica y electromagnéticos en superficie son la única herramienta que encaja en la exploración del agua subterránea en la zona costera. Su capacidad inherente para detectar cambios en la conductividad del agua contenida en los poros la hace responder altamente a la interfaz agua dulce-agua salada encontrada en las regiones costeras e islas. Esta tesis hace uso de éste último método, pues se cuantifica la evolución espacial y temporal de un contaminante a partir de su conductividad eléctrica.

Para plantear un modelo hidrogeológico en tres dimensiones en una zona donde las condiciones son particularmente extremas para la aplicación de métodos de corriente continua como el SEV, debido a la dificultad que presentan las líneas de corriente para cruzar estratos altamente conductores como aquellas zonas invadidas por agua de mar, o bien problemas de una alta resistencia de contacto por las arenas secas, que hacen de esta técnica una tarea compleja, ya que se han observado en ciertos casos lecturas de voltaje que están fuera del alcance de medición de los equipos. Estas aparentes desventajas de la técnica del SEV han conducido a la experimentación en medios físicos de laboratorio con el objetivo de detectar cambios en la conductividad del agua contenida en medios porosos.

### **2.4 EXPERIMENTACIÓN EN MEDIOS FÍSICOS DE LABORATORIO**

Los experimentos de laboratorio en medios porosos heterogéneos son conocidos como Experimentos a Escala Intermedia, o ISE (por sus siglas en inglés de intermediate scale experiments), y están considerados para el estudio de los sistemas saturados y no saturados. Entre sus muchas aplicaciones se encuentra el estudio de la conductividad eléctrica de solutos conservativos en medios permeables, que presentan una cierta estructura de correlación (Silliman et al., 1998).

Estos estudios tienen su inicio en los años 1950 a 1960, con Orlob y Radhakrishna en 1958, Harlem en 1963, Rumer en 1962 y Pfannkuch en 1963, los cuales tuvieron como objetivo de entender mejor el transporte y dispersión de solutos conservativos en medios porosos heterogéneos y homogéneos, proporcionando una percepción sustancial del proceso de dispersión mecánica, además de la relación entre el coeficiente de dispersión longitudinal, así como las propiedades del medio poroso y las velocidades en ellos (Silliman et al., 1998).

En las investigaciones realizadas, éstas se han apoyado de algunas herramientas como transductores de presión, sensores de conductividad, adquisición y procesamiento de imágenes, que permiten aproximar la distribución espacial de la conductividad eléctrica y los niveles de flujo en sistemas saturados y no saturados. Por ejemplo, Ursino en 2001 utilizó un trazador fluorescente (sulfaflavina) y obtuvo datos a partir de una imagen digital, así como el modelo de experimentación utilizado por Silliman et al., (1998) que ha servido como referencia para experimentos posteriores. Sánchez Fuster (2008) resume algunos de estos trabajos de laboratorio a escala intermedia, así como el método utilizado para tomar información (Tabla 2.1).

**Tabla 2.1** *Investigación del flujo y transporte mediante experimentación a escala intermedia (Sánchez Fuster et al., 2008).*

<b>Autores</b>	<b>Medidas de tanque</b>	<b>Naturaleza del medio</b>	<b>Sistemas de medida. Niveles piezométricos/ Trazador</b>	<b>Trazador utilizado</b>	<b>Objetivos del estudio</b>
<b>Silliman, S.E., Simpson (1987)</b>	2.4m x 105m x 0.1m	Arena silícea, heterogéneo	Tubos piezométricos Sensores eléctricos	NaCl	Comprobación en el laboratorio de la escala en la dispersión de solutos
<b>Schincariol, R.A., Schwartz, F.W. (1990)</b>	1.07m x 0.71m x 0.05m	Arena silícea, heterogéneo	Tubos piezométricos Sensores eléctricos	NaCl	Estudio experimental del comportamiento de fluidos de densidad variable en medios homogéneos
<b>Oostrom et al. (1999)</b>	1.67m x 0.05m x 0.1m	Arena silícea, heterogéneo	Transductores de presión Sensores de radiación gama	Tricloro-etileno (TCE)	Estudio del flujo y transporte de tricloroetileno en un medio heterogéneo
<b>Silliman, S.E., Zheng, L. (2001)</b>	1.6m x 0.67m x 0.094 m	Arena silícea, heterogéneo	Transductores de presión Sensores eléctricos	NaCl	Comprobación en laboratorio de varias teorías estocásticas en un medio de alta heterogeneidad
<b>Ursino et al. (2001)</b>	0.75 m x 0.40m x 0.05 m	Arena silícea, heterogéneo	Ninguna Fotografía digital	Fluoresceína	Estudio de la dispersión local de trazadores no conservativos en la zona no saturada
<b>Barth et al. (2001)</b>	10 m x 1.2 m x 0.06 m	Arena silícea, heterogéneo	Tubos piezométricos Sensores eléctricos	KBr	Comprobación en laboratorio de una corrección de las inestabilidades debidas a la mayor densidad de los trazadores en los ensayos de transporte
<b>Thullner, M. (2002)</b>	0.56 m x 0.54 m x 0.01 m	Esferas de cristal	Ninguna Fotografía digital	Briliant Blue FCF	Estudio de la interacción del crecimiento bacteriano con el flujo en la zona saturada
<b>Jalbert et al. (2003)</b>	1.67 m x 0.05 m x 0.62 m	Arena silícea, heterogéneo	Transductores de presión Sensores de radiación	Tricloro-etileno (TCE)	Comprobación en laboratorio de fiabilidad en los test de partición inter-pozos

**Tabla 2.1 (Continuación).**

<b>Autores</b>	<b>Medidas de tanque</b>	<b>Naturaleza del medio</b>	<b>Sistemas de medida: Niveles piezométricos/ Trazador</b>	<b>Trazador utilizado</b>	<b>Objetivos del estudio</b>
<b>Frippiat, C., Servais, T. (2003)</b>	1 a 2m (modificable) x 0.8m x 1.2m	Muestras de suelo natural, heterogéneo	- Sensores eléctricos	NaCl	Obtener dispersividades reales en escalas intermedias (1 m aprox.)
<b>Dunn, A.M., Silliman, S.E. (2003)</b>	0.51 m x 0.16 m x 0.34 m	Arena silíceo heterogéneo	Tubos piezométricos Reflectometría de dominio de tiempo (TDR)	-	Estudio del atrapamiento de burbujas de aire al ascender del nivel freático
<b>Levy, M., Berkowitz. (2003)</b>	2.13 m x 0.65 m x 0.1 m	Arena silíceo heterogéneo	Tubos piezométricos Fotografía digital	NaCl y Brilliant Blue FCF	Medida de las curvas de llegada reales y su evaluación utilizando tanto la ecuación de advección-dispersión (ADE) como el "Continuous Time Random Walk" (CTRW)
<b>Rovey, C.M., Niemman, W.L. (2005)</b>	1.60 m x 0.67 m x 0.60 m	Arena silíceo homogéneo	Tubos piezométricos Sensores eléctricos y fotografía digital	NaCl y Brilliant Blue	Estudio del movimiento de contenidos y su relación con la velocidad de Darcy
<b>McNeil et al. (2006)</b>	6.25 m x 1.25 m x 0.05 m	Arena silíceo heterogéneo	Tubos piezométricos Fotografía digital	Rodamina WT	Desarrollo de un método de estimación cuantitativa de concentración utilizando imagen digital
<b>Sánchez Fuster et al. (2008)</b>	1.40 m x 0.4 m x 0.05 m	Arena silíceo heterogéneo	Transductores de presión Fotografía digital	Brilliant Blue FCF	Estudio de la macrodispersión en medios con vías de flujo preferente
<b>Catania et al. (2008)</b>	2 m x 2.8 m x 0.1 m	Esferas de cristal	- Fotografía digital	Fluoresceína	Diseño y construcción de un modelo físico a escala intermedia

# 3. MATERIALES Y MÉTODOS

---

Los avances recientes en las tecnologías de adquisición de datos como lo son sensores de presión y sensores de conductividad, han permitido que los ISE sean una opción adecuada para describir la conductividad eléctrica, así como el flujo y transporte de solutos en medios saturados y no saturados. En este capítulo se sintetiza el conjunto de materiales requeridos y métodos utilizados para el monitoreo del transporte de un contaminante en un medio poroso.

## 3.1 REQUISITOS DEL SISTEMA

El estudio del proceso de la dispersión de solutos en un medio poroso heterogéneo tiene como finalidad describir y predecir el movimiento de los contaminantes en acuíferos reales, con la complejidad derivada de los patrones espaciales de heterogeneidad y otras incertidumbres en el conocimiento del medio.

Esta tesis pretende monitorear la variabilidad local de la dispersividad basándose en un experimento de flujo y transporte de solutos (contaminantes) en un tanque de experimentación de escala intermedia (*Intermediate Scale Experiment*, ISE). Los medios disponibles actualmente para el monitoreo, la adquisición y el procesamiento de los datos en este tipo de experimentos permiten la obtención de información exhaustiva de ensayos controlados constituyendo una oportunidad todavía no agotada para la investigación en aspectos básicos de conductividad eléctrica de solutos.

En el desarrollo de esta tesis, se ha construido un medio poroso artificial en un tanque de experimentación. Controlando el potencial hidráulico a la entrada y la salida del tanque, de longitud 1.0 m, altura 0.50 m y ancho 0.50 m, se crearon condiciones de flujo estacionario en las que se llevaron a cabo varios ensayos de transporte de trazadores conservativos. Este

tanque, construido en acrílico con soportes de acero, fue monitoreado con una red de transductores de presión de alta precisión y sensores de conductividad eléctrica para describir la evolución de un trazador contaminante inyectado.

### **3.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA DE MONITOREO DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA**

A fin de explicar la construcción tanto del sistema electrónico como del tanque de simulación con un medio poroso saturado basado en las propiedades de una formación geológica real, su estructura se ha dividido en bloques. De forma sucinta, son los siguientes:

Interfaz: es la parte que realiza la conexión lógica y física entre el puerto *USB* de la computadora y las demás etapas del dispositivo. El sistema propuesto es programable, desde una computadora personal se puede indicar la inyección del contaminante al medio, éste es de una concentración conocida y permite monitorear su conductividad eléctrica a intervalos programables.

Contenedor: recipiente en el cual se miden los patrones de dispersión del contaminante y en el cual se simula un medio poroso natural mediante la compactación de arena en su interior. La Figura 3.1 muestra un diagrama esquemático de dicho contenedor, dividido en tres secciones, la sección primera corresponde a la salida de la mezcla homogénea del agua y contaminante. En la segunda sección de la misma figura está alojado el medio poroso, es en esta parte donde se inyecta el contaminante eligiendo entre dos patrones de dispersión: puntual y lineal. Además, contiene matrices de sensores de conductividad eléctrica, que permiten la caracterización del flujo del contaminante en función del tiempo, debido a que la solución contaminante aplicada es empleada como elemento trazador al incrementar la conductividad eléctrica, se aplican las leyes físicas de la resistencia eléctrica. Cada sensor de conductividad lo constituyen un par de placas cuadradas de acero inoxidable de 15 mm y de 1 mm de grosor separadas a una distancia de 5 mm. El agua que se le suministra al sistema de manera uniforme se encuentra alojada en la tercera sección, es decir, el flujo del agua y del contaminante va de la sección 3 a la 1. Esta agua proviene de un contenedor (8) que libera el líquido a una presión constante.

Depósito del contaminante (7): almacena un contaminante de concentración conocida con un colorante azul.

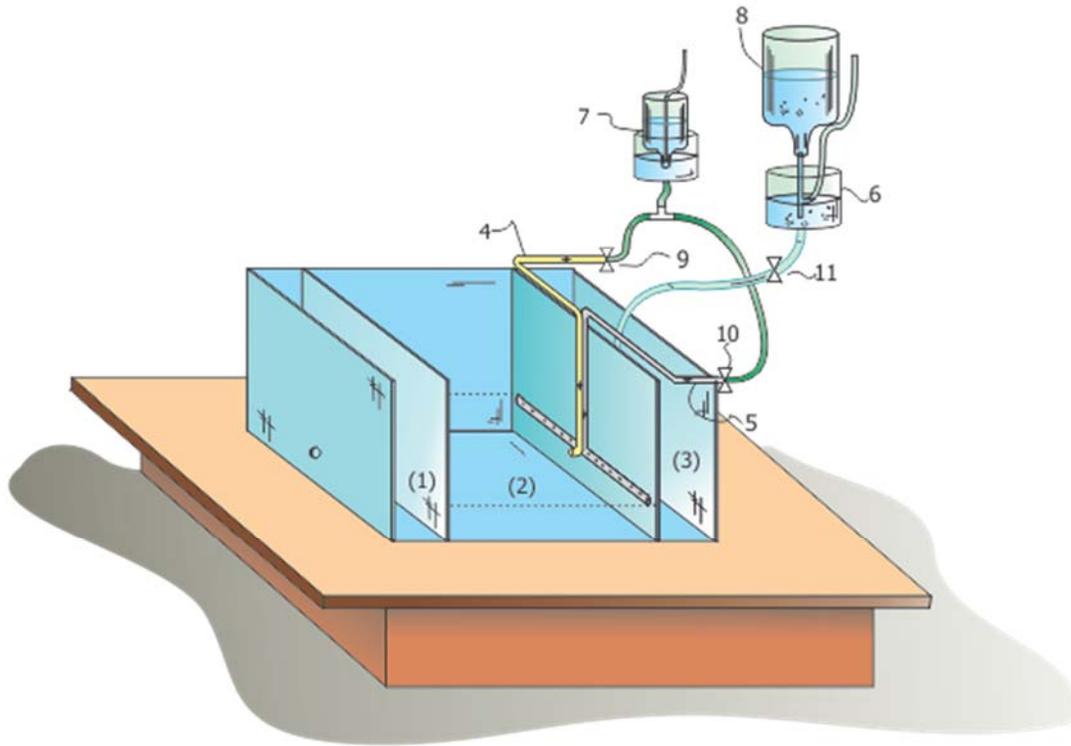
Selección de patrones de dispersión: es un conjunto de bombas y válvulas (9, 10) cuya configuración determina si el patrón de inyección del contaminante será puntual o lineal. Estos dispositivos son activados por un microcontrolador con matrícula PIC18F4550, el cual recibe instrucciones por el usuario desde una interfaz gráfica en una computadora personal. Al activar alguna de las válvulas, el contaminante fluye siguiendo una trayectoria (4, 5) de acuerdo al patrón de dispersión seleccionado.

Depósito de agua (8): es un recipiente en el cual se almacena agua, misma que es suministrada al contenedor a una presión constante, para lograr esto, se incorpora un frasco de Mariotte (6), el cual es un dispositivo destinado a conseguir una velocidad constante para el líquido. Cuenta con una bomba (11) que es accionada a través de un microcontrolador de acuerdo a lo indicado por el usuario. Además, el sistema contiene una malla tridimensional de 36 sensores de conductividad eléctrica que permiten el monitoreo del contaminante (trazador) en función del tiempo. Previamente a la incorporación de los sensores de conductividad eléctrica en el medio poroso (2), se realiza una etapa de calibración de los mismos. El experimento se realiza de forma programable, automática y con la opción de ser monitoreado y controlado a través de una computadora mediante comunicación USB utilizando un CDC (Communications Devices Class).

### **3.3 SOPORTE FÍSICO DEL SISTEMA (HARDWARE)**

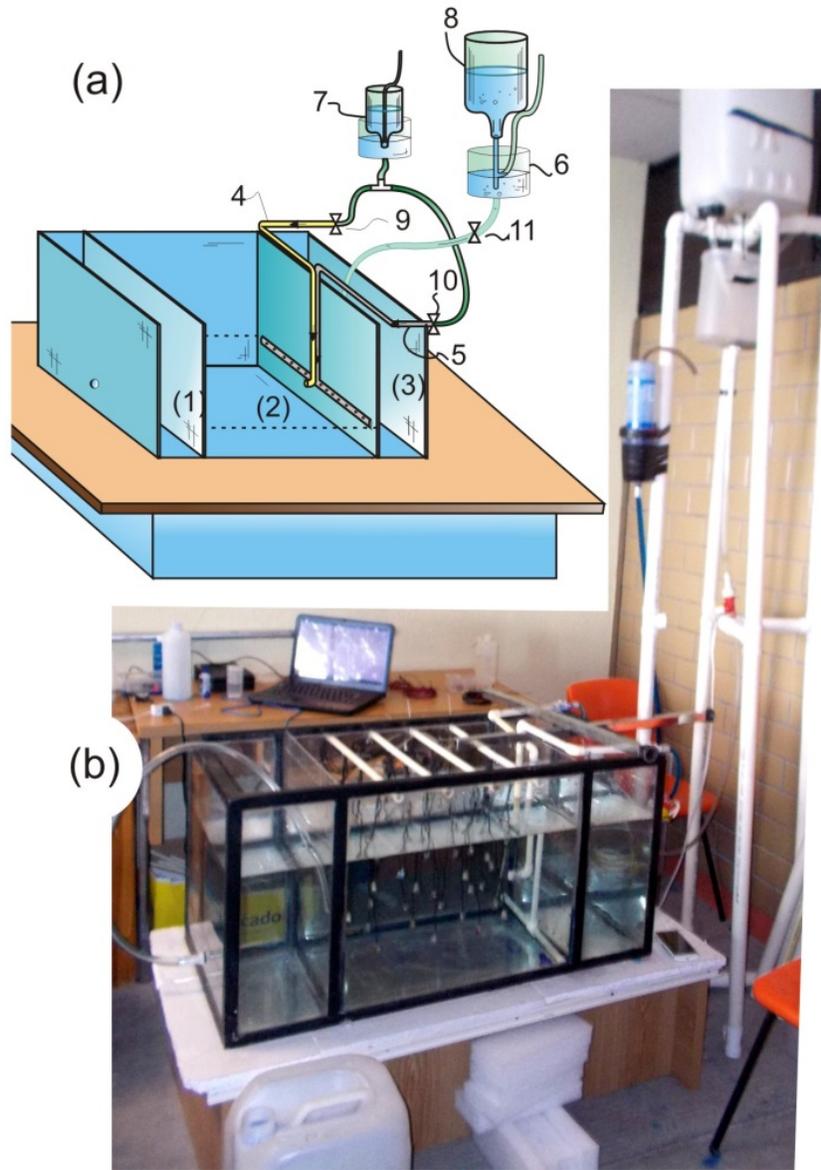
#### **3.3.1 Estructura mecánica del tanque de experimentación**

Respecto a los materiales usados para la construcción del tanque, en algunos casos es conveniente el uso de materiales metálicos, pero en general se trata de tanques con paredes de vidrio o acrílico sobre un armazón de acero que les confiere la resistencia suficiente para soportar el peso del medio. El cristal, al ser más pesado y rígido, y dado que presenta mayores dificultades en el corte y la perforación de agujeros, se utiliza principalmente en tanques de pequeño tamaño para estudios cualitativos. Las paredes de acrílico, por otro lado, permiten una mayor deformación (lo que a veces es un inconveniente para su sellado) por lo que pueden soportar un mayor peso de arena.



