

# **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**REDISEÑO DE UNA HERRAMIENTA PARA OPTIMIZAR EL  
DESPLAZAMIENTO DE FLUIDOS EN MEDIOS POROSOS  
UTILIZANDO LA TÉCNICA DE DINÁMICA DE FLUIDOS  
COMPUTACIONALES**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA  
PRESENTA  
GABRIEL ALVAREZ CALDERÓN DE LA BARCA**

**Director: Dr. Marcelo López Parra**

**Co-Director: Dr. Simón López Ramírez**

**México Distrito Federal**

**2004**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **Agradecimientos**

A mi amada esposa e hijos, por que son la fuerza que me inspira con el ejemplo a seguir creciendo y me enseñan que aún falta mucho por emprender.

A mis padres, por hacer de mi lo que ahora soy.

A mis hermanos, por inspirarme a seguir adelante.

A la máxima casa de estudios, UNAM, por abrirme las puertas al conocimiento y sembrar en mi el deseo de seguir descubriendo nuevas áreas de oportunidad.

Al Instituto Mexicano del Petróleo, por ser una institución dedicada a difundir conocimiento a todas aquellas personas interesadas en aprender, y por brindarme la oportunidad de ser parte de ella.

A Conacyt, por creer en mi y otorgarme más que un apoyo económico, una oportunidad de superación.

A Ignacio R. Cortés Monroy, por brindarme su conocimiento y apoyo en el desarrollo y validación experimental de este trabajo, además de su valiosa amistad.

A Simón López Ramírez, que además de guiarme en el desarrollo de este trabajo y ser un buen amigo, compartió su conocimiento en la parte de modelación numérica.

A Cristina Avilés Alcántara, por brindarme el apoyo para llevar a cabo este trabajo.

A Soledad Bernal, Oscar de la Torre y Julián Ortiz por compartir su valiosa experiencia durante la realización de este trabajo.

| <b>ÍNDICE</b>   | <b>Pagina</b> |
|---|---------------|
| <b>Agradecimientos</b>                                | i             |
| <b>Abstract</b>                                       | ii            |
| <b>Lista de figuras</b>                               | iii           |
| <b>Lista de tablas</b>                                | v             |
| <b>Lista de símbolos</b>                              | vii           |
| <b>Introducción</b>                                   | viii          |
| <b>Objetivo</b>                                       | ix            |
| <b>Descripción de la estructura de trabajo</b>        | x             |
| <br>  |               |
| <b>CAPÍTULO 1. Diseño conceptual</b>                  |               |
| 1.1. Diseño   | 1             |
| 1.1.1. Objetivo de la etapa de diseño                 | 1             |
| 1.2. Clarificación del problema                       | 1             |
| 1.3. Especificaciones para el diseño del difusor      | 1             |
| 1.4. Descomposición del problema                      | 3             |
| 1.5. Análisis de las diferentes metodologías          | 7             |
| 1.6. Prototipo  | 8             |
| 1.7 Diferencias Geométricas                           | 9             |
| <br>  |               |
| <b>CAPÍTULO 2. Flujo de fluidos en medios porosos</b> |               |
| 2.1. Introducción                                     | 10            |
| 2.2. Porosidad  | 10            |
| 2.2.1. Clasificación de la porosidad                  | 11            |
| 2.3. Permeabilidad                                    | 12            |
| 2.3.1.. Clasificación de la permeabilidad             | 13            |
| 2.4. Factores que afectan la permeabilidad            | 14            |
| 2.4.1. Cementación                                    | 14            |
| 2.4.2. Re cristalización                              | 14            |

|  |    |
|--|----|
| 2.4.3. Granulación y molimiento                  | 15 |
| 2.4.4. Fracturamiento                            | 15 |
| 2.4.5. Arreglo o empaquetamiento                 | 15 |
| 2.4.6. Distribución, tamaño y forma del grano    | 15 |
| 2.4.7. Contaminación microbiológica              | 15 |
| 2.5. Medición de la permeabilidad                | 15 |
| 2.6. Partes que componen el EDF                  | 19 |
| 2.6.1. Celda hidrostática                        | 20 |
| 2.6.2. Módulo de presión de confinamiento        | 20 |
| 2.6.3. Módulo de presión de desplazamiento axial | 20 |
| 2.6.4. Módulo térmico                            | 21 |
| 2.6.5. Módulo de adquisición de datos            | 21 |
| 2.6.6. Celdas de almacenamiento                  | 21 |
| 2.6.7. Red de tuberías y accesorios              | 21 |
| 2.7. Principio de operación del EDF              | 21 |

### **CAPÍTULO 3. Comportamiento de flujo de fluidos bajo la técnica de DTR**

|   |    |
|---|----|
| 3.1. Comportamiento de flujo de fluidos debido al difusor | 23 |
| 3.2. Selección del trazador                               | 27 |
| 3.3. Técnica empleada para el análisis de las curvas DTR  | 28 |

### **CAPÍTULO 4. Diseño experimental**

|   |    |
|---|----|
| 4.1. Diseño Experimental  | 34 |
| 4.1.1. Introducción   | 34 |
| 4.2. Objetivos del diseño experimental  | 34 |
| 4.3. Características a analizar   | 34 |
| 4.3.1. Factores que afectan la permeabilidad  | 35 |
| 4.3.2. Factores que afectan el volumen muerto, pistón y de mezclado                         | 35 |
| 4.3.3. Inyección del trazador   | 35 |
| 4.3.4. Que factores se tomarán en cuenta  | 35 |
| 4.3.5. Plan a seguir para controlar los factores que afectan las características a analizar | 36 |
| 4.3.5.1. Re-cristalización  | 36 |
| 4.3.5.2. Fracturamiento   | 36 |
| 4.3.5.3. Contaminación microbiológica   | 37 |
| 4.3.5.4. Inyección del Trazador   | 37 |

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 4.4. Validación experimental | 38 |
| 4.5. Programa experimental   | 38 |
| 4.6. Esquema de trabajo      | 40 |

## **CAPÍTULO 5. Simulación numérica bajo la técnica de DFC**

|   |    |
|---|----|
| 5.1. Simulación matemática  | 41 |
| 5.1.1. Introducción   | 41 |
| 5.2. Modelo matemático  | 42 |
| 5.3. Ecuaciones fundamentales   | 43 |
| 5.4. Malla  | 47 |
| 5.5. Condiciones en la frontera   | 48 |
| 5.6. Método numérico  | 49 |
| 5.7. Procedimiento empleado para el análisis del comportamiento de flujo de fluidos en el sistema | 50 |

## **CAPÍTULO 6. Análisis de resultados**

|   |    |
|---|----|
| 6.1. Análisis numérico                                    | 55 |
| 6.2. Resultados del análisis numérico                     | 56 |
| 6.2.1. Curva de distribución de tiempos de residencia DTR | 59 |
| 6.3. Discusión de resultados                              | 64 |
| <b>Conclusiones</b>                                       | 65 |
| <b>Referencias Bibliográficas</b>                         | 66 |
| <b>Bibliografía</b>                                       | 68 |

## **ANEXO 1. Procedimiento API-RP-40. Prácticas recomendadas para el análisis de núcleos, sección 3.6**

|   |    |
|---|----|
| A.1.1. Limpieza de núcleos                  | 69 |
| A.1.2. Método de extracción por destilación | 69 |
| A.1.2.1. Procedimiento                      | 70 |

## **ANEXO 2. Procedimiento API-RP-40. Prácticas recomendadas para el análisis de núcleos, sección 3.7**

|               |    |
|---------------|----|
| A.2.1. Secado | 71 |
|---------------|----|