**Figura 3.1** Diagrama esquemático con las partes principales del tanque de simulación.

Por esta razón se utilizan preferentemente en tamaños de tanque del orden de un metro o mayores. En los tanques bidimensionales, una de las paredes contiene todos los puertos de medición y muestreo, mientras que la pared contraria queda despejada para poder ver a simple vista o registrar con cámara fotográfica o de video el paso del trazador. No es necesario que las paredes con las cuales está construido el tanque de simulación sean transparentes, aunque así sucede casi en la totalidad de los trabajos revisados. Para el caso de este experimento se optó por utilizar un contenedor de paredes de acrílico con el fin de visualizar parte del proceso de llenado del tanque, además de estar soportado por un armazón de acero, como lo muestra la Figura 3.2 que es una fotografía del sistema.



**Figura 3.2** Soporte físico del sistema. (a) Diagrama esquemático y (b) fotografía de las partes principales del tanque de simulación. (Fuente: elaboración propia).

### 3.3.2 Determinación de las propiedades del medio poroso saturado en el tanque

En la literatura científica existen tanques de arena de muy diverso tamaño. De manera general, en aquellos tanques dedicados al estudio cuantitativo de la dispersión en medios heterogéneos, su tamaño es mayor comparado con los tanques dedicados a experimentos de estudio cualitativo del comportamiento de contaminantes en el subsuelo (Thullner et al., 2002).

En ocasiones se ha optado por utilizar materiales diferentes a la arena de sílicea para construir el medio poroso, con la idea de obtener un medio transparente o semitransparente que permita observar el comportamiento de los trazadores en la profundidad del medio, recientemente se ha utilizado arena de criolita ( $Na_3AlF_6$ ) debido al índice de refracción que tiene que es igual al del agua obteniendo un medio casi transparente (Sánchez Fuster et al., 2008).

Un medio poroso es aquel medio formado por partículas sólidas de diferentes tamaños y composiciones químicas donde ocurren interacciones con el aire y el agua. Dependiendo de la relación entre aire y agua se clasificará al medio como: no saturado y saturado. En el primer caso, los espacios entre partículas sólidas están llenos de aire, excepto por una película de agua que se forma alrededor de la superficie de éstas y que es muy difícil de eliminar o extraer. En el segundo caso (medio poroso saturado), en la condición de saturación, el aire es expulsado de los espacios entre partículas casi en su totalidad, debido a la presencia del agua.

Cabe mencionar que la condición hidráulica y las propiedades físicas del medio poroso son fundamentales para su caracterización. Los parámetros físicos que fueron considerados para preparar el medio poroso fueron los siguientes:

Diámetro de las partículas sólidas. El medio poroso se puede tamizar, de modo que se determine la proporción de tamaños de las partículas que lo componen. Los resultados se pueden presentar como una curva acumulada, donde las marcas de clase de los tamaños de partícula van en el eje horizontal, en una escala logarítmica; y en el eje vertical va el porcentaje retenido o que deja pasar cada tamiz. También se pueden presentar en un triángulo

de textura, donde se puede clasificar el medio por la proporción que existe entre los diferentes tamaños.

Densidad de las partículas. Las partículas sólidas se pueden caracterizar por medio de la expresión siguiente:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}, \quad (3.1)$$

donde  $\rho_s$  es la densidad de las partículas sólidas ( $kg/m^3$ );  $m_s$  es la masa de las partículas ( $kg$ );  $V_s$  es el volumen que ocupan las partículas ( $m^3$ ). La densidad del medio o de la muestra se determinó con la expresión:

$$\rho_b = \frac{m_s}{V_T}, \quad (3.2)$$

donde  $\rho_b$  es la densidad del medio ( $kg/m^3$ );  $m_s$  es la masa de las partículas ( $kg$ );  $V_T$  es el volumen total en  $m^3$  (incluyendo partículas, agua y aire). Para determinar la porosidad,  $n$ , del medio usado en el tanque de simulación, se empleó la ecuación (Hiscock, 2005):

$$n = \frac{V_{aire} + V_{agua}}{V_t} = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}, \quad (3.3)$$

Para calcular la porosidad del medio en el tanque de simulación se utilizó la ecuación anterior aplicada a un volumen conocido  $V_t$  ( $m^3$ ) con una cantidad de agua conocida  $V_{agua}$  ( $m^3$ ), como se trata de un medio saturado, el volumen de aire se considera cero  $V_{aire} = 0$  ( $m^3$ ).

### 3.3.3 Funcionamiento del sistema de control hidráulico

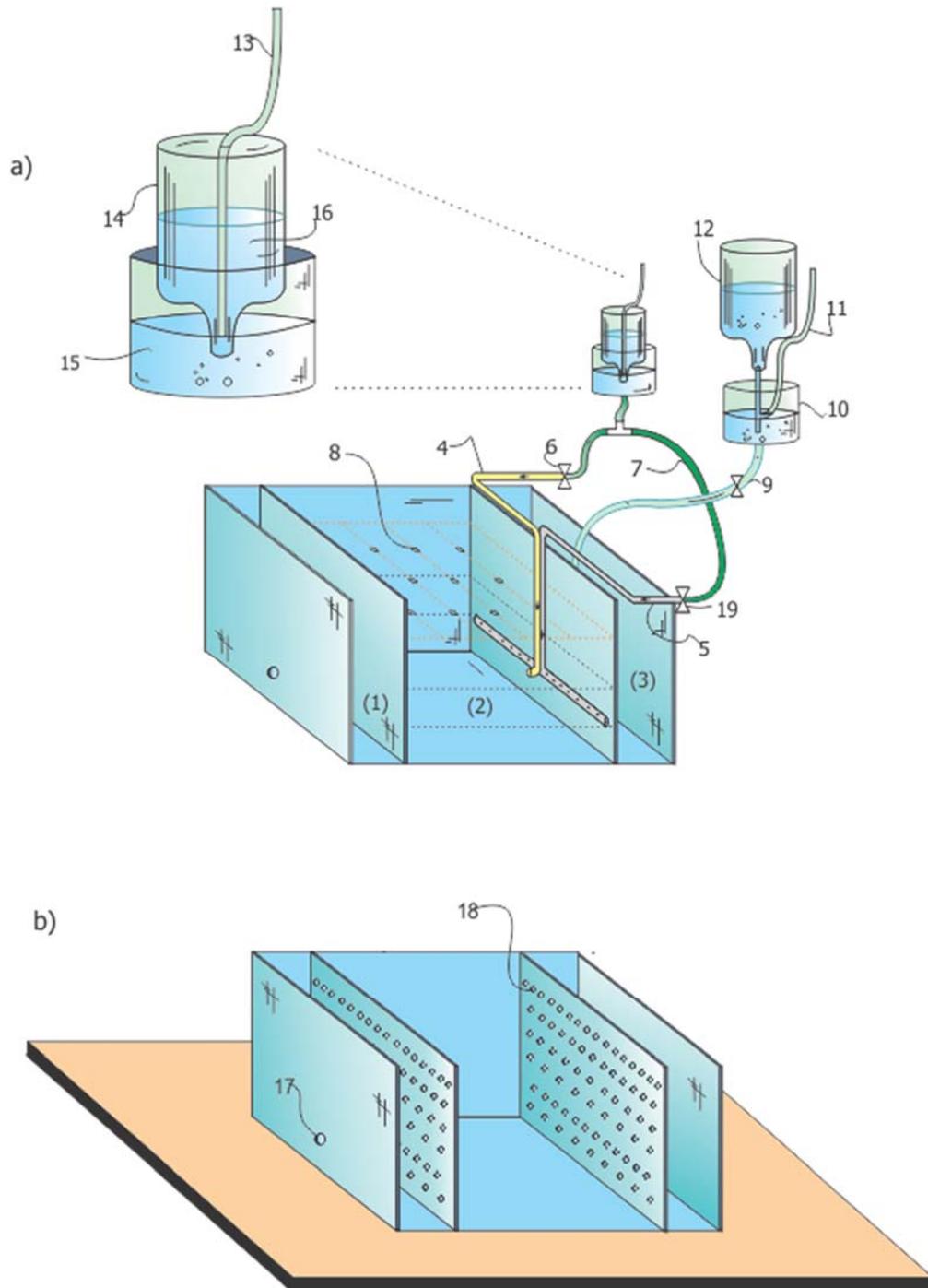
En la Figura 3.3 se presenta un diagrama del dispositivo desde un punto de vista funcional en el que se pueden apreciar de forma esquemática los elementos que constituyen el sistema de control hidráulico del tanque de simulación. El depósito del tanque de simulación (3) es llenado por agua proveniente de un depósito (12) colocado en la parte superior de todo el sistema, el agua se suministra a una velocidad constante mediante el uso de un frasco de

Mariotte (10). El frasco de Mariotte es un dispositivo destinado a conseguir una velocidad de efusión constante simultáneamente para un líquido y un gas. Consta de un frasco o botella (10) y un tubo vertical (11).

Se comprueba que, de acuerdo con la ecuación de Bernoulli, la velocidad de salida del líquido por el orificio del frasco (10) es constante, siempre que el nivel del líquido en el frasco esté por encima del extremo inferior del tubo (11), cuando el nivel del líquido esté por debajo del extremo inferior del tubo, la velocidad de salida dejará de ser constante. De acuerdo con la ley de Torricelli, ahora, la velocidad de salida es función de la distancia entre la altura de la superficie libre del líquido y la posición del orificio de salida, distancia que va disminuyendo. El suministro de agua hacia el depósito es accionado mediante la activación de una electroválvula (9) misma que es controlada por el usuario mediante una computadora a través de una interfaz gráfica. El agua en el depósito (3) pasa a la siguiente sección del tanque de simulación (2) a través de una pared de acrílico perforada (18) con la finalidad de que el flujo de agua de una sección a otra sea uniforme.

En la misma figura se ilustra el funcionamiento del control de los patrones de dispersión del contaminante inyectado en la sección del tanque (2) en la cual va contenida la arena y donde se hace la simulación del medio poroso. El contaminante se inyecta a una velocidad constante utilizando el mismo método utilizado para suministrar agua, mediante un frasco de Mariotte (15), en este caso el tubo colocado de manera vertical (13) pasa a través del depósito del contaminante. Para elegir entre un patrón de dispersión y otro se activan electroválvulas (6, 19) dejando pasar el contaminante hacia los tubos (4, 5) de acuerdo al patrón que se quiera utilizar, lineal o puntual. La activación de estas válvulas es controlada por computadora.

En la sección en la que se realiza la simulación del medio poroso están colocadas 3 matrices de sensores de conductividad (8) con la finalidad de medir la concentración del contaminante a través del medio, así como su distribución espacial. Finalmente, el agua avanza a la siguiente sección del tanque (1) en la cual se obtiene agua mezclada con el contaminante inyectado, esta agua inmediatamente es desalojada por un orificio (17, Figura 3.3b) del tanque para garantizar que siempre haya un flujo constante desde que se suministra agua hasta que es expulsada. Entre cada sección se colocó una pared de acrílico (18, Figura 3.3b) perforada permitiendo un flujo de agua constante a través de toda la pared.



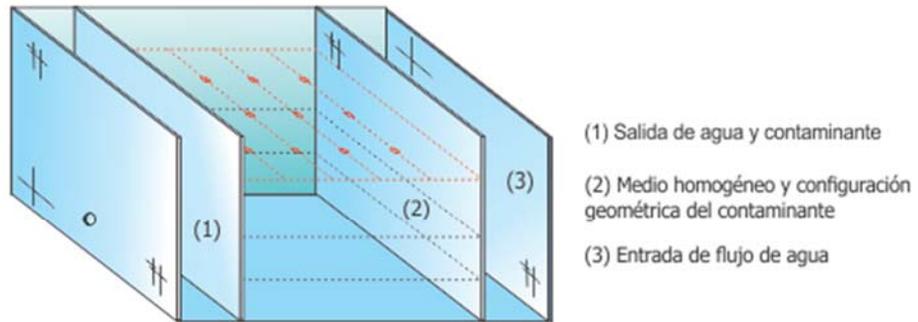
**Figura 3.3** Diagrama esquemático para ilustrar el funcionamiento del sistema de control hidráulico.

### 3.3.4 Sistema de medición de la distribución espacial y temporal del contaminante

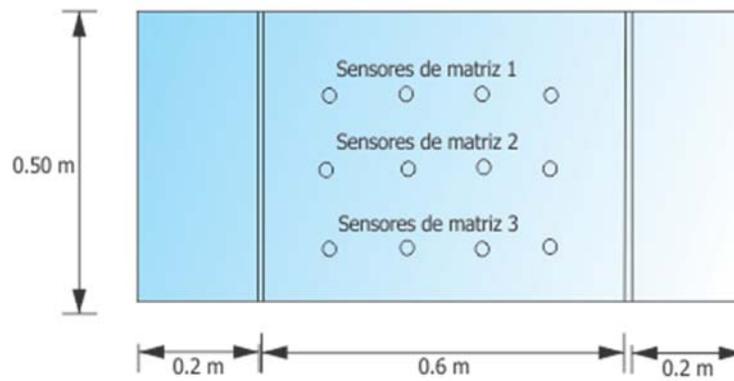
En la Figura 3.4 se presenta un diagrama del dispositivo desde un punto de vista funcional en el que se pueden apreciar la distribución espacial de los sensores de conductividad con los que cuenta el sistema (2). El dispositivo consiste básicamente en un tanque de acrílico de 5 mm de espesor, 50 cm de ancho, 100 cm de largo y 50 cm de altura, la segunda sección del tanque (2) se llena con un medio poroso homogéneo y es donde se monitorea el flujo del contaminante a través de sensores de conductividad eléctrica. Posee una bomba para verter agua de manera uniforme al medio poroso. El agua primeramente se vierte en una sección (3) y ésta fluye de manera uniforme hacia la siguiente sección (2). Ésta procede de un contenedor con una capacidad de 5 L. En la parte superior se encuentra una válvula que regula el flujo del agua entrante.

En las Figuras 3.4b y 3.4c se puede observar la ubicación de los sensores de conductividad eléctrica en el tanque de simulación, se han colocado 3 matrices con 12 sensores cada una, lo que resulta un total de 36 sensores de conductividad que miden la distribución espacial y concentración del contaminante a lo largo de la sección. El espaciamiento que hay entre los sensores de cada matriz es de 12 cm por 15 cm, mientras que entra cada matriz hay una distancia de 12 cm.