## **ANEXO 3. Procedimiento preparación, inyección y muestreo del trazador**

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| A.3.1. Procedimiento de preparación | 72 |
|-------------------------------------|----|

|  |    |
|--|----|
| A.3.2. Procedimiento de inyección del trazador | 72 |
| A.3.3. Procedimiento de muestreo del trazador  | 73 |

#### **ANEXO 4. Validación Experimental**

|  |    |
|--|----|
| A.4.1. Validación experimental   | 74 |
| A.4.2. Consideraciones para el estudio estadístico                           | 75 |
| A.4.3. Algoritmo de evaluación del método de medición                        | 76 |
| A.4.4. Datos y resultados del algoritmo de evaluación del método de medición | 82 |
| A.4.5. Discusión de resultados   | 89 |
| A.4.6. Precisión y veracidad   | 89 |
| A.4.7. Recomendaciones   | 89 |

|  |    |
|--|----|
| <b>ANEXO 5. Resultados de la simulación numérica de la fracción masa caso: difusor 1</b> | 94 |
|--|----|

|  |     |
|--|-----|
| <b>ANEXO 6. Resultados de la simulación numérica de la fracción masa caso: difusor 2</b> | 101 |
|--|-----|

|                        |     |
|------------------------|-----|
| <b>ANEXO 7. TABLAS</b> | 106 |
|------------------------|-----|

## **Abstract**

In this work, a methodology based on residence time distribution (RTD) curve was used in order to obtain the influence of the design of the diffuser on the fluid flow behavior such as: dead zones, mixing zones and by-passing. The purpose of this methodology is to improve the flow distribution through a better design of the diffuser. This diffuser is used to inject fluids in a porous media.

Along the experimental procedure, mathematical simulations using the Computational Fluids Dynamics (CFD) technique were carried out. The mathematical model was developed using experimental data obtained basically from the original design and it was used to predict the fluid behavior of new proposed geometries of the diffuser. Each design of the diffuser was deeply analyzed through velocity profiles, tracer distribution profiles and by the curve obtained by the RTD technique. The RTD curves were analyzed in order to characterize the fluid flow behavior.

The accuracy of the experimental data were validate through the ISO 5725 Norm. The results indicate that it is possible to reduce the influence of the diffuser on the fluid flow behavior (in this study, the dead zones was reduced in 28 %) and it is possible to improve the quality of the experimental results that are the base for the processes analysis in the oil industry.

## Lista de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1. Diagrama de operación simplificado del EDF y partes que conforman la celda hidrostática.                | 2  |
| Figura. 1.2. Diagrama caja negra del EDF.   | 3  |
| Figura 1.3. Diagrama de sub-funciones del EDF.  | 4  |
| Figura 1.4. Diagrama del análisis funcional.  | 6  |
| Figura. 2.1. a) Estructura de poro con arreglo cúbico, b) tipos de poros.   | 11 |
| Figura.2.2. Representación esquemática de la ley de Darcy.  | 13 |
| Figura. 2.3. Diagrama de flujo del EDF.   | 19 |
| Figura. 2.4. Partes que componen la celda hidrostática.   | 20 |
| Figura 3.1. Curvas de distribución de tiempos de residencia (DTR) del comportamiento de flujos ideales.             | 23 |
| Figura 3.2. Tipos de flujo no ideal que pueden presentarse debido a un flujo pistón y el efecto sobre la curva DTR. | 25 |
| Figura 4.1. Diagrama de razonamiento para definir el programa experimental.   | 34 |
| Figura. 4.2. Diagrama del programa experimental planteado.  | 39 |
| Figura 5.1a. Difusor original: Malla utilizada en la simulación matemática.   | 46 |
| Figura 5.1b. Difusor prototipo: Malla utilizada en la simulación matemática.  | 46 |
| Figura 5.2. Señal empleada en la simulación matemática que indica la inyección en impulso del trazador.             | 53 |
| Figura 6.1. Resultados de permeabilidad.  | 57 |
| Figura 6.2. Resultados de volumen muerto.   | 57 |
| Figura 6.3. Resultados de volumen pistón.   | 58 |
| Figura 6.4. Resultados de dispersión axial.   | 58 |
| Figura 6.5. Resultados de volumen de mezclado.  | 59 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 6.6. Curva de distribución de tiempos de residencia, caso 1-A-2/16".   | 59 |
| Figura 6.7. Curva de distribución de tiempos de residencia, caso 1-B-1/16".   | 60 |
| Figura 6.8. Curva de distribución de tiempos de residencia, caso 1-C-3/16".   | 60 |
| Figura 6.9. Curva de distribución de tiempos de residencia, caso 1-D-1/32".   | 61 |
| Figura 6.10. Curva de distribución de tiempos de residencia, caso 2-A-2/16".  | 61 |
| Figura 6.11. Curva de distribución de tiempos de residencia, caso 2-B-1/16".  | 62 |
| Figura 6.12. Curva de distribución de tiempos de residencia, caso 2-C-3/16".  | 62 |
| Figura 6.13. Curva de distribución de tiempos de residencia, caso 2-D-1/32".  | 63 |
| Figura 6.14. Caso que mostró un óptimo comportamiento de flujo con respecto a los criterios de selección: $V_d$ , $V_p$ , $D_a$ y $V_m$ .   | 64 |
| Figura. A.1.1. Equipo de destilación tipo soxhlet   | 70 |
| Figura A.3.1. Arreglo del by pass y secuencia para inyectar el trazador.  | 72 |
| Figura. A.4.1 Gráfica Permeabilidad: valores h agrupados por pares de ensayos, valor de significancia 1% @ 1.87, 5% @ 1.66, la línea punteada indica el límite superior admisible para valores de h.  | 85 |
| Figura. A.4.2. Gráfica Permeabilidad: valores k agrupados por pares de ensayos, valor de significancia 1% @ 1.47, 5% @ 1.33, la línea punteada indica el límite superior admisible para valores de k. | 85 |
| Figura. A.4.3. Gráfica Permeabilidad: Desviaciones típicas de repetibilidad.  | 88 |
| Figura. A.4.4. Gráfica Permeabilidad: Desviaciones típicas de reproducibilidad.   | 88 |