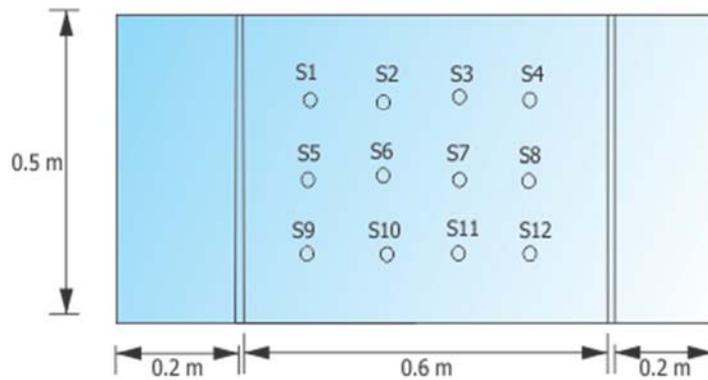
a) Tanque de Simulación



b) Vista Superior del Contenedor de Simulación



c) Vista Frontal del Contenedor de Simulación (Matriz 1)



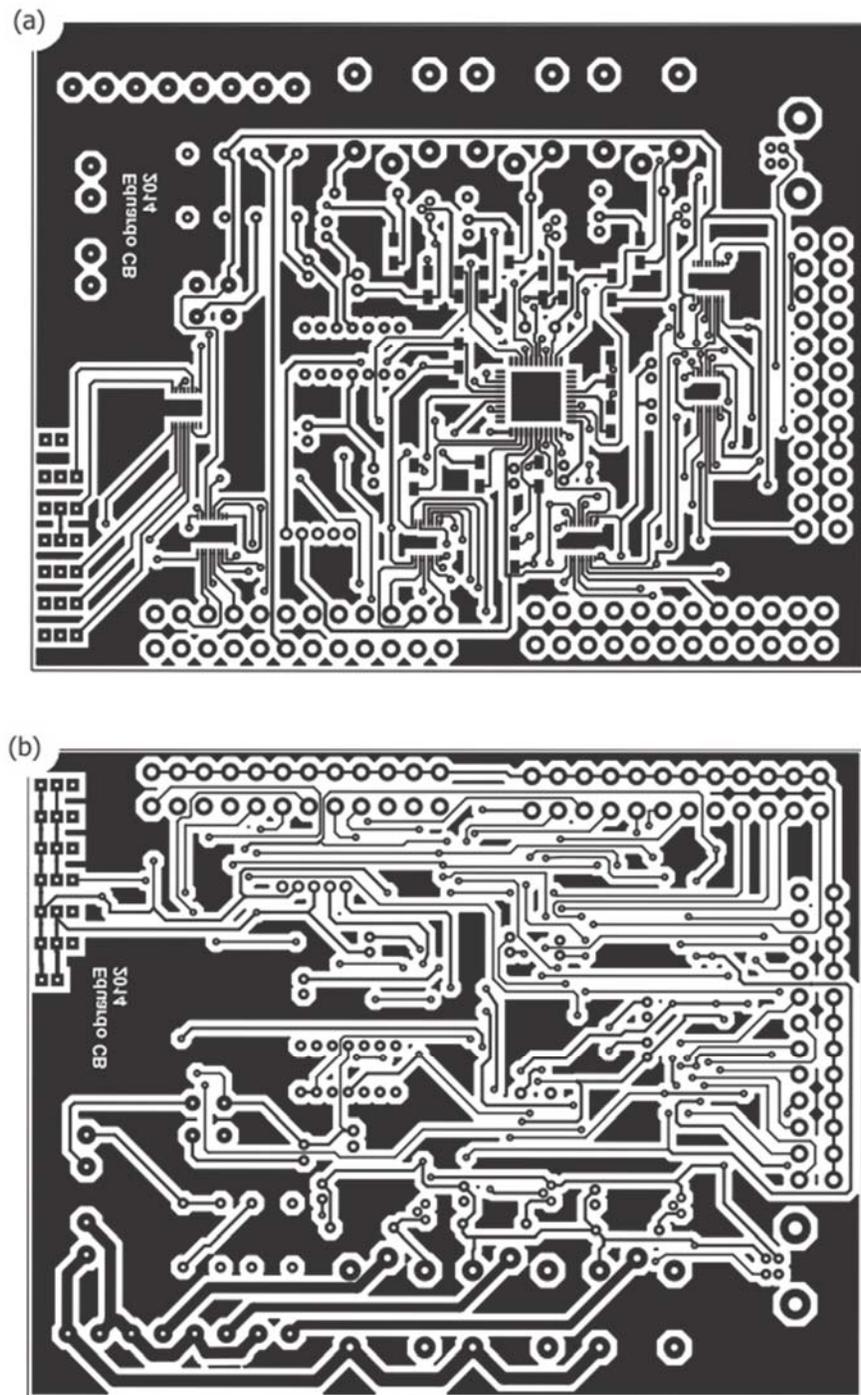
**Figura 3.4** Sistema de medición de la distribución espacial y temporal del contaminante.

### 3.3.5 Tarjeta de adquisición de datos

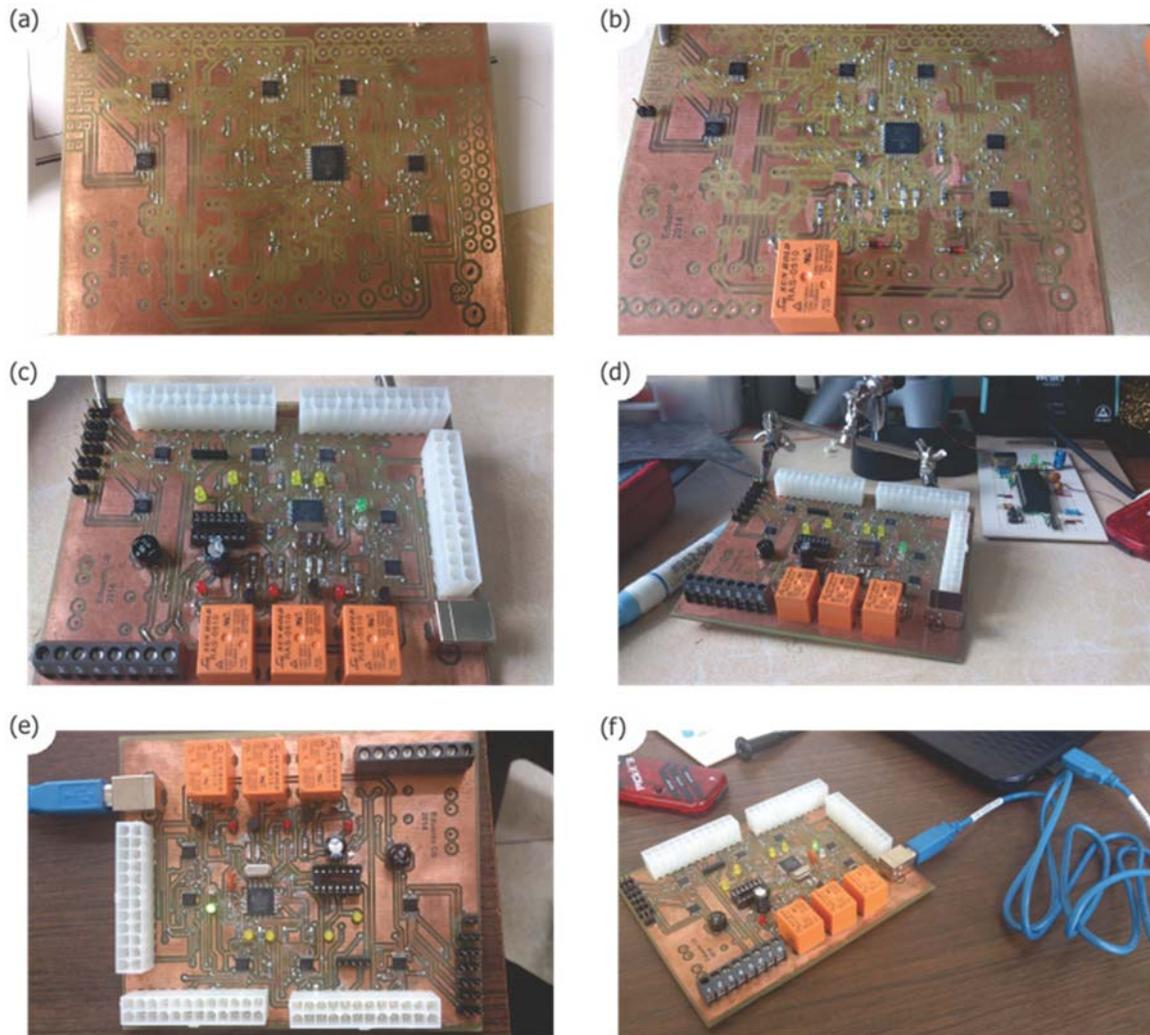
La tarjeta de adquisición de datos es una interfaz electrónica de comunicación serial (USB) que emplea un microcontrolador con matrícula PIC18F4550. Este microcontrolador coordina las operaciones de: (1) la comunicación que establece este dispositivo con la computadora para transmitir los parámetros de operación al sistema y enviar los datos medidos a la computadora para su post-procesamiento; (2) la adquisición de datos de conductividad eléctrica de una red tridimensional de sensores distribuidos en el interior de un tanque lleno con arena (medio poroso homogéneo); (3) el control y el monitoreo de la inyección de un contaminante de concentración conocida en el medio poroso homogéneo a través de un sistema de electroválvulas. La configuración del sistema se realiza desde la computadora.

El principio electrónico con el que se mide la conductividad eléctrica se basa en la adaptación de un higrómetro (Salas-García et al., 2010). En éste, el contenido de humedad en el suelo se mide de forma indirecta mediante la medición de la resistencia eléctrica. El circuito que realiza esta medición consiste en un oscilador biestable cuya frecuencia de salida está en función de un circuito resistivo-capacitivo. Puesto que la capacitancia en el circuito es un valor fijo, la frecuencia de salida es función de la resistencia eléctrica. En el caso de este trabajo, la resistencia eléctrica de las placas de acero sumergidas en el medio saturado. Se emplea un solo oscilador para los 36 sensores de conductividad mediante una serie de multiplexores analógicos con matrícula SN54LV4051A (Microchip, 2005). La frecuencia de salida del oscilador se mide y transmite mediante un microcontrolador PIC18F4550 conectado a la computadora mediante el puerto USB. La computadora recibe los datos del microcontrolador y los almacena como archivos de texto para su post-procesamiento.

La fabricación de la tarjeta electrónica que conecta el conjunto de sensores de conductividad con la computadora y que contiene el microcontrolador constituyó un reto en su elaboración. En las Figuras 3.5 y 3.6 se muestran el diseño de la PCB y algunos pasos de su proceso de manufactura manual.



**Figura 3.5** En (a) se muestra el diseño de la PCB (vista superior), en (b) se muestra el diseño de la PCB (vista inferior).



**Figura 3.6** Fotografías del proceso de manufactura de la tarjeta que soporta el microcontrolador que es la interfaz electrónica entre los sensores de conductividad eléctrica y la computadora. En (a) se muestra el diseño de la PCB después del revelado y atacado con cloruro férrico con el microcontrolador y multiplexores de montaje superficial, además con los cables que atraviesan ambos lados del circuito impreso para conectar ambas caras del circuito. Desde (b) hasta (d) se presentan algunos componentes soldados. En (e) y (f) se aprecia la tarjeta terminada con conexión USB.

En las Figuras 3.5a y 3.5b se presenta el diseño de las dos caras de la PCB mismo que fue transferido a una placa fenólica cubierta por una placa de cobre de ambos lados. Esta transferencia se realizó imprimiendo con tóner en papel *couché* una imagen que se presiona contra el cobre usando una plancha común para ropa durante 10 *min*. El tóner transferido protege el cobre de la tarjeta durante los 15 *min* que dura la fase de atacado en cloruro férrico.

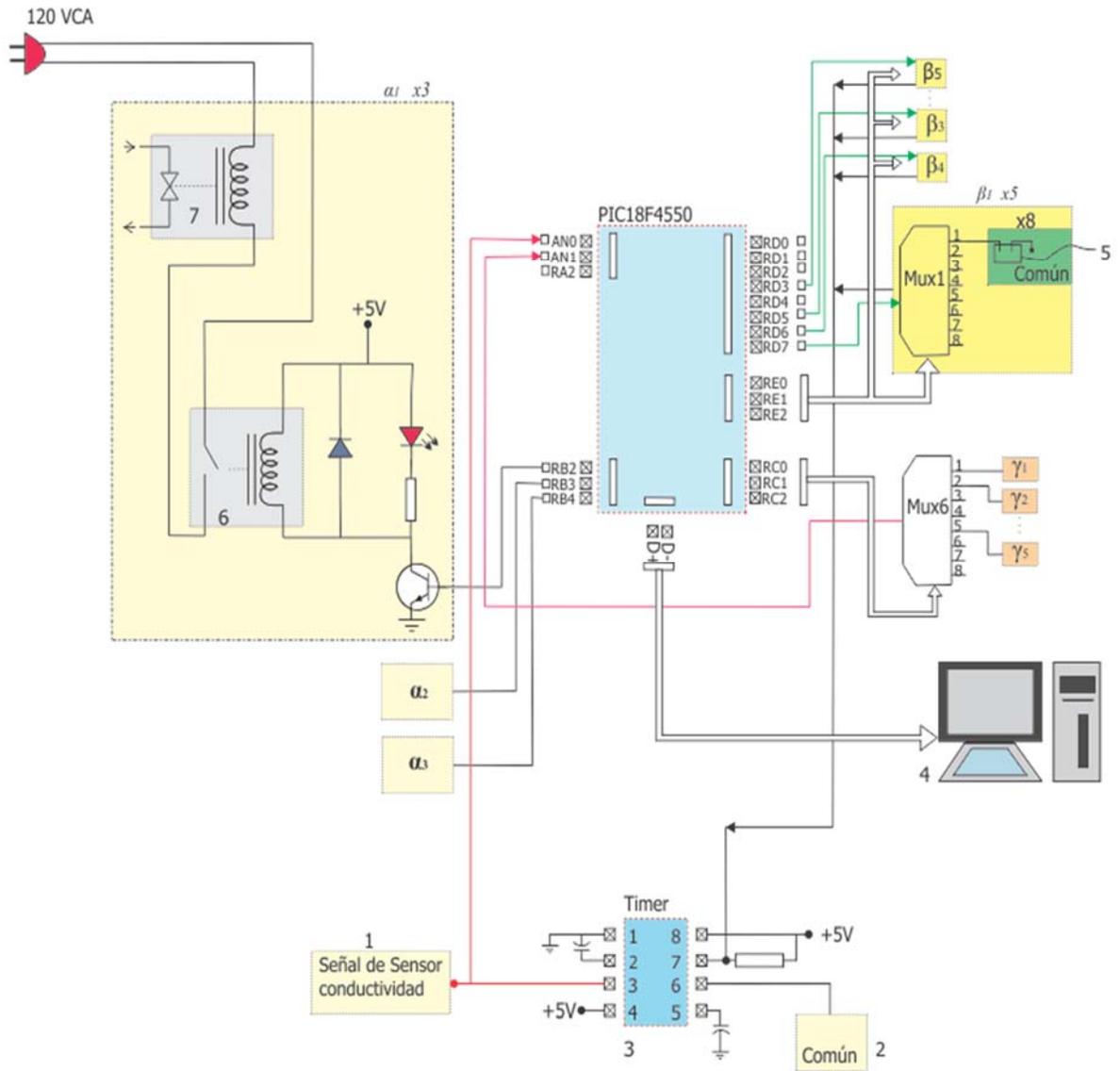
La placa revelada después del atacado y remoción del tóner con el progreso de soldado de los demás componentes se muestran en las Figuras 3.6a a 3.6d. Posteriormente, se insertó un cable USB para comunicar la tarjeta de adquisición de datos con la computadora (Figura 3.6e). Finalmente, se programó el microcontrolador utilizando un programador *Pickit 3* de *Microchip* mostrado en la Figura 3.6f.

### **3.4 ESTRUCTURA LÓGICA DEL SISTEMA (SOFTWARE)**

#### **3.4.1 Comunicación entre la PC y la tarjeta de adquisición de datos**

El microcontrolador PIC 18F4550 coordina las operaciones de: (1) la comunicación que establezca este dispositivo con la computadora para transmitir los parámetros de operación al sistema y enviar los datos medidos a la computadora para su post-procesamiento; (2) adquisición de datos de conductividad eléctrica de una red tridimensional de sensores distribuidos en el interior de un tanque lleno con arena (medio poroso homogéneo); (3) el control y monitoreo de la inyección de un contaminante de concentración conocida en el medio poroso homogéneo a través de un sistema de electroválvulas. La configuración del sistema se realiza desde la computadora.

En la Figura 3.7 se presenta un diagrama esquemático de los recursos del microprocesador PIC18F4550 (Microchip, 2009) y su relación con los elementos que constituyen la tarjeta de adquisición de datos. Los puertos D y E controlan la activación de los multiplexores. Éstos se activan mediante una interfaz gráfica que el usuario puede manipular. La salida de cada uno de los multiplexores es la entrada que sustituye una resistencia en un circuito integrado NE555 (Texas-Instruments, 2014), al variar la conductividad eléctrica en cada uno de los sensores también varía la frecuencia del NE555, conforme avanza el contaminante a través de cada uno de los sensores se tiene una frecuencia diferente en el NE555.



**Figura 3.7** Recursos del microprocesador PIC18F4550 y su relación con los componentes del sistema electrónico de la tarjeta de adquisición de datos.

Esta frecuencia de salida es leída por una entrada analógica del PIC que se encuentra en el puerto A. El microcontrolador cuenta los pulsos provenientes del multivibrador para cada sensor, posteriormente estos números de pulsos son enviados a la computadora a través de un programa de Visual Studio en donde son almacenados en un archivo de texto para ser calibrados de acuerdo a un medidor de conductividad eléctrica comercial YSI (YSI-30, 2007).

El puerto B controla la activación de las bombas que activan cada uno de los patrones de dispersión, así como el llenado del tanque.

La medición de todos los sensores de conductividad eléctrica se mide a través de la frecuencia,  $f_{VFO}$  (*variable frequency oscillator, Hz*), resultante de un circuito con matrícula NE555 configurado como multivibrador biestable de acuerdo a la ecuación:

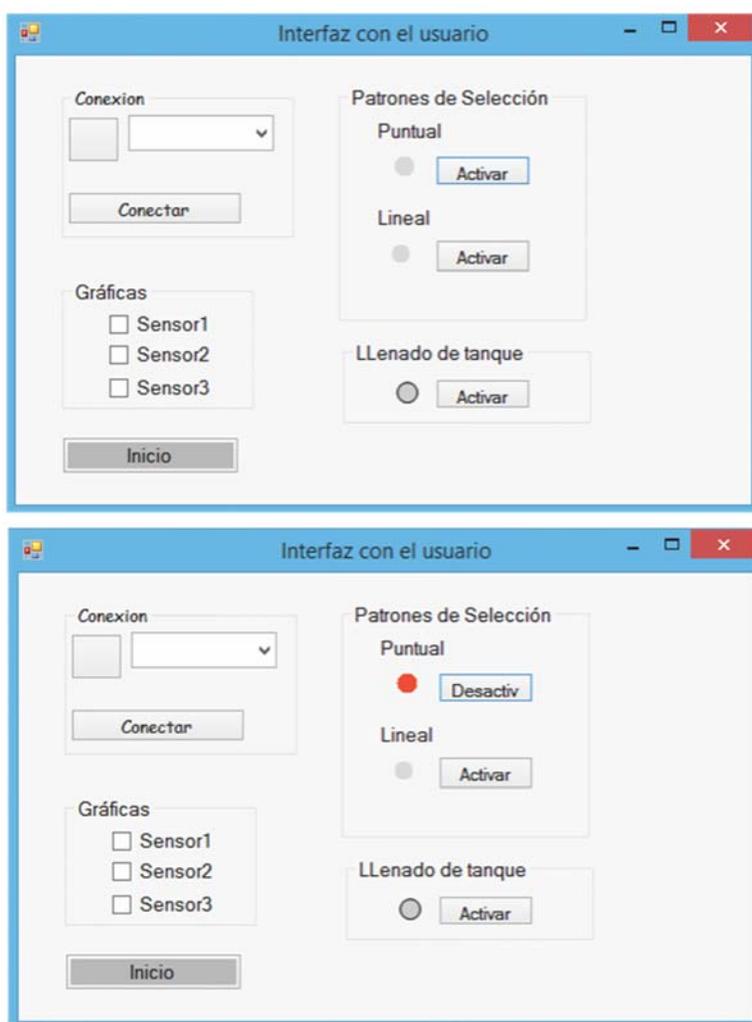
$$f_{VFO} = \frac{1.44}{C(R_a + 2R_b)}, \quad (3.4)$$

donde  $C$  es el valor fijo del capacitor de carga y descarga ( $F$ ),  $R_a$  el valor de un resistor fijo, que para este caso es de 1.2 k $\Omega$  y  $R_b$  es el valor de resistividad eléctrica que varía en función de la humedad ( $\Omega$ ). Mediante el multiplexor analógico (Figura 3.7, Mux) se conectan secuencialmente los sensores de resistividad eléctrica obteniéndose así los respectivos valores de  $f_{VFO}$ . El multiplexor utilizado con matrícula SN74LV4051 es de 8 canales, por lo que fueron necesarios 5 multiplexores para los 36 sensores que utiliza el sistema. Este método de multiplexado para medir la conductividad eléctrica de los sensores aseguró que los valores de  $C$  (10 nF) y  $R_a$  (1.2 k $\Omega$ ) en la Ecuación 3.4 sean los mismos, de modo que  $f_{VFO}$  depende exclusivamente de la variación de  $R_b$  en todas las determinaciones. Además, se optimizó la cantidad de componentes, de tal manera que, en lugar de emplear un multivibrador NE555 para cada sensor de resistividad eléctrica, se emplea uno solo para todos y el microcontrolador emplea un solo canal para la lectura de esos datos. La relación que hay entre la frecuencia y la conductividad eléctrica se muestra en la figura 4.3 del capítulo 4. La frecuencia máxima a la que puede operar el 555 va de un rango de 500 kHz a 2 MHz, lo cual es suficiente para abarcar el rango de conductividad para este experimento. La señal obtenida después del multiplexado ingresa a un conversor analógico digital del PIC 18F4550 para su procesamiento.



### 3.4.2 Interfaz con el usuario

Es posible diseñar un sistema de monitoreo de conductividad eléctrica de contaminantes en un medio homogéneo poroso a una escala de laboratorio equipado con un sistema de adquisición de datos con interfaz *USB* utilizando un microcontrolador PIC18F4550, además se desarrolló una aplicación de escritorio que es la interfaz de comunicación entre el usuario y el microcontrolador. Esta interfaz gráfica se programó con el paquete Microsoft Visual Studio.



**Figura 3.9** Aplicación de escritorio que es la interfaz de comunicación entre el usuario y el microcontrolador.



La Figura 3.10 muestra el archivo de texto con los valores obtenidos de los 36 sensores de conductividad eléctrica. El principio para el almacenamiento de datos está descrito en el siguiente fragmento de código, éste muestra que se lee el valor de un sensor y se almacena para concatenarlo con el siguiente valor del siguiente sensor, esta acción es cíclica hasta que se leen los 36 sensores, al finalizar la lectura se abre un archivo de texto en una ruta especificada por el usuario y se escriben en una fila los valores obtenidos de los 36 sensores de conductividad.

```

Private Sub Timer2_Tick(sender As Object, e As EventArgs) Handles Timer2.Tick
    If Fin = False Then
        x = SerialPort1.ReadExisting.Trim() 'Estado 2
        fileNumber = FreeFile()
        ruta = "C:\Users\Lalo\Documents\puntual52.txt"
        Select Case Chanel
            Case 1                                     '** MUX 1 **
                x1 = x
                linea = x1 & " "
            Case 2
                x2 = x
                linea = linea & x2 & " "
            Case 3
                x3 = x
                linea = linea & x3 & " "
            Case 36
                x36 = x
                linea = linea & x36 & " "

            Case 44
                grafica = True
                FileOpen(fileNumber, ruta, OpenMode.Append)
                WriteLine(fileNumber, linea)
                FileClose(fileNumber)
                Chanel = 0
        End Select
        If grafica = True Then
            Sensor1.Grafica()
            Sensor2.Grafica()
            Sensor3.Grafica()
            grafica = False
        End If
        Chanel = Chanel + 1
        Timer2.Stop()
        Timer1.Start()
    End If
End Sub

```



### 3.4.2.2 Opciones de monitoreo de la conductividad eléctrica del contaminante

Las opciones de monitoreo del contaminante se describen a continuación referenciadas a la Figura 3.11. La selección de patrones de dispersión es un conjunto de válvulas (6, 17) cuya configuración determina si el patrón de inyección del contaminante será puntual o lineal. Al activar alguna de las válvulas, el contaminante fluye siguiendo una trayectoria (4, 5) de acuerdo al patrón de dispersión seleccionado. El depósito (12) contiene el agua que es suministrada al contenedor mediante la apertura de una válvula (9) que es accionada a través de un microcontrolador. La presión del agua suministrada de este modo es constante gracias a un frasco de Mariotte (10). El detalle del frasco de Mariotte se muestra en la Figura 3.11 (13, 14, 15, 16).

La sección (1) corresponde a la salida de la mezcla homogénea del agua y contaminante. En la sección (2) está alojado el medio poroso, es en esta parte donde se inyecta el contaminante eligiendo entre dos patrones de dispersión: puntual y lineal. Además, contiene una malla tridimensional de 36 sensores de conductividad eléctrica que permiten el monitoreo del contaminante (trazador) en función del tiempo.

Figura 3.12 Datos de los 36 sensores de conductividad eléctrica almacenados en una matriz en MatLab

### **3.4.3 Procesamiento de los datos de la distribución del contaminante**

La metodología para el procesamiento de los datos es la siguiente: la interfaz electrónica envía los datos leídos por cada sensor de conductividad eléctrica a la computadora a través de un programa generado en Visual Studio. Estos datos son almacenados en un archivo de texto, como lo muestra la Figura 3.10. El archivo de texto contiene 36 columnas que son correspondientes a los sensores de conductividad, el número de filas varía de acuerdo al tiempo que haya durado el experimento. La lectura de datos puede ser detenida por el usuario en el momento que lo crea conveniente. De esta manera la columna 1 en la Figura 3.10 corresponde al sensor 1 y así sucesivamente para las demás columnas.

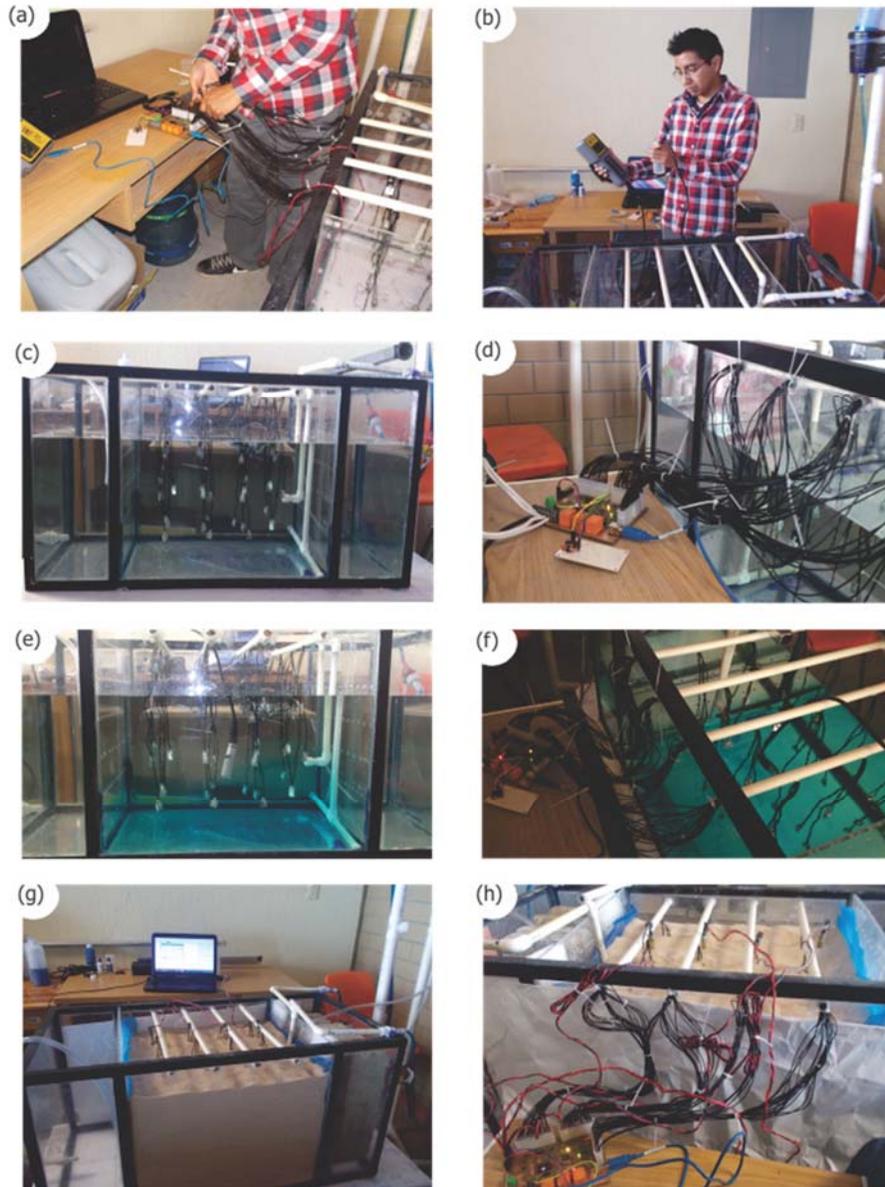
El pos-procesamiento de los datos del archivo de texto consiste en graficar los datos para que se pueda apreciar el flujo del contaminante a través del medio poroso en función del tiempo. Para lograr esto, se realizó un programa en MatLab el cual realiza una matriz e interpola los datos obtenidos de los sensores de conductividad, lo que permite hacer gráficas en 3D.

En las Figuras 3.10 y 3.12 se aprecian los datos de los sensores, en la primera se muestran en un archivo de texto, mientras que en la segunda, los archivos han sido importados a una matriz en MatLab para ser graficados.

## **3.5 DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS REALIZADOS**

### **3.5.1 Experimentos realizados**

En la Figura 3.13 se presentan algunas fotografías de la instrumentación utilizada en el tanque de simulación y de los experimentos realizados. Las Figuras 3.13a y 3.13b muestran la instalación de la tarjeta de adquisición de datos a los sensores de conductividad eléctrica y la lectura de cada sensor de conductividad eléctrica con un conductímetro comercial YSI 30; las Figuras 3.13c y 3.13d ilustran el experimento utilizando agua sin ningún contaminante, esta prueba se llevó a cabo con la finalidad de comprobar que cada uno de los sensores midiera un valor muy similar entre cada muestra, lo cual fue satisfactorio.



**Figura 3.13** *Fotografías de instrumentación instalada en el tanque de simulación (a) y (b) Instalación de la tarjeta de adquisición de datos y lectura de cada sensor de conductividad eléctrica con un conductímetro comercial YSI 30; (c) y (d) Experimento utilizando agua sin ningún contaminante; (e) y (f) Experimento utilizando agua y un contaminante con color como trazador; (g) y (h) Experimento utilizando arena como medio poroso.*

Posteriormente se realizó un experimento en el cual se utilizó agua sin un medio poroso utilizando agua con sal y azul de metileno como trazador mostrado en las Figuras 3.13e y 3.13f, la finalidad de este segundo experimento fue probar que existe cambio en la lectura de los sensores de conductividad conforme el trazador avanza en el tanque de simulación.

Finalmente, como último experimento, se llenó la segunda sección del tanque de simulación con arena sílica para ser utilizada como medio poroso, Figuras 3.13g y 3.13h. En este punto igual se inyectó el trazador para registrar el flujo y su distribución mediante el uso de los sensores de conductividad eléctrica.

Para cada prueba descrita anteriormente el contaminante fue inyectado utilizando dos patrones de dispersión: puntual y lineal. Los parámetros que se pueden variar son: contenido inicial de agua y la cantidad de contaminante suministrada.

### **3.5.2 Justificación del experimento**

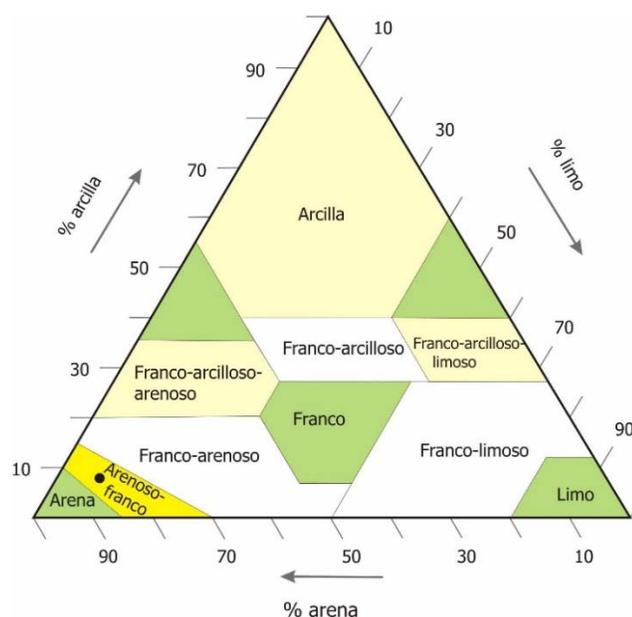
La estructura hidráulica construida, en conjunto con la malla tridimensional de 36 sensores de conductividad eléctrica, demostró que es suficiente para monitorear espacial y temporalmente el transporte de un trazador que altere dicha conductividad. Este diseño sienta las bases para el desarrollo de modelos matemáticos que describan el transporte en un medio poroso con una gran versatilidad de condiciones. Además, si sus lecturas se calibran en el medio particular en donde se instale, permite determinar cuantitativamente el avance de la pluma del contaminante. Su resolución espacial y temporal es suficiente para su interpolación tridimensional. Una mejora a este sistema puede incluir su escalamiento para su aplicación en el campo en lugares susceptibles de contaminación, tales como los vertederos de basura.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 PROPIEDADES DEL MEDIO POROSO SATURADO EN EL TANQUE

El análisis de porosidad al que se sometió el medio poroso que se introdujo en el tanque de simulación, resultó con una porosidad de 0.27 al aplicar la Ecuación 3.3.

Como se mencionó en la sección 3.3.2, el medio poroso se puede tamizar, para determinar la proporción de tamaños de las partículas que lo componen y se puede presentar en un triángulo de textura, donde se puede clasificar el medio por la proporción que existe entre los diferentes tamaños (Salas-García et al.,2010).



**Figura 4.1** Triángulo de clasificación de texturas del suelo. (Fuente: Salas-García et al., 2010)

## 4.2 CALIBRACIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE CONTAMINANTE

La etapa de calibración de los sensores de conductividad eléctrica consistió en lo siguiente: un conductímetro comercial se calibró de acuerdo a las especificaciones del fabricante con una solución de calibración de conductividad de 1413 micro Siemens  $\mu S/cm$  (Figuras 4.2a y 4.2b). Posteriormente, se llenó el *contenedor* con una solución acuosa con una conductividad eléctrica de 564  $\mu S/cm$  (medida con el conductímetro calibrado) y se midió la conductividad resultante en cada sensor del sistema de monitoreo de este trabajo, se hizo lo mismo con otra solución de 447  $\mu S$  (Figuras 4.2c y 4.2d). Finalmente, se sumergió cada sensor en la solución de calibración de conductividad de 1413  $\mu S/cm$ .

Con este procedimiento se obtuvo una regresión lineal de calibración para cada sensor. Con los sensores calibrados se realizaron dos pruebas de inyección de un trazador (NaCl con azul de metileno), una con el patrón de dispersión puntual y otra con el patrón de dispersión lineal con el fin de monitorear la distribución espacial y temporal de la pluma del contaminante a lo largo del tanque de simulación con arena saturada con agua en su interior. En la Figura 4.2 e) se muestra la inyección de un trazador con un patrón de dispersión puntual para determinar su distribución espacial a lo largo del tanque de pruebas. La Figura 4.2 f) muestra detalle de la tarjeta de adquisición de datos conectada a los 36 sensores de conductividad eléctrica.