## Lista de Tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1.1. Partes que conforman la celda hidrostática   | 3  |
| Tabla 1.2. Formulación de funciones de la celda de trabajo  | 5  |
| Tabla 1.3. Grado de perturbación del proceso de difusión de flujo.  | 6  |
| Tabla 1.4. Partes críticas.   | 7  |
| Tabla 1.5. Carta Morfológica.   | 8  |
| Tabla 1.6. Prototipo desarrollado.  | 9  |
| Tabla 2.1. Medición de la permeabilidad empleando líquidos.   | 16 |
| Tabla 2.2. Medición de la permeabilidad empleando gases.  | 17 |
| Tabla 2.3. Ventajas y desventajas al emplear líquidos o gases.  | 18 |
| Tabla 3.1. Especificaciones técnicas del trazador   | 27 |
| Tabla 4.2. Descripción de hipótesis por sistema, descripción de sistemas y condiciones operacionales por corrida. | 40 |
| Tabla 5.1. Propiedades del agua bidestilada utilizados en la simulación matemática.                               | 48 |
| Tabla 5.2. Condiciones establecidas en la entrada del difusor original en estado estacionario.                    | 52 |
| Tabla 5.3. Condiciones establecidas en la entrada del difusor prototipo en estado estacionario.                   | 52 |
| Tabla 6.1. Matriz de configuraciones geométricas para el análisis numérico.                                       | 55 |
| Tabla 6.2. Resultado Experimental de referencia.  | 56 |
| Tabla 6.3. Resultados de la simulación numérica de los criterios de diseño  | 56 |
| Tabla. A.1.1. Selección de Solventes y usos   | 69 |
| Tabla. A.2.1. Métodos de secado para núcleos  | 71 |
| Tabla A.4.1 Valor de referencia aceptado. Permeabilidad (mD)  | 82 |
| Tabla A.4.2a Difusor original: Valores de permeabilidad medidos en el EDF.  | 83 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabla A.4.2b Difusor propuesto: Valores de permeabilidad medidos en el EDF.  | 83  |
| Tabla A.4.3. Valores de las medias de la permeabilidad medidas en el EDF en los dos niveles utilizados en este estudio de repetibilidad y reproducibilidad.    | 84  |
| Tabla A.4.4. Valores de las varianzas de la permeabilidad medidas en el EDF en los dos niveles utilizados en este estudio de repetibilidad y reproducibilidad. | 84  |
| Tabla A.4.5a. Los valores calculados cumplen con el criterio de selección de Cochran   | 86  |
| Tabla A.4.5b. Los valores calculados cumplen con el criterio de selección de Cochran   | 86  |
| Tabla A.4.6a. Los valores calculados cumplen con el criterio de selección de Grubbs.   | 86  |
| Tabla A.4.6b. Los valores calculados cumplen con el criterio de selección de Grubbs.   | 86  |
| Tabla A.4.7. Resultados de permeabilidad experimentales vs. simulación numérica.   | 87  |
| Tabla A.4.8. Permeabilidad: Estimación de las desviaciones típicas de repetibilidad y reproducibilidad, así como el sesgo del método de medición.              | 87  |
| Tabla A 4.9. Indicadores de Mandel h y k al 1 % de significancia.  | 90  |
| Tabla A 4..10. Tabla de los indicadores de Mandel h y k al 5% de significancia.  | 91  |
| Tabla A. 4.11. Tabla de los indicadores de Cochran al 1% y 5% de significancia.  | 92  |
| Tabla A. 4.12. Tabla de los indicadores de Grubb al 1% y 5% de significancia.  | 93  |
| Tabla A. 5.1.Resultados de la situación numérica caso: difusor 1.  | 94  |
| Tabla A. 6.1.Resultados de la situación numérica caso: difusor 2.  | 101 |

## Lista de Símbolos

En la siguiente lista se incluyen los símbolos comunes que se usan en el texto. Los símbolos más especializados se definen en el texto al estudiar los conceptos correspondientes.

- $\phi$  Porosidad
- $V_p$  Volumen de poro
- $V_b$  Volumen de bulbo
- $Q$  Flujo volumétrico
- $\mu$  Viscosidad
- $\Delta p$  Caída de presión
- $L$  Longitud
- $K$  Permeabilidad
- $A$  Área,  $(\text{longitud})^2$
- $T$  Temperatura absoluta
- $t$  Tiempo
- $u$  Velocidad superficial, longitud/tiempo
- $v$  Velocidad, longitud/tiempo
- $v$  Volumen específico o molar,  $\text{vol}/(\text{masa})$  o  $\text{vol}/(\text{mol})$
- $V_d$  Volumen muerto
- $V_p$  Volumen pistón
- $V_m$  Volumen mezclado
- $\theta$  Tiempo de residencia
- $\bar{\theta}$  Tiempo medio de residencia trayectoria libre media
- $\sigma^2$  Varianza
- $\rho$  Densidad, masa/volumen
- $C_i$  Concentración del componente  $i$ ,  $\text{mol}/\text{vol}$
- $D$  Difusividad global y difusividad de Knudsen,  $(\text{longitud})^2/\text{tiempo}$
- $D_L$  Coeficiente axial de dispersión,  $(\text{longitud})^2/\text{tiempo}$
- $d$  Diámetro de un tubo
- $E(\theta)$  Función de distribución del tiempo de residencia
- $Pe$  Número de Peclet,  $uL/D_L$  o  $ud_p/D_e$

## Introducción

Dentro de los estudios que se realizan en el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), en el Laboratorio de Perforación se encuentra la caracterización de propiedades petrofísicas como lo es la determinación de permeabilidad y estudios de daño a la formación por mencionar algunos, los cuales se vienen realizando en el equipo de desplazamiento de fluidos (EDF). Con el advenimiento de nuevos retos (recuperación primaria, secundaria, estimulaciones ácidas, etc.) que se presentan en la industria petrolera, es necesario redefinir la metodología experimental actualmente utilizada para poder así caracterizar con mayor precisión el comportamiento del flujo de fluidos en un medio poroso. En la búsqueda de estas mejores metodologías se debe sumar el monitoreo de nuevas variables que coadyuven a la toma de decisiones en todos los nuevos retos que se planteen.

Una de estas variables es el coeficiente de difusión, que bajo ciertas condiciones de flujo, debe depender únicamente de las características de los fluidos que están siendo estudiados, éste coeficiente es caracterizado por su comportamiento de flujo mediante curvas de distribución de tiempos de residencia (DTR), inclusive los estudios a nivel laboratorio pueden ser escalados a situaciones reales.

Por esto se deben rediseñar algunos de los componentes de los equipos que participen directamente en la calidad de los resultados obtenidos. Un componente fundamental del EDF es el difusor cuyo trabajo principal es el inyectar homogéneamente los fluidos en la cara transversal (entrada) del medio poroso en estudio. El diseño del difusor debe ser de tal manera que evite irregularidades de flujo tales como zonas muertas, circuitos cortos de flujo, etc. que puedan dar resultados erróneos de una variable fundamental en el desplazamiento en medio poroso como es el coeficiente de difusión, por esta razón el presente trabajo se plantea el siguiente objetivo:

## **Objetivo**

Este trabajo se enfocará específicamente en el rediseño de una herramienta, que en lo sucesivo se denominara difusor, que optimice la difusión del flujo de fluidos en medios porosos evitando irregularidades en la distribución del fluido tales como zonas muertas y circuitos cortos.

Para cumplir con tal propósito, el trabajo de investigación que se plantea será enfocado a evaluar la eficiencia que tiene el difusor para transmitir el flujo del fluido a través del medio poroso, y para lograrlo el programa de trabajo a seguir estará dividido en las siguientes etapas:

Etapa de Diseño

Diseño Experimental

Prueba Experimental de Comportamiento de Flujo del Difusor

Validación del Experimento

Simulación del Desempeño del Difusor.

Análisis de Resultados

En la etapa de diseño se llevará a cabo la fabricación de un difusor prototipo, que servirá como marco de referencia para comparar los datos experimentales del comportamiento de flujo con el difusor original. En la etapa de diseño experimental se planteará el programa experimental a seguir y se definirán las variables de respuesta a monitorear, posteriormente se ejecutará el programa experimental planteado y con los datos que arroje deberá efectuarse la validación de la metodología experimental. Una vez validada se simulará numéricamente la prueba experimental para encontrar la geometría que optimice el comportamiento de flujo del fluido sobre un medio poroso, para así concluir con el análisis de resultados definiendo cual de las alternativas de solución propuestas, evita irregularidades de flujo.

## **Descripción de la estructura del trabajo**

### **Capítulo 1**

En este capítulo se aplican metodologías de diseño tales como: análisis del valor, y análisis funcional, para definir si la interacción de las partes que componen el EDF afectan el desempeño del difusor, así también se genera la propuesta para fabricar un prototipo del difusor, con la finalidad de comparar el comportamiento de flujo que esté presente con respecto al difusor original en el equipo de desplazamiento de fluidos (EDF).