La calibración del sistema se realizó por software. La regresión lineal de calibración para cada sensor se obtuvo a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\bar{Y} = a_0x + a_1, \quad (4.1)$$

$$a_0 = \frac{\sum x_i \sum y_i - N \sum x_i y_i}{(\sum x_i)^2 - N \sum x_i^2}, \quad (4.2)$$

$$a_1 = \frac{\sum x_i \sum x_i y_i - \sum x_i^2 y_i^2}{(\sum x_i)^2 - N \sum x_i^2} r = \sqrt{1 - \frac{S_N}{S_t}}, \quad (4.3)$$

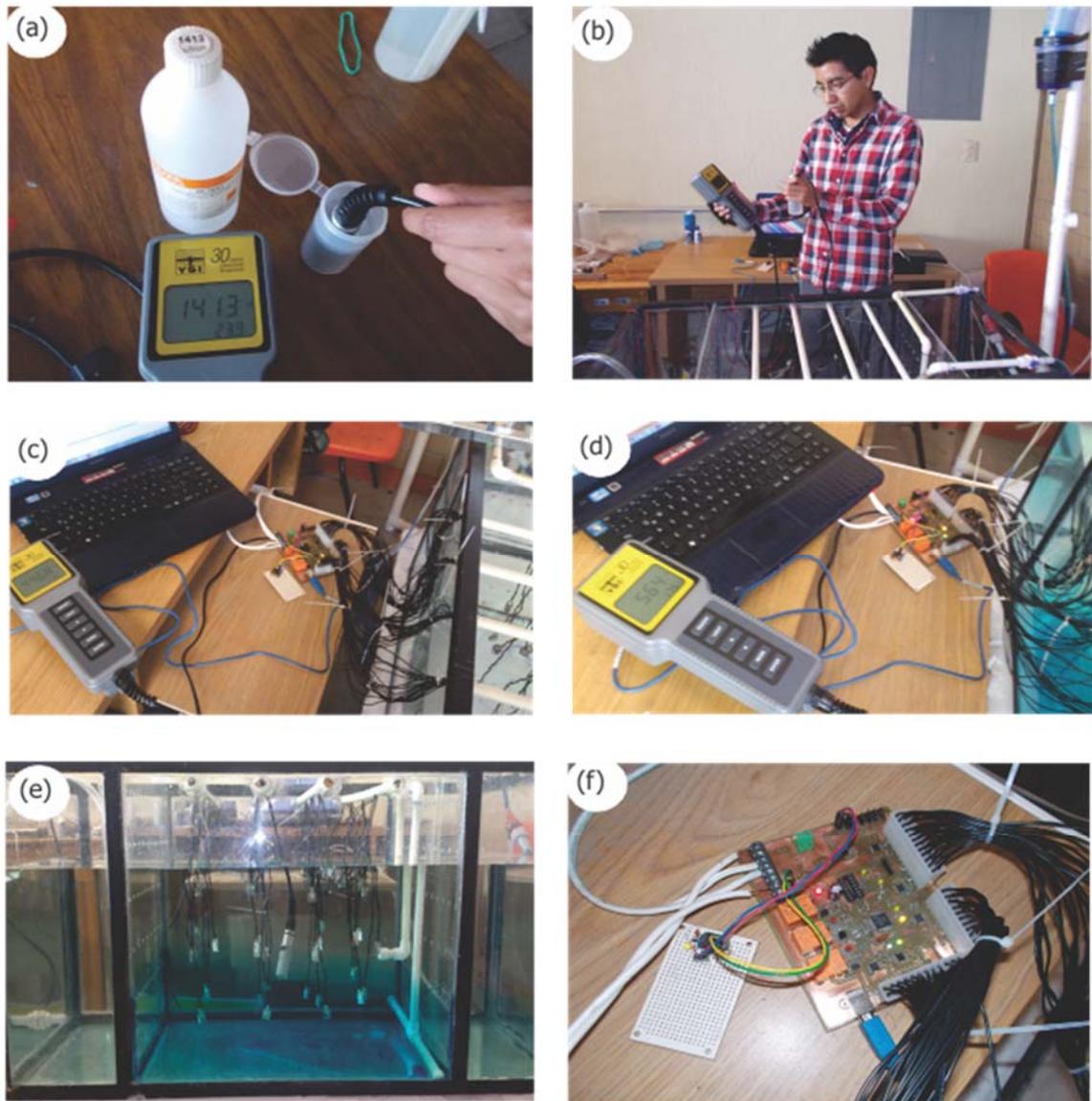
$$r = \sqrt{1 - \frac{S_N}{S_t}}, \quad (4.4)$$

$$S_t = \sum (x_i - y_m)^2, \quad (4.5)$$

$$S_N = \sum (y - \bar{Y}_i)^2, \quad (4.6)$$

$$y_m = \frac{\sum y}{N}, \quad (4.7)$$

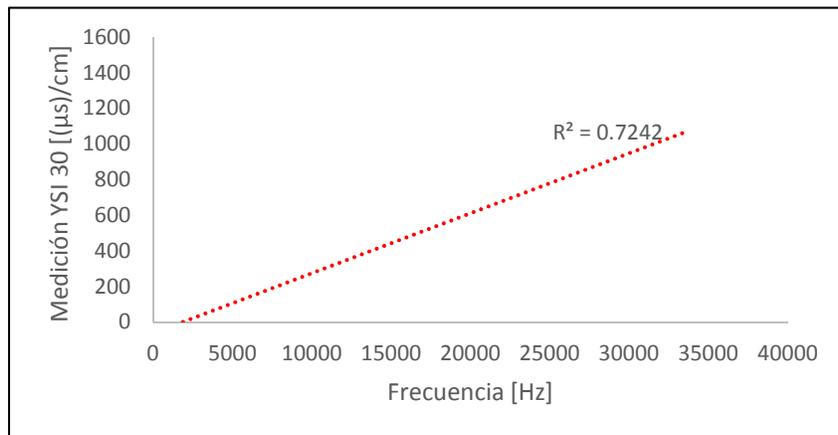
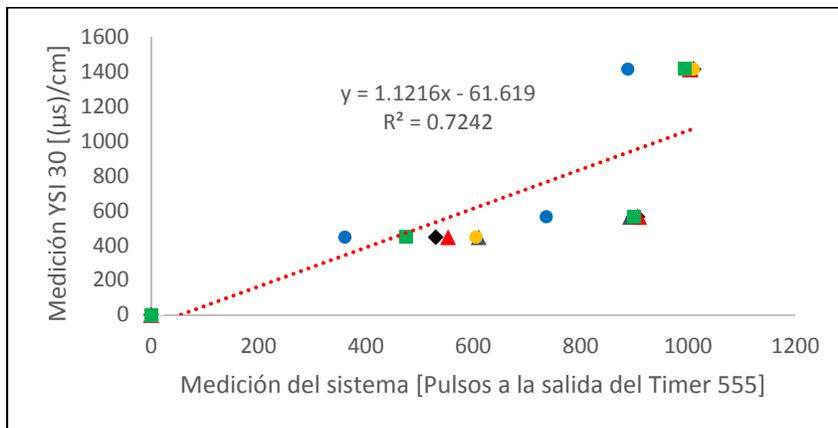
donde  $\bar{Y}$  es el valor de conductividad eléctrica calibrado de cada sensor,  $N$  es el número de datos,  $r$  es el coeficiente de correlación,  $S_N$  es la variación explicada,  $S_t$  es la variación totalizada y finalmente,  $y_m$  es la media. La Tabla 4.1 muestra los datos que se utilizaron para hacer la regresión de cada sensor, en este caso se ejemplifica el sensor número 1. En la primera columna, “Medición del sistema”, se presentan los valores de conductividad eléctrica medidos por el microprocesador, mientras que en la segunda columna, “Medición del conductímetro YSI 30”, los valores medidos por un conductímetro comercial. La siguiente columna muestra los valores obtenidos al aplicar la regresión lineal para el sensor. Finalmente, la siguiente columna muestra el valor del coeficiente de determinación. Consultar apéndice B (Calibración de los sensores de conductividad) para encontrar información de la regresión lineal para cada uno de los sensores. La figura 4.3 muestra la gráfica de los valores de las mediciones de 6 sensores de conductividad. El eje horizontal representa los valores medidos por el sistema (microprocesador), mientras que el eje vertical los medidos con el Conductímetro YSI 30. Se muestra la línea de tendencia para estos valores y el valor del coeficiente de determinación.



**Figura 4.2** *Calibración de sensores de conductividad eléctrica. a) Conductímetro comercial calibrado con una solución de calibración de conductividad de 1413 micro Siemens,  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . b) y c) Medición de conductividad eléctrica con una solución acuosa con una conductividad eléctrica de 564  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y con otra de 447  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . e) Inyección de un trazador con un patrón de dispersión puntual. f) Detalle de la tarjeta de adquisición de datos conectada a los 36 sensores de conductividad eléctrica.*

**Tabla 4.1** Calibración de sensores de conductividad eléctrica. Valores obtenidos al aplicar una regresión lineal para los datos obtenidos de un sensor de conductividad.

Medición del sistema (microprocesador) [x]	Medición del Conductímetro YSI 30 [y]	$\bar{Y} = a_0x + a_1$	$R^2$
530	446.8	515.773	0.7331
906	564	931.803	
1010	1413	1046.876	
0	0		



**Figura 4.3** Gráficas que muestran los valores de las mediciones de los sensores. La grafica de arriba muestra la relación conductividad vs pulsos del timer 555. En la gráfica de abajo se aprecia la relación conductividad frecuencia. Se muestra la línea de tendencia para estos valores y el valor del coeficiente de determinación.

### 4.3 PROCESAMIENTO DE LOS DATOS DE LA DISTRIBUCIÓN DEL CONTAMINANTE

En esta sección se describe la manera en que los datos de la distribución del contaminante fueron ingresados a un programa en MatLab para obtener las gráficas tridimensionales de las interpolaciones de la conductividad eléctrica medidas por cada uno de los sensores. Los datos que se obtienen del programa de Visual Studio contenidos en un archivo de texto mostrados en la Figura 3.9 son exportados con un programa en MatLab para su procesamiento.

Las siguientes líneas de código muestran el programa utilizado para generar las gráficas tridimensionales de las interpolaciones de la conductividad eléctrica medidas por los 36 sensores.

De acuerdo con las líneas de código, se carga el archivo de texto descrito en la sección anterior y es almacenado en la variable “*d*”. En la variable “*c*” se realiza la calibración por software, ésta consiste básicamente en aplicar la Ecuación 4.1 con sus respectivos valores de  $a_0$  y  $a_1$  obtenidos en la regresión lineal aplicada para cada sensor.

La variable “*a*” contiene los valores de los sensores que se van a graficar. Por ejemplo  $a=c(1,:)$ , contiene los valores de los sensores del renglón 1 en el archivo de texto. La instrucción  $[x,y,z] = \text{meshgrid}(1:1:3,1:1:4,1:1:3)$ , hace una malla de enteros que corresponde con la posición de los sensores.

Los siguientes renglones, desde  $\text{corte}(1,1,1) = a(3)$  hasta  $\text{corte}(4,3,3) = a(34)$ , ordenan los valores de los sensores en una matriz tridimensional de acuerdo a la numeración de los sensores como están insertados en el tanque.  $x\text{slice} = [1.5]$ ;  $y\text{slice} = [1.5]$ ;  $z\text{slice} = [1,2]$ ; son los planos donde se hacen los cortes de la gráfica en cuatro dimensiones.

**GraficaCortes.m**

```

load C:\Users\Lalo\Documents\puntual_arena.txt
d = puntual_arena;

c = [(d(:,1)*1.106-70.652),(d(:,2)*1.097-
80.233),(d(:,3)*(0.662)+95.158),(d(:,4)*1.105-99.521),(d(:,5)*1.116-
93.194),(d(:,6)*(0.524)+176.144),(d(:,7)*1.104-74.296),(d(:,8)*1.072-
90.05),(d(:,9)*1.057-96.186),(d(:,10)*1.109-90.942),(d(:,11)*1.108-
83.947),(d(:,12)*(0.613)+121.047),(d(:,13)*(0.631)+96.321),(d(:,14)*1.101-
98.689),(d(:,15)*(0.629)+97.749),(d(:,16)*1.092-89.715),(d(:,17)*1.074-
83.021),(d(:,18)*1.072-85.185),(d(:,19)*1.321-49.795),(d(:,20)*1.087-
93.362),(d(:,21)*(0.585)+138.149),(d(:,22)*0.950-59.009),(d(:,23)*1.076-
90.271),(d(:,24)*1.043-78.852),(d(:,25)*1.102-77.504),(d(:,26)*1.089-
76.572),(d(:,27)*(0.729)+49.159),(d(:,28)*1.111-
51.83),(d(:,29)*(0.787)+17.393),(d(:,30)*(0.524)+175.694),(d(:,31)*1.126-
45.761),(d(:,32)*1.079-100.492),(d(:,33)*(0.628)+109.73),(d(:,34)*1.099-
80.899),(d(:,35)*1.117-77.479),(d(:,36)*(0.542)+160.222)];

figure
a=c(1,:);
subplot(3,2,1)
titulo = 'Distribución del contaminante t_1';
gra3d

a=c(48,:);
subplot(3,2,2)
titulo = 'Distribución del contaminante t_2';
gra3d

a=c(100,:);
subplot(3,2,3)
titulo = 'Distribución del contaminante t_3';
gra3d

a=c(130,:);
subplot(3,2,4)
titulo = 'Distribución del contaminante t_4';
gra3d

a=c(140,:);
subplot(3,2,5)
titulo = 'Distribución del contaminante t_5';
gra3d

a=c(152,:);
subplot(3,2,6)
titulo = 'Distribución del contaminante t_6';
gra3d

```

**Grafica3d.m**

```

clear corte
[x,y,z] = meshgrid(1:1:3,1:1:4,1:1:3);
corte(1,1,1) =a(3);
corte(1,1,2) =a(2);
corte(1,1,3) =a(1);
corte(1,2,1) =a(6);
corte(1,2,2) =a(5);
corte(1,2,3) =a(4);
corte(1,3,1) =a(9);
corte(1,3,2) =a(8);
corte(1,3,3) =a(7);
corte(2,1,1) =a(12);
corte(2,1,2) =a(11);
corte(2,1,3) =a(10);
corte(2,2,1) =a(15);
corte(2,2,2) =a(14);
corte(2,2,3) =a(13);
corte(2,3,1) =a(18);
corte(2,3,2) =a(17);
corte(2,3,3) =a(16);
corte(3,1,1) =a(21);
corte(3,1,2) =a(20);
corte(3,1,3) =a(19);
corte(3,2,1) =a(24);
corte(3,2,2) =a(23);
corte(3,2,3) =a(22);
corte(3,3,1) =a(27);
corte(3,3,2) =a(26);
corte(3,3,3) =a(25);
corte(4,1,1) =a(30);
corte(4,1,2) =a(29);
corte(4,1,3) =a(28);
corte(4,2,1) =a(33);
corte(4,2,2) =a(32);
corte(4,2,3) =a(31);
corte(4,3,1) =a(36);
corte(4,3,2) =a(35);
corte(4,3,3) =a(34);

xslice = [1.5];
yslice = [1.5];
zslice = [1,2];

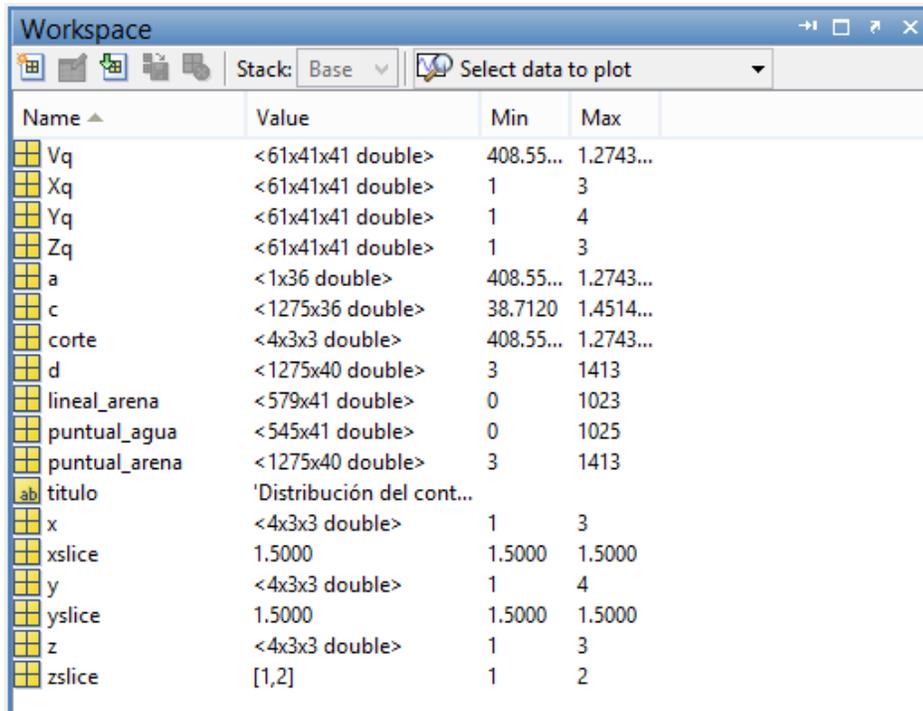
[Xq,Yq,Zq] = meshgrid(1:.05:3,1:.05:4,1:.05:3);
Vq = interp3(x,y,z,corte,Xq,Yq,Zq);
%slice(x,y,z,corte,xslice,yslice,zslice)
% colormap hsv

slice(Xq,Yq,Zq,Vq,2,2.5,2);
shading flat
caxis([400,1200])
xlabel('ancho')
ylabel('largo')
zlabel('alto')
title(titulo)
hold on

```

La instrucción  $[Xq,Yq,Zq] = \text{meshgrid}(1:.05:3,1:.05:4,1:.05:3)$ ; hace una malla mucho más cerrada del mismo volumen que “[x,y,z]”, pero ésta tiene valores de doble precisión. Hace la interpolación en tres dimensiones tomando como referencia los valores de los sensores en las posiciones “enteras” y con eso se rellenan los huecos en las posiciones “decimales”.

La Figura 4.4 muestra las variables al ejecutar las líneas de código anteriores.