### **Capítulo 2**

En este capítulo se definen las bases teóricas de flujo de fluidos en medios porosos, específicamente sobre los conceptos de porosidad y permeabilidad, su clasificación y los parámetros que los afectan, también se describe el principio de operación del EDF.

### **Capítulo 3**

En este capítulo se describen las bases teóricas de la técnica de distribución de tiempos de residencia, que fue empleada para caracterizar el comportamiento de flujo del fluido debido a la geometría del difusor.

### **Capítulo 4**

En este capítulo se diseña el programa experimental a seguir, tomando en cuenta los factores que afectan la calidad de la medición, se definen las variables de respuesta que cuantificaran el desempeño del difusor y además se lleva a cabo la validación de los resultados experimentales.

### **Capítulo 5**

En este capítulo se definen los modelos matemáticos y condiciones de frontera empleados, bajo la técnica de dinámica de fluidos computacionales, mediante los cuales se llevó a cabo la simulación numérica.

### **Capítulo 6**

En este capítulo se presentan los resultados de las alternativas de solución propuestas y se define cual de las geometrías propuestas optimiza el desplazamiento de fluidos sobre un medio poroso.

## **1.1. Diseño**

### **1.1.1. Objetivo de la etapa de diseño**

Esta etapa, tiene como propósito, fabricar un prototipo del difusor, con la finalidad de comparar el comportamiento de flujo que esté presente con respecto al difusor original en el EDF. Así también, es necesario identificar si las partes componentes que interactúan con el difusor, pudieran oponer alguna restricción dentro del diseño.

Para cumplir con este propósito se requiere una metodología estructurada, que sirva como mecanismo para integrar las soluciones parciales y además sea este un procedimiento que conduzca paso a paso dentro de las actividades de diseño a realizar, por lo cual se empleará la metodología de los “Cinco Pasos” y la integración en ésta, del método de análisis del valor para identificar las partes críticas relacionadas al difusor y poder así generar los conceptos de solución.

## **1.2. Clarificación del problema**

En el diseño original del difusor, no es posible determinar con certeza si existen irregularidades de flujo, tales como, zonas muertas, circuitos cortos de flujo, etc. que puedan proveer resultados erróneos en el EDF en medios porosos. Por esta razón, es necesario verificar la presencia de estas perturbaciones mediante la técnica de distribución de tiempos de residencia descrita más adelante y corregirlas mediante el diseño de un difusor que optimice el desplazamiento de fluidos en medios porosos.

## **1.3. Especificaciones para el diseño del difusor**

1. El difusor debe asegurar la distribución de flujo del fluido sobre la sección transversal del medio poroso.
2. El difusor debe reducir la presencia de zonas muertas.
3. El difusor debe evitar la canalización de flujo.
4. La geometría del difusor debe ser de 1” de largo X 1” de diámetro.

Las especificaciones 1, 2 y 3 se definen por la teoría de comportamiento de flujo de un fluido, la cual se describe en el capítulo 3, de tal forma que los criterios de diseño bajo los cuales se cuantificará el comportamiento de flujo del difusor son:

Volumen muerto ( $v_d$ )= cero;

Volumen pistón ( $v_p$ ) = 100% y;

Volumen de mezclado ( $V_m$ ) = cero.

Estos valores se presentan en una situación ideal, pero aún así, se tomaran como referencia.

El punto de partida, para identificar si las partes componentes que interactúan con el difusor pudieran oponer alguna restricción dentro del diseño es, el diagrama operacional del EDF que se muestra en la Figura. 1.1 y las partes que lo conforman se desglosan en la tabla 1.1.

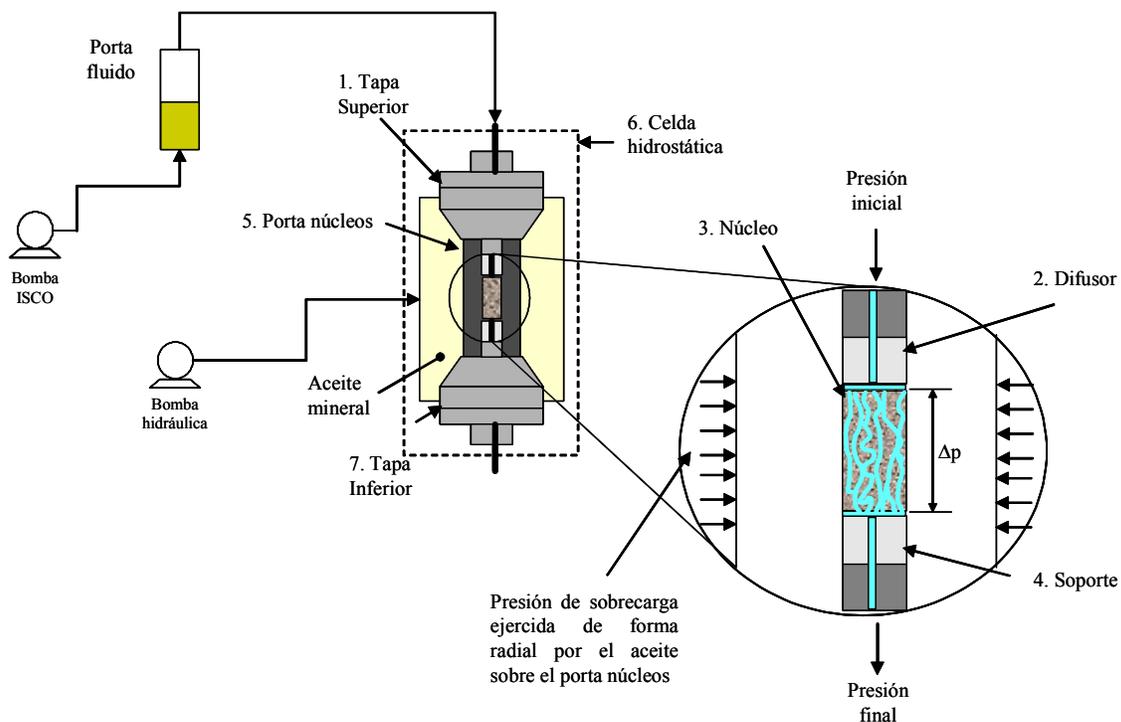


Figura 1.1. Diagrama de operación simplificado del EDF y partes que conforman la celda hidrostática.

Tabla 1.1. Partes que conforman la celda hidrostática

| <b>Parte</b>                                  | <b>Material</b> |
|---|-----------------|
| 1. Tapa superior de la celda                  | Acero           |
| 2. Difusor                                    | Acero           |
| 3. Núcleo                                     | Roca            |
| 4. Soporte                                    | Acero           |
| 5. Porta Núcleo                               | Vitón           |
| 6. Celda hidrostática (recipiente de presión) | Acero           |
| 7. Tapa inferior de la celda                  | Acero           |

#### 1.4. Descomposición del problema

Para lograr la descomposición funcional del problema, se representará, como una simple caja negra que opera con materiales, energía y señales de flujo, veáse Figura.1.2., para posteriormente dividir la caja negra en sub-funciones, ver Figura. 1.3., que permitan crear una descripción más específica de qué es lo que hace, cada elemento del sistema y así describir las funciones que realiza. La división del proceso se repite hasta que cada sub-función es suficientemente simple para poder trabajar con ella.