Name	Value	Min	Max
Vq	<61x41x41 double>	408.55...	1.2743...
Xq	<61x41x41 double>	1	3
Yq	<61x41x41 double>	1	4
Zq	<61x41x41 double>	1	3
a	<1x36 double>	408.55...	1.2743...
c	<1275x36 double>	38.7120	1.4514...
corte	<4x3x3 double>	408.55...	1.2743...
d	<1275x40 double>	3	1413
lineal_arena	<579x41 double>	0	1023
puntual_agua	<545x41 double>	0	1025
puntual_arena	<1275x40 double>	3	1413
titulo	'Distribución del cont...		
x	<4x3x3 double>	1	3
xslice	1.5000	1.5000	1.5000
y	<4x3x3 double>	1	4
yslice	1.5000	1.5000	1.5000
z	<4x3x3 double>	1	3
zslice	[1,2]	1	2

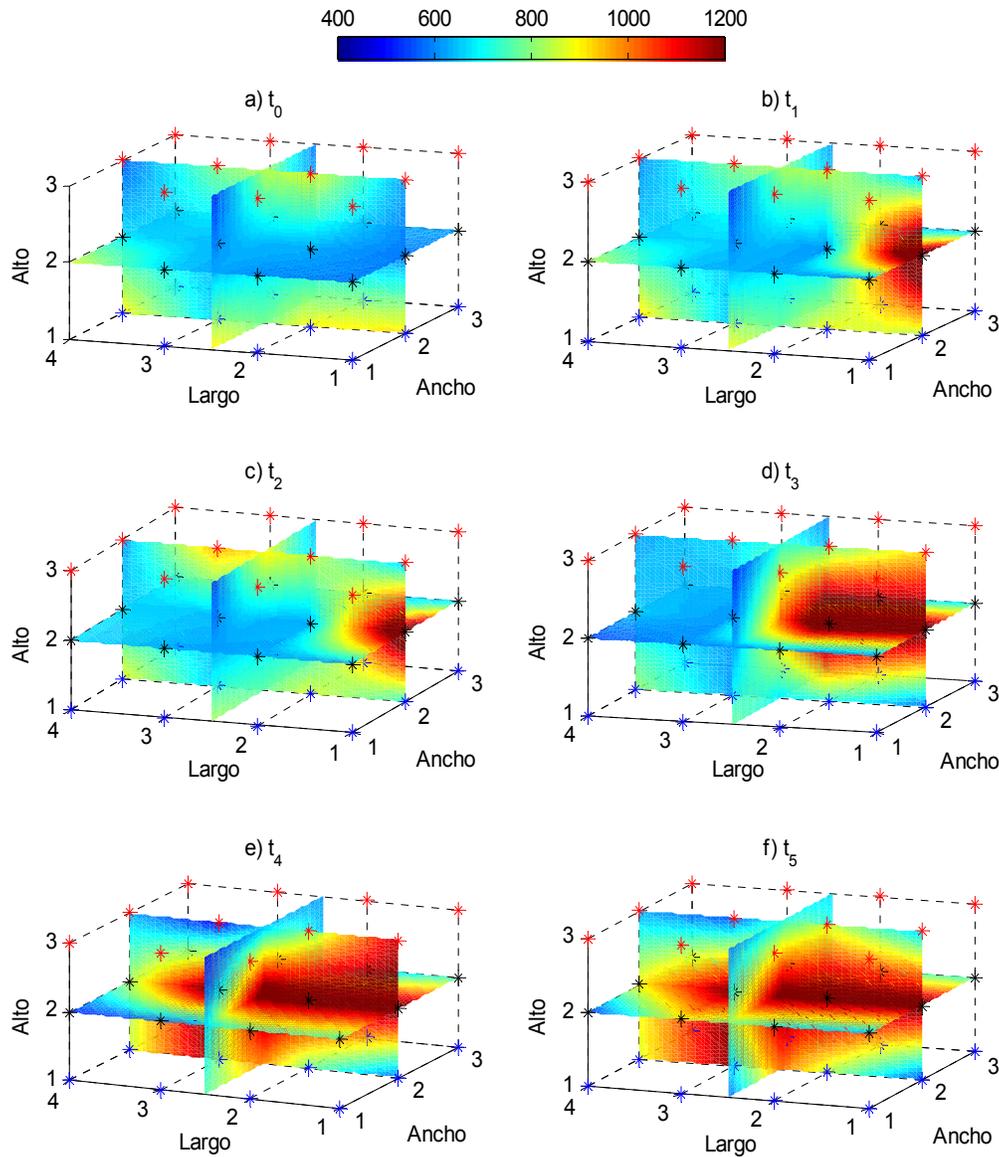
**Figura 4.4** Variables y matrices utilizadas en el programa de MatLab para obtener las gráficas tridimensionales de las interpolaciones de la conductividad eléctrica medidas por los 36 sensores.

#### 4.4 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

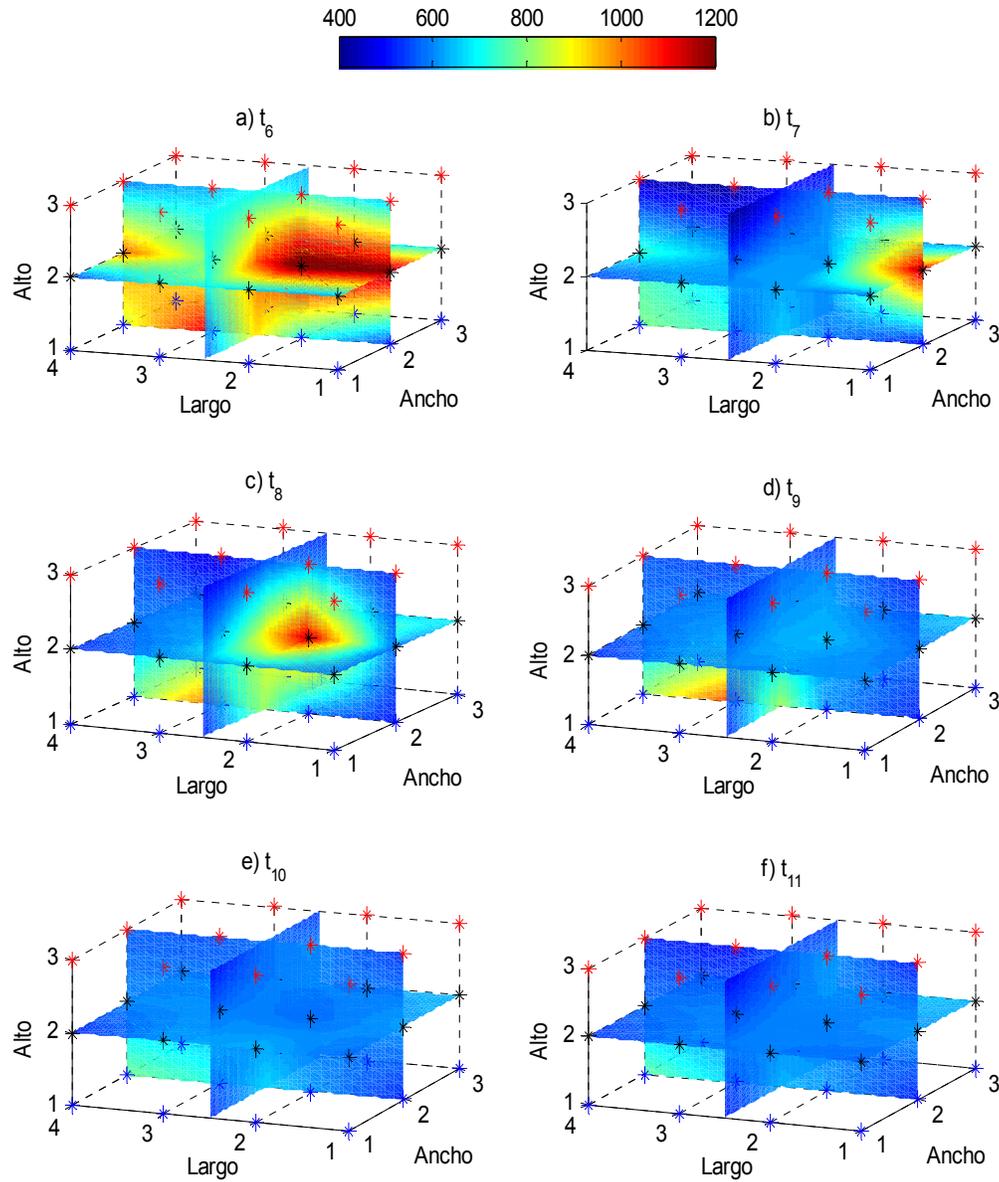
En esta sección se presentan los resultados obtenidos de los ensayos realizados descritos en la sección 3.5. Para cada experimento se presentan doce gráficas tridimensionales de las interpolaciones de la conductividad eléctrica medidas por los 36 sensores en doce instantes distintos, mientras se aplica un trazador bajo distintos patrones de dispersión y de medio, éstos son: patrón de dispersión puntual con arena como medio poroso; patrón de dispersión puntual sin medio poroso, es decir, únicamente agua; patrón de dispersión lineal con arena como medio poroso. Al igual que lo descrito en la sección 3.5, las zonas en rojo muestran la mayor concentración del contaminante. El contaminante ingresa al tanque por el lado indicado como “ancho”, en la parte derecha de cada gráfica.

Cada Figura (4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 y 4.10) tiene una escala que indica la conductividad en micro Siemens  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La escala para las figuras comienza en torno a los  $400 \mu\text{S}/\text{cm}$ , que es la conductividad del agua sin contaminante para el caso de estos ensayos. Así en las gráficas de estas figuras, las zonas en rojo muestran la mayor concentración del contaminante, mientras que las zonas en azul representan prácticamente ausencia de contaminante y la conductividad registrada es debida a la naturaleza del agua.

El microcontrolador y la interfaz gráfica fueron configurados para tomar muestras de los sensores de conductividad cada 2.5s. Para cada figura, las gráficas mostradas a continuación fueron hechas tomando las muestras 1, 24, 48, 72, 96, 120, 144, 168, 192, 216, 240 y 264 de tal modo que la primer gráfica muestra el estado inicial del sistema justo en el momento que el trazador es inyectado  $t_0$ , mientras que las demás gráficas muestran la distribución y conductividad eléctrica del trazador con un intervalo de tiempo de un minuto que corresponden a  $t_1 = 1$  minuto,  $t_2 = 2$  minutos,  $t_3 = 3$  minutos,  $t_4 = 4$  minutos,  $t_5 = 5$  minutos,  $t_6 = 6$  minutos,  $t_7 = 7$  minutos,  $t_8 = 8$  minutos,  $t_9 = 9$  minutos,  $t_{10} = 10$  minutos y  $t_{11} = 11$  minutos.



**Figura 4.5** Gráficas tridimensionales de las interpolaciones de la conductividad eléctrica medidas por los 36 sensores de conductividad mientras se aplica un trazador con un patrón puntual en el interior del tanque de simulación lleno con arena y un flujo laminar. Tiempo de un minuto entre cada muestra  $t_1$  a  $t_6$ . (Fuente: elaboración propia).



**Figura 4.6** Gráficas tridimensionales de las interpolaciones de la conductividad eléctrica medidas por los 36 sensores de conductividad mientras se aplica un trazador con un patrón puntual en el interior del tanque de simulación lleno con arena y un flujo laminar. Tiempo de un minuto entre cada muestra  $t_7$  a  $t_{12}$ . (Fuente: elaboración propia).

En la Figura 4.5 se muestra una gráfica tridimensional de las interpolaciones de la conductividad eléctrica medidas por los 36 sensores de conductividad mientras se aplica un trazador con un patrón puntual en el interior del tanque de simulación lleno con arena y un flujo laminar. En las Figuras 4.5a a la 4.5f se muestran la distribución del trazador a lo largo del tanque en intervalos de tiempo constantes de un minuto, de esta manera, la Figura 4.5a corresponde al momento de inicio de la prueba  $t_0$ , mientras que la Figura 4.5f muestra las interpolaciones que corresponden al minuto cinco  $t_5$ .

La Figura 4.6 muestra, al igual que la Figura 4.5, una gráfica tridimensional de las interpolaciones de la conductividad eléctrica medidas por los 36 sensores de conductividad mientras se aplica un trazador con un patrón puntual en el interior del tanque de simulación lleno con arena y un flujo laminar. Cada uno de los incisos muestra la distribución del trazador a lo largo del tanque, son continuación a los instantes de tiempo mostrados en la Figura 4.5. Así la Figura 4.6a corresponde al minuto seis después del inicio de la prueba  $t_6$ , la Figura 4.6b corresponde al minuto siete después de haber iniciado la prueba  $t_7$ , la Figura 4.6c muestra la gráfica de interpolaciones de la conductividad ocho minutos de haber iniciado la prueba  $t_8$ , la Figura 4.6d corresponde al minuto nueve  $t_9$ , mientras que las gráficas de las Figuras 4.6e y 4.6f muestran las interpolaciones que corresponden a los minutos diez y once  $t_{10}$ ,  $t_{11}$ .

En la Figura 4.5a se observa que hay tonalidades amarillas al iniciar la prueba, en torno de  $800 \mu\text{S}/\text{cm}$  de acuerdo a la escala del sistema. La tonalidad amarilla inicial se debe a residuos del trazador entre las pruebas realizadas. La magnitud de estas impurezas se vuelve menos significativa al momento de que el contaminante inyectado avanza a través del tanque según se observa en la Figura 4.5b, en donde se observa una tonalidad roja, en torno de las 1200 unidades. En las Figuras 4.5c, 4.5d, 4.5e y 4.5f se puede apreciar la distribución espacial del contaminante para cada instante de tiempo, donde es notorio que el trazador avanza en el sentido del flujo de agua suministrada, así también estas gráficas permiten determinar cuantitativamente el avance de la pluma del contaminante.

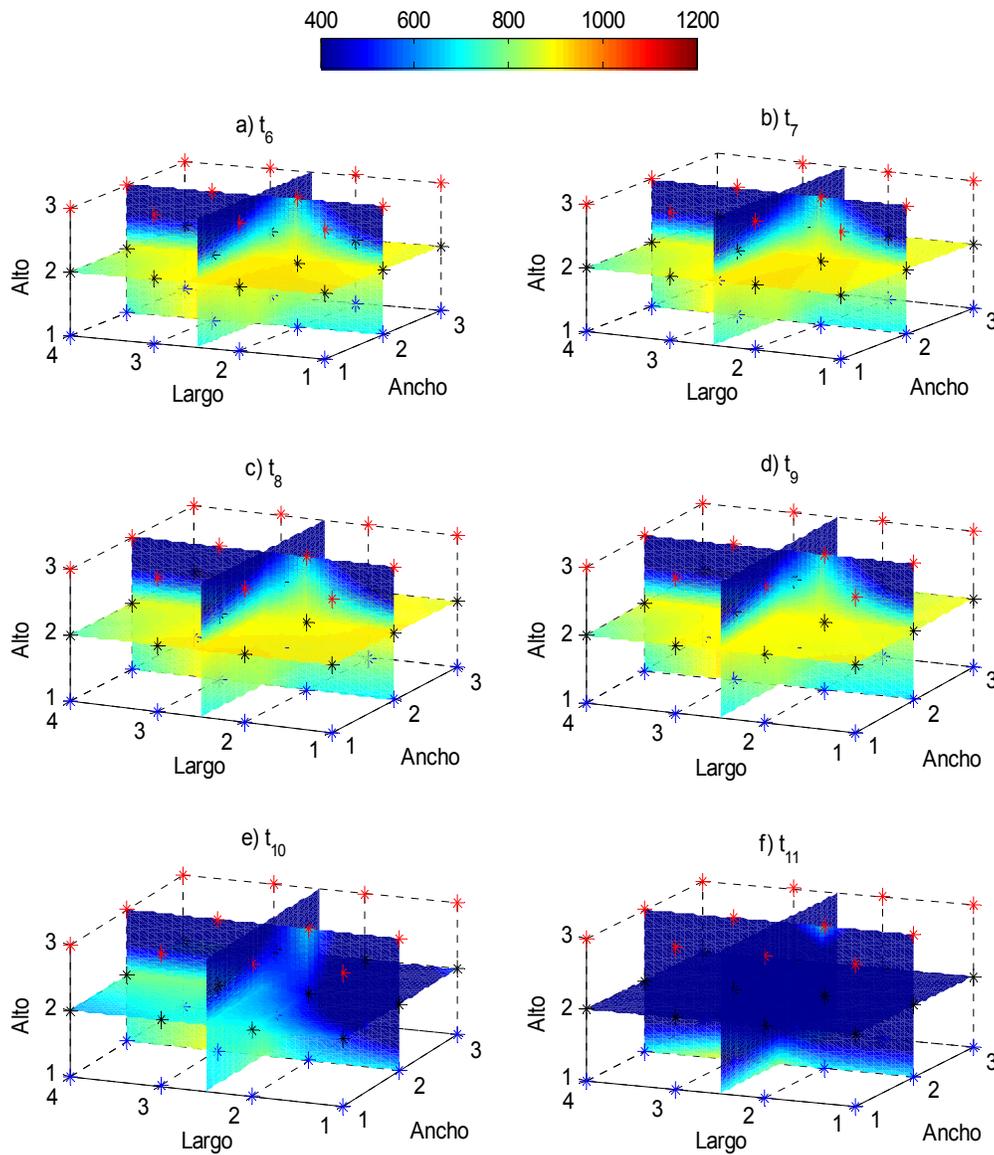
En la Figura 4.6a se aprecia que la tonalidad roja comienza a ser menos voluminosa debido a que el contaminante trazador comienza a abandonar el tanque. De la Figura 4.6b a la 4.6f, se observa que una tonalidad azul comienza a ser más voluminosa, al prestar atención

en la Figura 4.6 f, se muestra que el contaminante ha desalojado casi por completo el tanque de simulación, lo anterior se explica en la sección 3.5.1, en la que en los experimentos se considera que los orificios por donde sale el agua no están al nivel de la base del tanque, sino a 7 cm por encima de dicho nivel. Estos residuos de contaminante trazador permanecen incluso cuando ha pasado mucho tiempo después de haber iniciado la prueba como se puede apreciar en la Figura 4.6f y la concentración del contaminante ha disminuido considerablemente en las demás zonas.

En la Figura 4.7 se muestra un conjunto de gráficas tridimensionales de las interpolaciones de la conductividad eléctrica medidas por los 36 sensores de conductividad mientras se aplica un trazador con un patrón puntual en el interior del tanque de simulación lleno con agua y un flujo laminar. En las Figuras 4.7a a la 4.7f se muestran la distribución del trazador a lo largo del tanque en intervalos de tiempo constantes de un minuto, así, la Figura 4.7a corresponde al momento de inicio de la prueba  $t_0$ , mientras que la Figura 4.7f muestra las interpolaciones que corresponden al minuto cinco  $t_5$ .

La Figura 4.8 muestra, al igual que la Figura 4.7, una gráfica tridimensional de las interpolaciones de la conductividad eléctrica medidas por los 36 sensores de conductividad mientras se aplica un trazador un patrón puntual en el interior del tanque de simulación lleno con agua y un flujo laminar. Cada inciso muestra la distribución del trazador a lo largo del tanque, son continuación a los instantes de tiempo mostrados en la Figura 4.7. Así la Figura 4.8a corresponde al minuto seis después del inicio de la prueba  $t_6$ , la Figura 4.8b corresponde al minuto siete después de haber iniciado la prueba  $t_7$ , la Figura 4.8c muestra la gráfica de interpolaciones de la conductividad ocho minutos de haber iniciado la prueba  $t_8$ , la Figura 4.8d corresponde al minuto nueve  $t_9$ , mientras que las gráficas de las Figuras 4.8e y 4.8f muestran las interpolaciones que corresponden a los minutos diez y once  $t_{10}$ ,  $t_{11}$ .

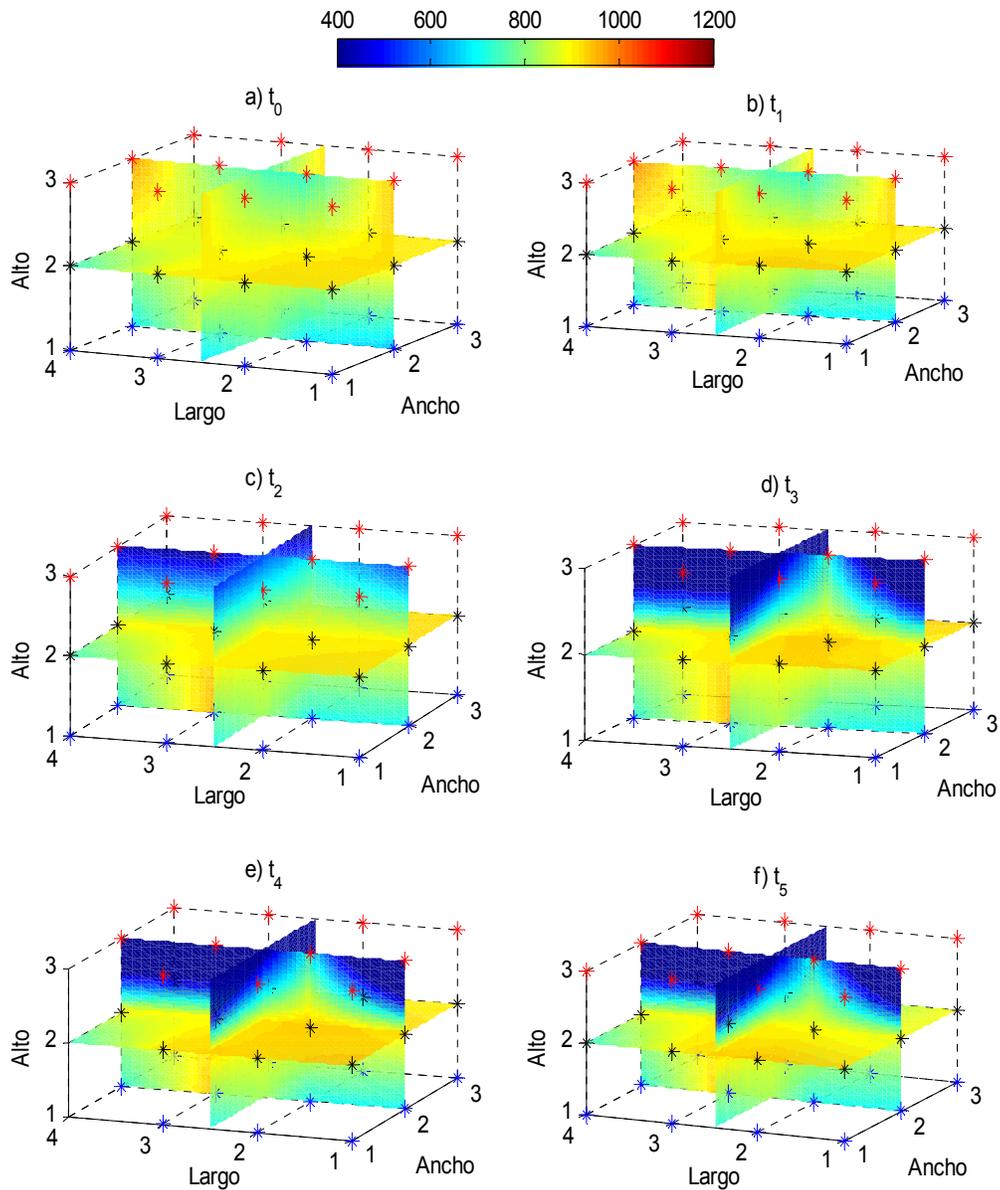




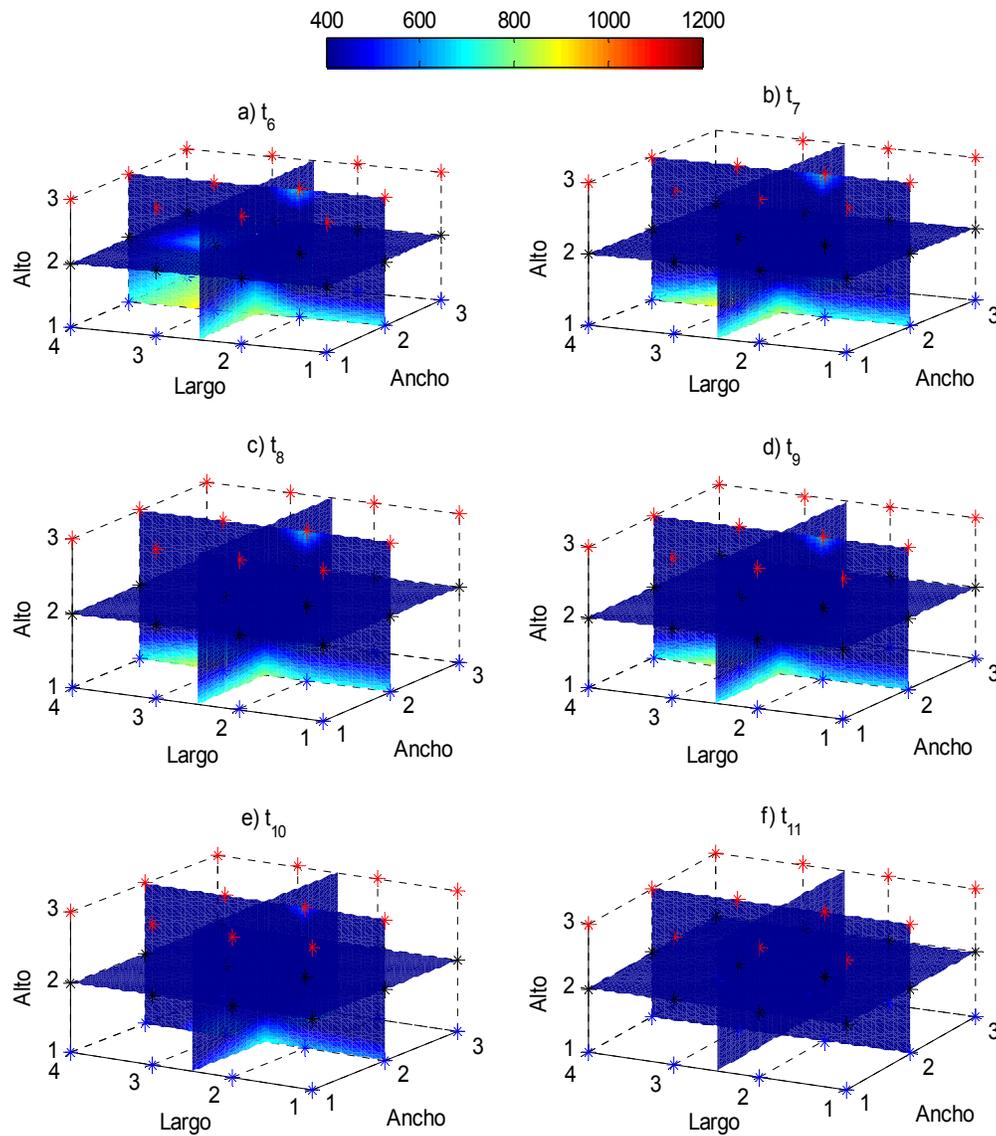
**Figura 4.8** Gráficas tridimensionales de las interpolaciones de la conductividad eléctrica medidas por los 36 sensores de conductividad mientras se aplica un trazador con un patrón puntual en el interior del tanque de simulación lleno con agua y un flujo laminar. Tiempo de un minuto entre cada muestra  $t_7$  a  $t_{12}$ . (Fuente: elaboración propia).

En la Figura 4.7a se observa que hay tonalidades amarillas en la mayor parte del tanque de simulación al iniciar la prueba, en torno de  $800 \mu\text{S}/\text{cm}$  de acuerdo a la escala del sistema. Lo anterior es debido a que en este experimento no se utilizó medio poroso, sólo agua y el trazador inyectado, además que el agua contenida en el tanque ya presentaba residuos de contaminante que se dispersaron por el tanque, según se muestra en las gráficas de las Figuras 4.7a, 4.7b, 4.7c, 4.7d y 4.7e, la conductividad del contaminante inyectado es similar a la que ya estaba dispersa en el tanque, por lo que no se ve variación en la conductividad del agua contenida en el sistema. En la Figura 4.7f se observa que la tonalidad amarilla comienza a disminuir, indicando que el contaminante comienza a desalojar el tanque. De la Figura 4.8a a la 4.8f, se observa que una tonalidad azul comienza a ser más voluminosa y se aprecia que el contaminante se distribuye en la parte baja del tanque, al prestar atención en la Figura 4.8f, se observa que el contaminante ha sido desalojado casi por completo del tanque de simulación.

En la Figura 4.9 muestra un conjunto de gráficas tridimensionales de las interpolaciones de la conductividad eléctrica medidas por los 36 sensores de conductividad mientras se aplica un trazador con un patrón lineal en el interior del tanque de simulación lleno con arena y un flujo laminar. En las Figuras 4.9a a la 4.9f se muestran la distribución del trazador a lo largo del tanque es intervalos de tiempo constantes de un minuto. La Figura 4.9a corresponde al momento de inicio la prueba  $t_1$ , la Figura 4.9b corresponde al minuto uno después de haber iniciado la prueba  $t_1$ , la Figura 4.9c muestra la gráfica de interpolaciones de la conductividad a dos minutos de haber iniciado la prueba  $t_2$ , la Figura 4.9d corresponde al minuto tres  $t_3$ , mientras que las gráficas de la Figuras 4.9e y 4.9f muestran las interpolaciones que corresponden a los minutos cuatro y cinco  $t_4$ ,  $t_5$ .



**Figura 4.9** Gráficas tridimensionales de las interpolaciones de la conductividad eléctrica medidas por los 36 sensores de conductividad mientras se aplica un trazador con un patrón lineal en el interior del tanque de simulación lleno con arena y un flujo laminar. Tiempo de un minuto entre cada muestra  $t_1$  a  $t_6$ . (Fuente: elaboración propia).



**Figura 4.10** Gráficas tridimensionales de las interpolaciones de la conductividad eléctrica medidas por los 36 sensores de conductividad mientras se aplica un trazador con un patrón lineal en el interior del tanque de simulación lleno con arena y un flujo laminar. Tiempo de un minuto entre cada muestra  $t_7$  a  $t_{12}$ . (Fuente: elaboración propia).

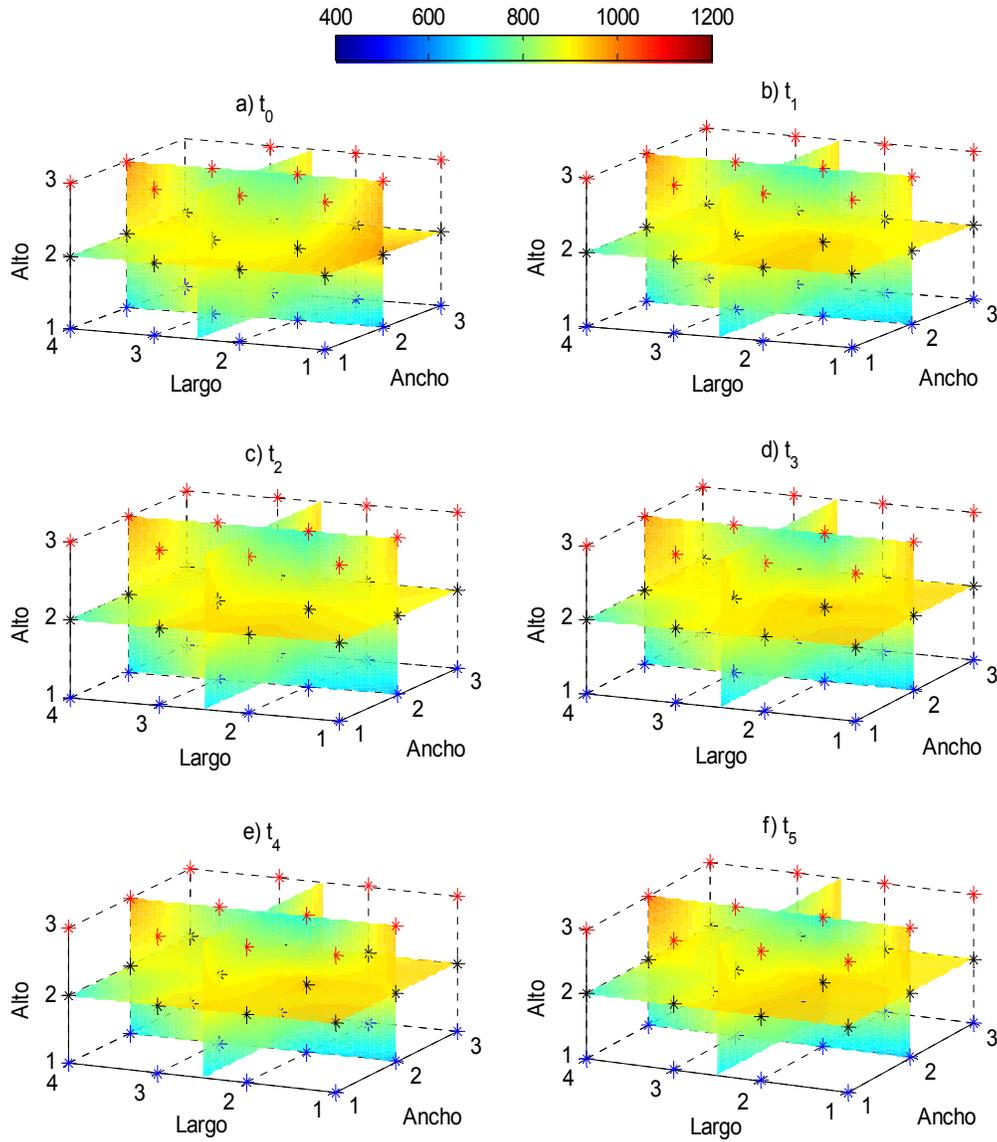
La Figura 4.10 muestra, al igual que la Figura 4.9, una gráfica tridimensional de las interpolaciones de la conductividad eléctrica medidas por los 36 sensores de conductividad mientras se aplica un trazador con un patrón lineal en el interior del tanque de simulación lleno con arena y un flujo laminar. Cada uno de los incisos muestra la distribución del trazador a lo largo del tanque, son continuación a los instantes de tiempo mostrados en la Figura 4.9. Así la Figura 4.10a corresponde al minuto seis después del inicio de la prueba  $t_6$ , la Figura 4.10b corresponde al minuto siete después de haber iniciado la prueba  $t_7$ , la Figura 4.10c muestra la gráfica de interpolaciones de la conductividad ocho minutos de haber iniciado la prueba  $t_8$ , la Figura 4.10d corresponde al minuto nueve  $t_9$ , mientras que las gráficas de la Figuras 4.10e y 4.10f muestran las interpolaciones que corresponden a los minutos diez y once  $t_{10}$ ,  $t_{11}$ .

El comportamiento de la distribución del contaminante trazador para este ensayo es muy similar al registrado en las Figuras 4.7 y 4.8. Se observa que en las Figuras 4.9a, 4.9b, 4.9c, 4.9d y 4.9e, la conductividad del contaminante inyectado es similar a la que ya estaba dispersa en el tanque por lo que no se ve variación en la conductividad del agua contenida en sistema. De la Figura 4.10a a la 4.10f se aprecia que una tonalidad azul comienza a ser más voluminosa hasta que es totalmente azul (Figura 4.10f), donde el contaminante ha desalojado por completo el sistema.