#### Análisis Funcional

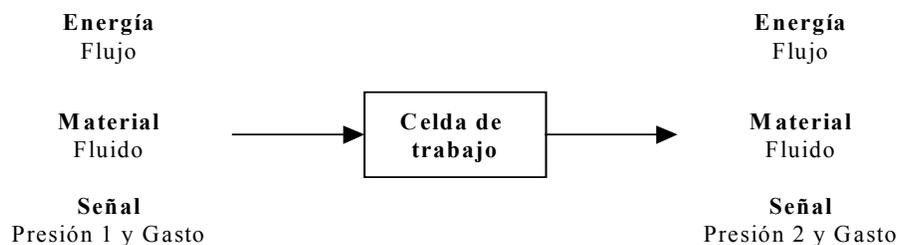


Figura. 1.2. Diagrama caja negra del EDF.

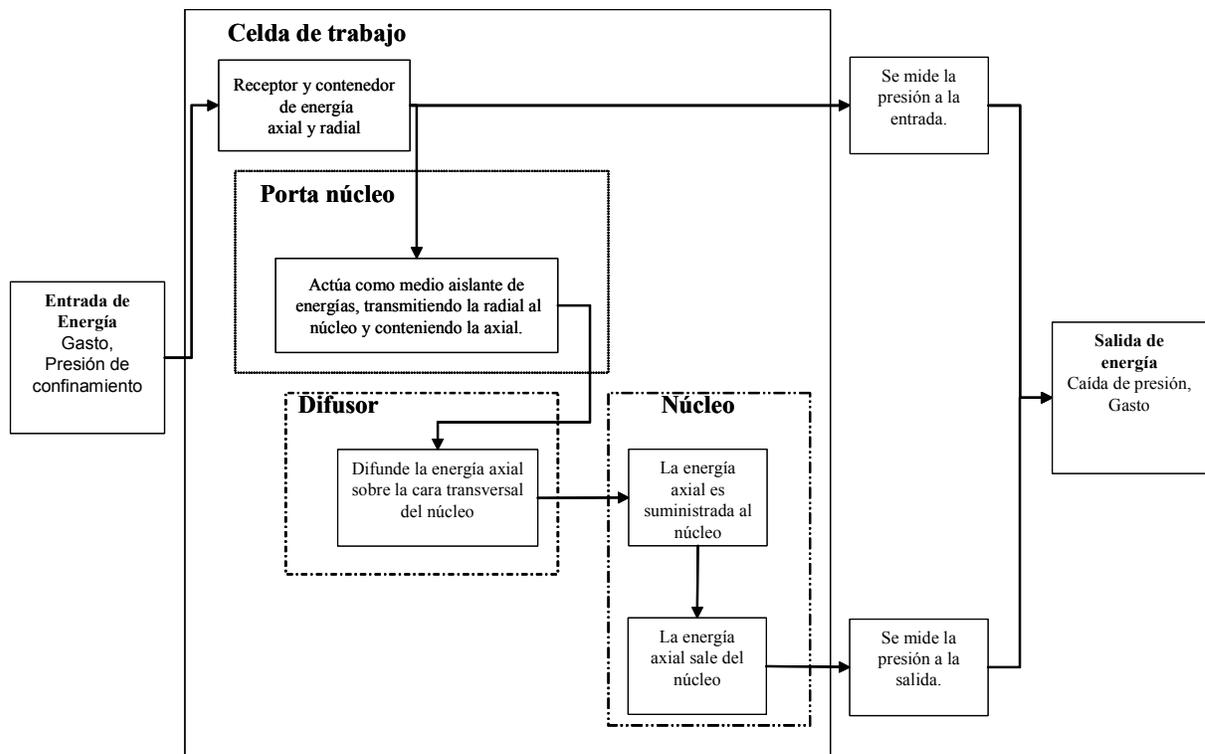


Figura 1.3. Diagrama de sub-funciones del EDF.

De acuerdo al análisis funcional, las funciones que desempeña cada una de las parte de la celda hidrostática, tabla 1.1, se describen en la tabla 1.2 y su correspondiente Diagrama FAST se presenta en la Figura. 1.4.

Tabla 1.2. Formulación de funciones de la celda de trabajo

| <b>Parte</b>              | <b>Función</b>  |
|---------------------------|---|
| Tapa superior de la celda | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tapar a presión</li> <li>• Permitir la entrada del fluido</li> <li>• Sostener porta núcleos</li> </ul>   |
| Difusor                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Receptor del flujo de entrada</li> <li>• Distribuir flujo uniformemente sobre el área transversal del núcleo</li> <li>• Asegurar flujo pistón sobre el área transversal del núcleo</li> <li>• Sostener núcleo</li> <li>• Soporta la carga radial de la presión de confinamiento</li> </ul> |
| Núcleo                    | Material de estudio   |
| Soporte                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Receptor del flujo de salida</li> <li>• Sostener núcleo</li> <li>• Soporta la carga radial de la presión de confinamiento</li> </ul>   |
| Porta Núcleo              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sujeta núcleo, difusor y soporte</li> <li>• Aísla el núcleo del fluido de confinamiento</li> <li>• Mantiene la presión de sobrecarga y de confinamiento aisladas entre sistemas</li> <li>• Transmite radialmente la presión de confinamiento sobre el núcleo</li> </ul>                    |
| Celda de trabajo          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Recipiente de presión</li> <li>• Contener porta núcleo</li> <li>• Reproducir condiciones de presión y temperatura del yacimiento</li> </ul>  |
| Tapa inferior de la celda | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tapar a presión</li> <li>• Permitir salida de flujo del fluido</li> <li>• Sostener porta núcleo</li> <li>• Entrada del termostato</li> </ul>   |

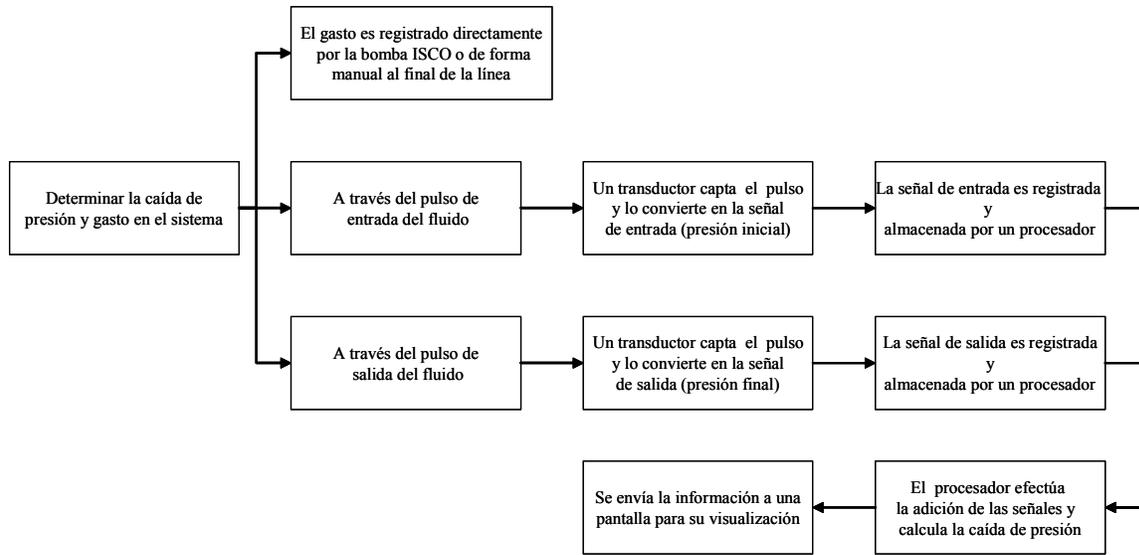


Figura 1.4. Diagrama del análisis funcional.