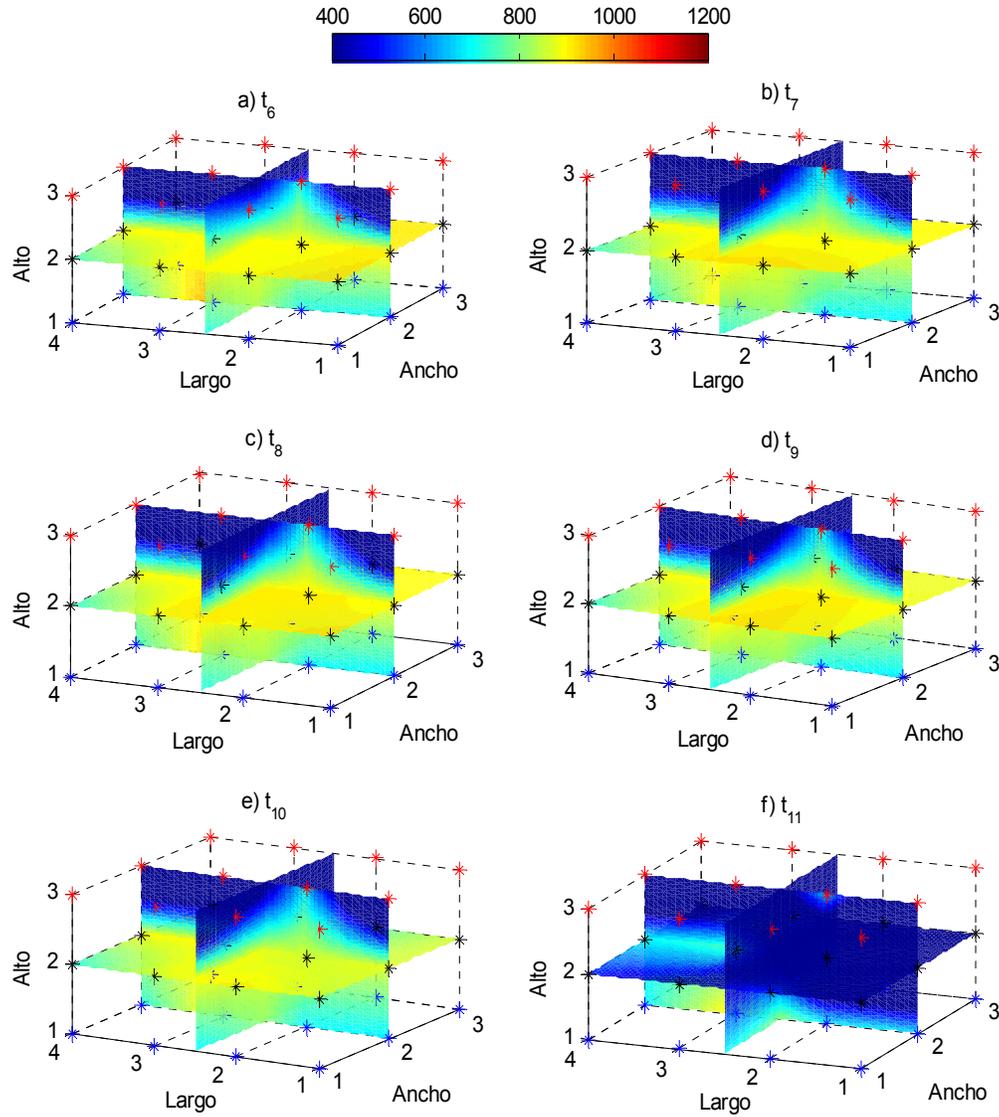
En la Figura 4.11 se muestra una gráfica tridimensional de las interpolaciones de la conductividad eléctrica medidas por los 36 sensores de conductividad mientras se aplica un trazador con un patrón lineal en el interior del tanque de simulación lleno con arena y un flujo laminar. En las Figuras 4.11a a la 4.11f se muestran la distribución del trazador a lo largo del tanque en intervalos de tiempo constantes de un minuto, de esta manera, la Figura 4.11a corresponde al momento de inicio de la prueba  $t_0$ , mientras que la Figura 4.11f muestra las interpolaciones que corresponden al minuto cinco  $t_5$ .

La Figura 4.12 muestra, al igual que la Figura 4.11, una gráfica tridimensional de las interpolaciones de la conductividad eléctrica medidas por los 36 sensores de conductividad mientras se aplica un trazador con un patrón lineal en el interior del tanque de simulación lleno con arena y un flujo laminar. Cada uno de los incisos muestra la distribución del trazador a lo largo del tanque, son continuación a los instantes de tiempo mostrados en la

Figura 4.11. Así la Figura 4.12a corresponde al minuto seis después del inicio de la prueba  $t_6$ , la Figura 4.12b corresponde al minuto siete después de haber iniciado la prueba  $t_7$ , la Figura 4.12c muestra la gráfica de interpolaciones de la conductividad ocho minutos de haber iniciado la prueba  $t_8$ , la Figura 4.12d corresponde al minuto nueve  $t_9$ , mientras que las gráficas de las Figuras 4.12e y 4.12f muestran las interpolaciones que corresponden a los minutos diez y once  $t_{10}$ ,  $t_{11}$ .



**Figura 4.11** Gráficas tridimensionales de las interpolaciones de la conductividad eléctrica medidas por los 36 sensores de conductividad mientras se aplica un trazador con un patrón lineal en el interior del tanque de simulación lleno con agua y un flujo laminar. Tiempo de un minuto entre cada muestra  $t_1$  a  $t_6$ . (Fuente: elaboración propia).



**Figura 4.12** Gráficas tridimensionales de las interpolaciones de la conductividad eléctrica medidas por los 36 sensores de conductividad mientras se aplica un trazador con un patrón lineal en el interior del tanque de simulación lleno con agua y un flujo laminar. Tiempo de un minuto entre cada muestra  $t_7$  a  $t_{12}$ . (Fuente: elaboración propia).

## 5. CONCLUSIONES

---

El avance de los sistemas de cómputo, así como de la instrumentación electrónica, presenta una oportunidad para su aplicación en experimentos a escala intermedia como herramientas fundamentales en el estudio de la conductividad eléctrica, asociado al análisis del flujo y transporte de contaminantes conservativos en medios porosos saturados. Así, una instrumentación electrónica automatizada reduce el tiempo de mediciones en presencia del investigador, así como el procesamiento de la información proveniente de variables físicas de estos experimentos, además de facilitar su correcta interpretación.

Para la realización de esta tesis se ha tenido en mente que una adecuada instrumentación electrónica, en particular el monitoreo de transporte de un contaminante en un medio poroso, requiere de una adecuada comprensión de los procesos que rigen este fenómeno. Con base a lo anterior, en este estudio se diseñó y construyó un sistema con la instrumentación electrónica adecuada, capaz de definir la evolución espacial y temporal de la distribución de un contaminante con base a la medición de la conductividad eléctrica en un medio poroso homogéneo saturado. El costo aproximado del desarrollo de este instrumento es de \$9,500.00, mismo que es inferior al costo comercial del equipo YSI 30 empleado en la calibración del sistema, cuyo precio fluctúa en el mercado en \$12,500.00. De esta manera, se establecen como válidas los supuestos establecidos en la hipótesis de esta tesis.

El microcontrolador PIC18F4550 empleado en el diseño del dispositivo cumple con los objetivos particulares, garantizando el cumplimiento del objetivo general propuesto. El sistema coordinó las siguientes actividades: estableció la comunicación con la computadora a través de una interfaz USB para transmitir los parámetros de operación al sistema y enviar

los valores medidos a la computadora; la adquisición de datos de sensores de conductividad eléctrica de una red tridimensional de sensores distribuidos en el interior de un tanque lleno con arena por medio de un sistema de multiplexores y de un conversor analógico digital; el control y el monitoreo de la inyección de un contaminante en un medio poroso.

El funcionamiento de los sensores de conductividad eléctrica es el adecuado, ya que no presenta restricciones de funcionamiento en función de la profundidad a la que pudieran ser utilizados. De acuerdo a las gráficas tridimensionales obtenidas en los resultados, todos los sensores cumplen con su función y su ubicación en cuanto a profundidad, no observándose interferencia entre los distintos resultados de la medición de la conductividad eléctrica. Asimismo, la sensibilidad de los sensores, así como la calibración de los mismos a través de software, permite una adecuada adquisición de datos, los cuales se interpretan de manera sencilla a través de las gráficas tridimensionales generadas en MatLab. De esta manera, tanto los sensores colocados cerca de las paredes del tanque de simulación, así como los que están ubicados en la parte central, se desempeñan de la misma manera y las lecturas de éstos dependen solo de la conductividad eléctrica del medio.

El sistema construido en el desarrollo de esta tesis ha demostrado su utilidad mediante una serie de experimentos controlados de laboratorio, que los resultados obtenidos presentados en la gráficas tridimensionales de las interpolaciones de la conductividad eléctrica medidas por los 36 sensores, mientras se aplica un trazador ya sea a través de un patrón de dispersión puntual o lineal, brindan información detallada acerca de la trayectoria que sigue el contaminante espacial y temporalmente por lo que resulta sencillo para el usuario del sistema la interpretación de los datos mostrados en dichas gráficas. La interpolación de los datos en una gráfica tridimensional contribuye a mostrar las variaciones de las concentraciones en un medio poroso, ilustrado, asimismo, las trayectorias del frente salino en función del desequilibrio de la extracción de agua subterránea.

La instrumentación incluida en este dispositivo permite que los experimentos, en un medio poroso heterogéneo a escala intermedia, se usen para caracterizar la distribución espacial de niveles hidráulicos, así como de las velocidades locales del flujo de agua subterránea con una mejor correlación espacial. Como resultado de la mayor capacidad computacional que existía hace unos años, los datos obtenidos a partir de dicha

instrumentación pueden ser integrados con mayor facilidad a un modelo numérico, esto con el uso de microprocesadores con mayor capacidad, así como de protocolos de comunicación cada vez más eficaces.

# BIBLIOGRAFÍA

---

- BADILLO, E. J. 2002. *Mecánica de suelos*, Limusa.
- BARLOW, P. M. 2003. *Ground water in freshwater-saltwater environments of the Atlantic Coast*, U.S. Dept. of the Interior, U.S. Geological Survey.
- BARTH, G. R., ILLANGASEKARE, T. H., HILL, M. C. & RAJARAM, H. 2001. A new tracer-density criterion for heterogeneous porous media. *Water Resources Research*, 37, 21-31.
- BOYLESTAD, R. L., NASHESKY, L. & BARRAZA, C. M. 2003. *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*, Prentice-Hall Hispanoamericana.
- CARR, G. M., NEARY, J. P. & GEMS/WATER 2008. *Water Quality for Ecosystem and Human Health*, United Nations Environment Programme, Global Environment Monitoring System/Water Programme.
- CASTILLO, J. 2003. Aplicación de diferentes métodos para estudiar la intrusión salina en acuíferos de Sonora, México. *Tecnología de la intrusión de agua de mar en acuíferos costeros: países mediterráneos*, 8, 3-10.
- CATANIA, F., MASSABÒ, M., VALLE, M., BRACCO, G. & PALADINO, O. 2008. Assessment of quantitative imaging of contaminant distributions in porous media. *Experiments in Fluids*, 44, 167-177.
- CHAPMAN, S. J. 2007. *MATLAB Programming for Engineers*, Thomson.
- DELLEUR, J. 1999. *The Handbook of Groundwater*, West Lafayette, Indiana, School of Civil Engineering, Purdue University.
- DUNN, A. M. & SILLIMAN, S. E. 2003. Air and water entrapment in the vicinity of the water table. *Ground Water*, 41, 729-34.
- FAO 1981. *Contaminación del Agua Subterránea*, Roma, Italia, Organización de las Naciones Unidas.
- FLOYD, T. L. 2006. *Fundamentos de sistemas digitales*, Pearson Educación.
- FLOYD, T. L. 2008. *Electronic Devices Electron Flow Version Value Package: Includes Laboratory Exercises for Electronic Devices*, Pearson College Division.

- HISCOCK, K. M. 2005. *Hydrogeology: principles and practice*, Blackwell Publishing.
- JALBERT, M., DANE, J. H. & BAHAMINYAKAMWE, L. 2003. Influence of porous medium and NAPL distribution heterogeneities on partitioning inter-well tracer tests: a laboratory investigation. *Journal of Hydrology*, 272, 79-94.
- LEVY, M. & BERKOWITZ, B. 2003. Measurement and analysis of non-Fickian dispersion in heterogeneous porous media. *J Contam Hydrol*, 64, 203-26.
- LÓPEZ GETA, J. A. 2007. La intrusión marina y su incidencia en acuíferos españoles. *Enseñanza de las ciencias de la tierra*, 13, 266-273.
- MCNEIL, J. D., OLDENBORGER, G. A. & SCHINCARIOL, R. A. 2006. Quantitative imaging of contaminant distributions in heterogeneous porous media laboratory experiments. *J Contam Hydrol*, 84, 36-54.
- MICROCHIP 2005. SN54LV4051A, SN74LV4051A. 8-Channel Analog Multiplexers/Demultiplexers. Microchip Technology Inc.
- MICROCHIP 2009. PIC18F2455/2550/4455/4550. 28/40/44-Pin, High-Performance, Enhanced Flash,  
USB Microcontrollers with nanoWatt Technology. Microchip Technology Inc.
- OOSTROM, M., HOFSTEE, C., WALKER, R. C. & DANE, J. H. 1999. Movement and remediation of trichloroethylene in a saturated heterogeneous porous medium: 1. Spill behavior and initial dissolution. *Journal of Contaminant Hydrology*, 37, 159-178.
- ROVEY, C. W., 2ND & NIEMANN, W. L. 2005. Do conservative solutes migrate at average pore-water velocity? *Ground Water*, 43, 52-62.
- SALAS-GARCÍA, J., GÁRFÍAS, J., LLANOS, H. & MARTEL, R. 2010. Diseño y aplicación de instrumentación para la caracterización hidrometeorológica e hidrogeológica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62, 233-247.
- SANCHÉZ FUSTER, I., CHACÓN, L. & ROMÁ, C. 2008. Investigación del flujo y transporte mediante experimentación a escala intermedia. *Ingeniería del agua*, 15, 147-162.
- SCHINCARIOL, R. A. & SCHWARTZ, F. W. 1990. An experimental investigation of variable density flow and mixing in homogeneous and heterogeneous media. *Water Resour. Res.*, 26, 2317-2329.
- SILLIMAN, S. E. & SIMPSON, E. S. 1987. Laboratory evidence of the scale effect in dispersion of solutes in porous media. *Water Resources Research*, 23, 1667-1673.
- SILLIMAN, S. E. & ZHENG, L. 2001. Comparison of Observations from a Laboratory Model with Stochastic Theory: Initial Analysis of Hydraulic and Tracer Experiments. *Transport in Porous Media*, 42, 85-107.

- SILLIMAN, S. E., ZHENG, L. & CONWELL, P. 1998. The use of laboratory experiments for the study of conservative solute transport in heterogeneous porous media. *Hydrogeology Journal*, 6, 166-177.
- TEXAS-INSTRUMENTS 2014. NA555, NE555, SA555, SE555. Precision Timers. Texas Instruments Incorporated.
- THULLNER, M., MAUCLAIRE, L., SCHROTH, M. H., KINZELBACH, W. & ZEYER, J. 2002. Interaction between water flow and spatial distribution of microbial growth in a two-dimensional flow field in saturated porous media. *Journal of Contaminant Hydrology*, 58, 169-189.
- URSINO, N., GIMMI, T. & FLÜHLER, H. 2001. Dilution of non-reactive tracers in variably saturated sandy structures. *Advances in Water Resources*, 24, 877-885.
- WHITLOW, R. 1994. *Fundamentos de Mecánica de Suelos*.
- YSI-30 2007. YSI Model 30 / YSI Model 30M. Handheld Salinity, Conductivity and Temperature System. YSI Incorporated.



## CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

El que suscribe Eduardo Castañeda Barrera Autor(es) del trabajo escrito de evaluación profesional en la opción de tesis con el título Sistema electrónico de control y monitoreo del flujo y transporte de contaminantes en el agua subterránea a escala de laboratorio, por medio de la presente con fundamento en lo dispuesto en los artículos 5, 18, 24, 25, 27, 30, 32 y 148 de la Ley Federal de Derechos de Autor, así como los artículos 35 y 36 fracción II de la Ley de la Universidad Autónoma del Estado de México; manifiesto mi autoría y originalidad de la obra mencionada que se presentó en la Facultad de Ingeniería (lugar) \_\_\_\_\_ para ser evaluada con el fin de obtener el Título Profesional de Ingeniero en Electrónica.

Así mismo expreso mi conformidad de ceder los derechos de reproducción, difusión y circulación de esta obra, en forma NO EXCLUSIVA, a la Universidad Autónoma del Estado de México; se podrá realizar a nivel nacional e internacional, de manera parcial o total a través de cualquier medio de información que sea susceptible para ello, en una o varias ocasiones, así como en cualquier soporte documental, todo ello siempre y cuando sus fines sean académicos, humanísticos, tecnológicos, históricos, artísticos, sociales, científicos u otra manifestación de la cultura.

Entendiendo que dicha cesión no genera obligación alguna para la Universidad Autónoma del Estado de México y que podrá o no ejercer los derechos cedidos.

Por lo que el autor da su consentimiento para la publicación de su trabajo escrito de evaluación profesional.

- a) Texto completo.
- b) Por capítulos.
- c) Solamente portada y tabla de contenido.

Se firma presente en la ciudad de Toluca, México, a los 6 días del mes de octubre de 2015

Eduardo Castañeda Barrera

Nombre y firma de conformidad