Para establecer que piezas pueden perturbar la difusión de flujo del difusor, se estableció de forma cualitativa, la interacción que cada parte tiene con el proceso de difusión de flujo del difusor, véase tabla 1.3, la relación de interacción es de 0 a 10, donde el máximo valor perturbará en mayor orden el flujo del difusor, el valor de interacción se obtuvo de los problemas observados tras realizar varias corridas experimentales, los cuales fueron: obstrucción de sólidos tanto en la tapa superior como en el difusor y daño estructural sobre el porta núcleos.

Tabla 1.3. Grado de perturbación del proceso de difusión de flujo.

| Parte                     | Interacción | Grado Perturbación, % |
|---------------------------|-------------|-----------------------|
| Tapa superior de la celda | 1           | 7.15 %                |
| Difusor                   | 7           | 50 %                  |
| Núcleo                    | -           | -                     |
| Soporte                   | -           | -                     |
| Porta Núcleo              | 6           | 42.85 %               |
| Celda                     | -           | -                     |
| Tapa inferior de la celda | -           | -                     |
| Total                     | 14          | 100 %                 |

En este caso la perturbación de flujo no fue debida a una pieza, sino a un mal programa de mantenimiento de limpieza y a una presión de confinamiento excesiva respectivamente, que indirectamente perturbo la difusión de flujo del difusor, las perturbaciones anteriores se tomaron en cuenta para la fase de diseño experimental por lo cual se consideró importante señalarlo.

### 1.5. Análisis de las diferentes metodologías

Al aplicar las metodologías, se identificaron las piezas críticas de las partes que conforman la celda hidrostática, véase tabla 1.4, que pudieran afectar la eficiencia del difusor para difundir el flujo de fluido a través del medio poroso, además se agrega la ecuación de Darcy por ser el algoritmo en el cual está basado el principio de operación del EDF, tema que se tratará en el siguiente capítulo.

Tabla 1.4. Partes críticas.

| Metodología                    | Pieza(s) crítica(s)                                    |
|--------------------------------|--|
| Análisis funcional             | Difusor, Porta núcleo y núcleo.                        |
| Análisis del valor             | Porta núcleo   |
| $k = \frac{q\mu L}{A\Delta p}$ | Bomba axial, fluido, núcleo y transductores de presión |

La pieza que podría afectar la eficiencia del difusor es el porta núcleos por su gran interacción de acuerdo a los análisis realizados, motivo por el cual deberá tomarse en cuenta dentro del programa experimental para asegurar su buen funcionamiento.

El siguiente paso a seguir a partir de una lluvia de ideas es presentar alternativas de solución del difusor que será fabricado, las cuales se muestran en la carta morfológica de la tabla 1.5.

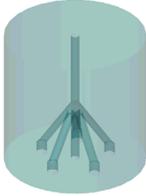
Tabla 1.5. Carta Morfológica.

| Pieza        | Opción 1  | Opción 2   | Opción 3  |
|--------------|---|--|---|
| Difusor      | <b>Fabricar un difusor incrementando el número de toberas.</b>      | Fabricar el difusor mediante un proceso de sinterizado                         |   |
| Porta núcleo | Fabricar mediante un proceso de extrusión con un polímero adecuado. | Seleccionar un material con mejores propiedades elásticas para su fabricación. | <b>Determinar el límite de la presión de trabajo.</b> |

### 1.6. Prototipo

Un prototipo es una aproximación de un producto a lo largo de una o más dimensiones de interés. Los prototipos físicos son artefactos tangibles creados para representar el producto; los aspectos del producto de interés son construidos para su experimentación y prueba; bajo este concepto se creó el prototipo del difusor. La opción seleccionada de la carta morfológica, que se muestra en la tabla 1.5, para fabricar el prototipo del “difusor” es la número 1, el criterio de selección fue con base a los recursos disponibles buscando cubrir con el objetivo planteado al inicio del capítulo, no se llevó a cabo ninguna evaluación en esta fase, ya que la optimización del difusor se hará a través de herramientas de simulación numérica en los capítulos 5 y 6. Con respecto al porta núcleo, se seleccionó la opción 3, ya que un estudio exhaustivo del diseño correcto del porta núcleos queda fuera del alcance de este trabajo; y la función que desempeña es alcanzada siempre y cuando no se rebasó su límite de presión de trabajo.

Tabla 1.6. Prototipo desarrollado.

| Nombre  | Pieza Original  | Prototipo   |
|---------|---|---|
| Difusor |  |  |

### 1.7. Diferencias Geométricas

Las diferencias geométricas se pueden apreciar en la tabla 1.6 y consisten en un mayor número de toberas de inyección (cinco) del difusor prototipo con respecto al difusor original, las cuales proporcionarían una mayor área de impregnación y en consecuencia un frente de ataque mayor que puede proveer una distribución de flujo más homogéneo.

## 2.1. Introducción

Antes de continuar con el diseño experimental, es necesario establecer las bases sobre las cuales estará apoyada la experimentación, por tal razón se definirá en primera instancia los conceptos de porosidad y permeabilidad hasta llegar a la ley en la cual está sustentado el principio de operación del EDF.

## 2.2. Porosidad

La porosidad da una idea de la capacidad de almacenamiento que puede tener la roca para contener hidrocarburos. Esta porosidad que se encuentra en arenas y carbonatos, es formada después de uno o varios procesos geológicos que se realizaron en la roca. Las capas formadas por granos de arena o fragmentos de carbonatos nunca se acomodaron en forma perfecta. Aún con la presión de sobrecarga que experimentan estas capas, debida a los estratos suprayacentes, no será suficiente para lograr una compactación perfecta. A estos espacios vacíos que quedan en la roca se les llaman poros, intersticios, espacios porosos o, bien, estructura porosa. Este espacio poroso provee el lugar para almacenar los fluidos que se tengan en la formación (aceite, gas, agua). Entonces dependiendo del tamaño y de la forma del grano y de su ocurrencia será la porosidad que se tenga en la roca sedimentaria, ver figura 2.1.

La porosidad es definida entonces, como la relación del espacio vacío en la roca al volumen total de ella, y se expresa como sigue:

$$\phi = \frac{V_p}{V_b} \times 100 \quad (2.1)$$

donde:

- $\phi$  = Porosidad [%]
- $V_p$  = Volumen de poro
- $V_b$  = Volumen de bulto

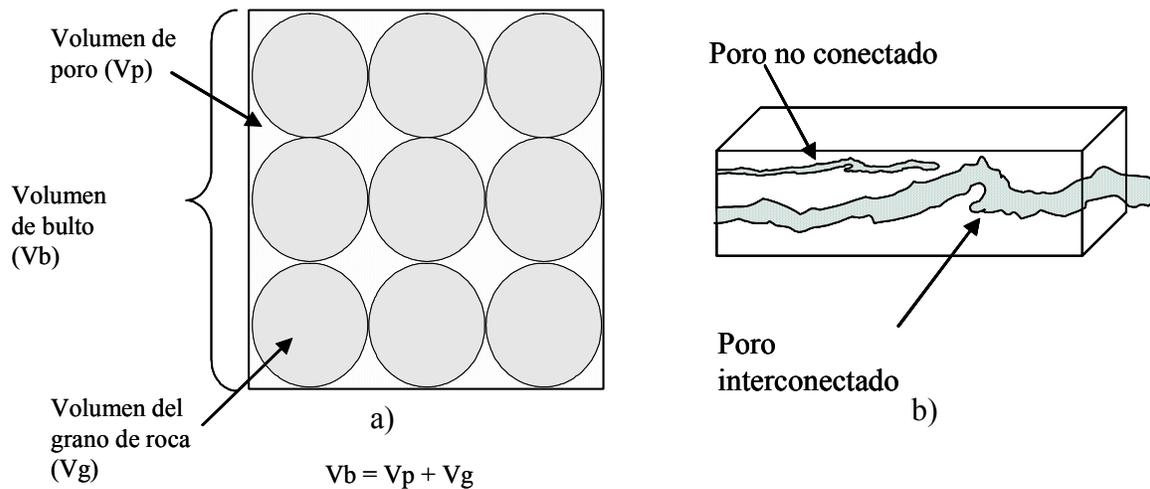


Figura. 2.1. a) Estructura de poro con arreglo cúbico, b) tipos de poros.

### 2.2.1. Clasificación de la porosidad

En general se tienen dos clasificaciones, una de ellas se refiere al modo de origen o tiempo de depósito y la otra a la cantidad de material cementante o distribución y forma de los poros (Figura. 2.1), la cual nos resulta relevante en este trabajo, considerando esta última, se tienen las siguientes porosidades:

**Porosidad absoluta (total).** Se define como el porcentaje del espacio disponible respecto al volumen total de la roca sin tomar en cuenta si estos espacios (poros) están interconectados o no.

**Porosidad efectiva.** Es el porcentaje del espacio poroso interconectado con relación al volumen total de la roca.

Esta porosidad efectiva es la que interesa realmente, por la comunicación de los fluidos en el yacimiento, es decir, es una medida de la capacidad que tiene la roca para manejar un volumen de fluidos. Así entonces, se podrá tener porosidades absolutas grandes, pero esto no sirve de nada si no existe comunicación entre los poros de la roca.

### 2.3. Permeabilidad

La permeabilidad es una propiedad intrínseca del medio poroso y mide su capacidad para transmitir fluidos, entonces, se puede decir que la permeabilidad mide la conductividad de una roca. Así el grado de permeabilidad de una roca estará dado de acuerdo a la facilidad que presente para el paso de fluidos a través de ella. El recíproco de la permeabilidad representa la resistencia viscosa que el medio poroso opone al flujo del fluido cuando prevalece un flujo bajo. La permeabilidad de un medio isotrópico homogéneo es siempre la misma en cualquier punto y en todas las direcciones. Sin embargo, las rocas no son completamente homogéneas e isotrópicas.

La permeabilidad está ligada a la porosidad efectiva de la roca, porque para que pueda existir debe haber interconexión de los espacios porosos, dado que la roca puede tener porosidad más no necesariamente permeabilidad.

La relación que describe el flujo de fluidos a través de un medio poroso fue desarrollada por Henry Darcy en 1856, y establece que el porcentaje de flujo a través de una roca dada es directamente proporcional al gasto, viscosidad del fluido y longitud del medio poroso e inversamente proporcional al área del medio poroso y presión aplicada, es decir, una roca tiene una permeabilidad de 1 Darcy, si a través de ella fluye 1 mililitro de fluido cada segundo con una viscosidad de 1 cp a través de una porción de roca de 1 cm de longitud y de área transversal de 1 cm<sup>2</sup> y se registra en ella una caída de presión de 1 atmósfera, ley de Darcy (Figura 2.2), lo que se expresa matemáticamente como:

$$k = \frac{q\mu L}{A\Delta p} \quad (2.2)$$

Donde:

$Q$  = Gasto, [ $\text{cm}^3/\text{min}$ ]

$\mu$  = Viscosidad [cp]

$\Delta p$  = Caída de presión [atm]

$L$  = Longitud, [cm]

$A$  = Área, [ $\text{cm}^2$ ]

$K$  = Permeabilidad, [darcys]

Es importante mencionar que Darcy estableció su ecuación con base en las siguientes premisas:

Roca homogénea

Roca o medio no reactivo

Medio saturado 100% por un fluido homogéneo en una fase

Fluido newtoniano

Flujo incompresible

Flujo laminar y

Temperatura constante

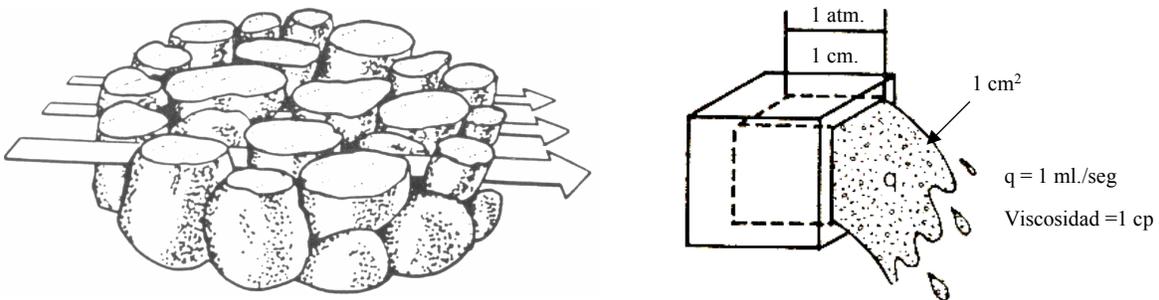


Figura.2.2. Representación esquemática de la ley de Darcy.

### 2.3.1. Clasificación de la permeabilidad

La permeabilidad puede ser clasificada de acuerdo al contenido de fluidos en la roca y a la forma de flujo que se tiene, esto es:

- Permeabilidad absoluta ( $K$ ). Es aquella en la cual solo se tiene un fluido homogéneo en el medio poroso, por lo tanto, la permeabilidad no varía

considerando que el fluido no reaccione con el medio. A este tipo de permeabilidad se le llama también permeabilidad específica o intrínseca y es una propiedad específica de la roca.

- Permeabilidad efectiva ( $K_{ef}$ ). Cuando en el medio se tiene presente más de un fluido, entonces se dice que la permeabilidad efectiva es la permeabilidad de un fluido en particular, sea aceite, gas o agua. Esta permeabilidad no solo depende de la roca, sino también de las cantidades y propiedades de los fluidos presentes en ella. Estas permeabilidades cambiarán en función de la variación de las saturaciones que se tengan. Se ha encontrado que:  $0 \leq K_{ef} \leq K$ .

- Permeabilidad relativa ( $K_{rf}$ ). Es la relación de la permeabilidad efectiva de cualquier fluido (aceite, gas o agua) a la permeabilidad absoluta ( $K_{rf} = K_{ef} / K$ ), se expresa en fracción pues nunca es mayor a uno. Esta permeabilidad expresa la facilidad de flujo de un fluido a través de la roca, en presencia de otros fluidos comparado con la facilidad que se tendría si únicamente fluyera un fluido.

#### **2.4. Factores que afectan la permeabilidad**

Existen diversos factores que afectan la permeabilidad de la roca o medio poroso y la mayoría están relacionados con la porosidad efectiva, por lo tanto, la permeabilidad es afectada de la misma forma que la porosidad efectiva. A continuación se mencionan dichos factores:

##### **2.4.1. Cementación**

Reduce la porosidad al depositarse el material cementante entre los poros, lo que puede reducir la porosidad inicial de un 20 hasta un 40% final.

##### **2.4.2. Re-cristalización**

Este fenómeno puede disminuir grandemente la porosidad existente debido a que convierte la roca en un agregado denso de cristales entrelazados.

### **2.4.3. Granulación y molimiento**

Esté efecto se presenta en los granos de la roca conforme aumenta la profundidad, disminuye o inclusive elimina la porosidad debido a la presión de sobrecarga.

### **2.4.4. Fracturamiento**

Estas contribuyen a aumentar la porosidad en ciertas formaciones más o menos compactadas.

### **2.4.5. Arreglo o empaquetamiento**

La porosidad variará dependiendo del tipo de empaquetamiento de los granos que la roca posea.

### **2.4.6. Distribución, tamaño y forma del grano**

Afectará la porosidad dependiendo de la uniformidad de los granos, así como la distribución de estos.

### **2.4.7. Contaminación microbiológica**

La red poral es afectada, sí en está, se produce crecimiento microbiológico de bacterias dando lugar al decremento de la porosidad efectiva. Las condiciones necesarias para que se reproduzca una bacteria son: un medio acuoso que provea humedad y una temperatura entre 5 a 65 °C.

## **2.5. Medición de la permeabilidad**

Existen cuatro categorías para medir la permeabilidad en una sola fase y se dividen en función al tipo de fluido empleado, gas o líquido, y al tipo de régimen, estacionario o transitorio. En éste caso el fluido empleado fue un líquido y el régimen de flujo fue en estado estacionario, las tabla 2.1 y 2.2 sirven de guía rápida para seleccionar el tipo de medición de acuerdo a las necesidades. La tabla 2.3 presenta las ventajas y desventajas debidas al tipo de fluido seleccionado.

La permeabilidad de un medio poroso incluso puede ser inferida por correlaciones empíricas usando mediciones indirectas, tal como la distribución granular de poros y el tamaño de grano del poro (Kozeny, 1927; Carman, 1937), así como, la medición de la garganta de poro y su distribución del tamaño de poro por inyección de mercurio o midiendo la presión capilar (Swannson, 1981; Katz and Thompson, 1986); por conductividad eléctrica efectiva (Archie, 1942; Ondracek, 1986); transmisión de ondas acústicas (Biot, 1957); electrocinética EMF (Moran and Papaconstantinou, 1981); etc. Estos métodos son menos exactos y frecuentemente consumen mayor tiempo que hacer la medición directa.

Tabla 2.1. Medición de la permeabilidad empleando líquidos.

| Tipo de medición  | Permeabilidad Rango, md | Aparato o aplicación   | Ventajas  | Desventajas  |
|---|-------------------------|--|---|--|
| Flujo axial, estado estacionario en tapones de núcleos                      | 1000-40,000             | Flujo gravitatorio del líquido a través del medio poroso, tapones cilíndricos. | Simple, equipo de bajo costo (requiere balanza electrónica para determinar el flujo)  | Baja presión, difícil asegurar la presencia de gas en el tapón   |
| Flujo axial, estado estacionario en tapones de núcleos                      | 0.1-20,000              | Equipo con sensores electrónicos, alta presión.                                | Puede ser automatizado, puede alcanzar el esfuerzo del yacimiento, permeabilidad representativa del yacimiento.                 | Resistente a la corrosión, controlado por equipo de bombeo de alta presión (equipo costoso).                                 |
| Flujo axial, variación de flujo en tapones de núcleos                       | 0.00001-0.1             | Equipo de alta presión para permeabilidades bajas .                            | Método único para permeabilidades ultra bajas, no requiere flujómetros está es calculada a partir de la $\Delta p$ y el tiempo. | Muy costoso, requiere alta presión, sistemas anti fugas con transductores y sistema de adquisición de datos de alta calidad. |
| Permeabilidad transversal, estado estacionario, núcleo de diámetro completo | 0.005-500               | Permeabilidad direccional en el núcleo para $K_{max}$ y $K_{90}$ .             | Puede medir la permeabilidad horizontal en varias direcciones, promedio obtenido usando núcleo completo.                        | Limpieza y preparación del núcleo costosa, el efecto de Klinkenberg es medido una sola vez                                   |
| Permeabilidad radial, estado estacionario, núcleo de diámetro completo      | 0.002-250               | Permeabilidad promedio en todas las direcciones radiales.                      | Mide la permeabilidad horizontal  | Preparación de la muestra difícil, cero esfuerzos radiales.  |

Tabla 2.2. Medición de la permeabilidad empleando gases.

| Tipo de medición  | Permeabilidad Rango, md | Aparato o aplicación   | Ventajas  | Desventajas  |
|---|-------------------------|--|---|--|
| Flujo axial, estado estacionario en taponos de núcleos                      | 0.1-10,000              | Equipo de baja presión con manómetros y flujómetros.   | Costo de inversión bajo, sistema manual simple, base de datos extensa para comparación.                               | Labor intensa, Costos operacionales altos, esfuerzos permisibles bajos, no hay corrección para el efecto de Klinkenberg. |
| Flujo axial, estado estacionario en núcleos                                 | 0.1- 10,000             | Equipo con sensores electrónicos, alta presión.  | Puede ser automatizado, puede alcanzar el esfuerzo del yacimiento, mejor precisión y exactitud que el sistema manual. | Mediciones múltiples para corregir el efecto de Klinkenberg, la resistencia inercial debe ser despreciable.              |
| Flujo axial, reducción de presión en taponos de núcleos                     | 0.001-30,000            | Rango amplio, medición de esfuerzos de medianos a altos, corrección de Klinkenberg e inercial. | Sistema automática, no se requieren flujómetros.  | Costo de inversión elevado para el sistema autónomo, los transductores presión y la adquisición de datos.                |
| Flujo axial por variación de pulso en taponos de núcleos                    | 0.00001-0.1             | Equipo de alta presión para permeabilidades es bajas.  | Método único para permeabilidades ultra bajas, la porosidad también puede medirse.                                    | Requiere alta presión, sistemas anti fugas con transductores y sistema de adquisición de datos de alta calidad.          |
| Permeabilidad, estado estacionario, núcleos de diámetro completo            | 1 – 10,000              | Alta densidad, medición de núcleos heterogéneos.   | No se requiere preparar el núcleo, relativamente rápido, puede ser manual o autónomo.                                 | Cero esfuerzos, no hay corrección para el efecto de Klinkenberg, alta resistencia inercial.                              |
| Permeabilidad, reducción de presión en núcleos de diámetro completo         | 0.001-30,000            | Alta densidad, medición de núcleos heterogéneos  | No se requiere preparar el núcleo, muy rápido, puede ser manual o autónomo, corrección de Klinkenberg e inercial.     | Cero esfuerzos cuando la permeabilidad es alta, inversión elevado para el sistema autónomo                               |
| Permeabilidad transversal, estado estacionario, núcleo de diámetro completo | 0.02-500                | Permeabilidad direccional en el núcleo para $K_{max}$ y $K_{90}$ .                             | Puede medir la permeabilidad horizontal en varias direcciones, promedio obtenido usando núcleo completo.              | Limpieza y preparación del núcleo costosa, el efecto de Klinkenberg es medido una sola vez                               |
| Permeabilidad radial, estado estacionario, núcleo de diámetro completo      | 0.01-250                | Permeabilidad promedio en todas las direcciones radiales.                                      | Mide la permeabilidad horizontal  | Preparación de la muestra difícil, cero esfuerzos radiales.  |

Tabla 2.3. Ventajas y desventajas al emplear líquidos o gases.

| <b>Principales Ventajas de usar líquidos</b>                | <b>Principales desventajas de usar líquidos</b>  |
|---|--|
| La permeabilidad es más representativa.                     | La roca opone mayor resistencia al flujo.  |
| No se presenta el efecto de Klinkenberg.                    | Después de la medición requiere de la operación de limpieza                              |
|   | Puede existir crecimiento microbiológico de bacterias dentro de los poros.               |
|   |  |
|   |  |
| <b>Principales Ventajas de usar gas</b>                     | <b>Principales desventajas de usar gas</b>   |
| No requiere técnicas de saturación especiales               | Requiere corrección por el efecto de Klinkenberg, especialmente a bajas permeabilidades. |
| No es reactivo con la roca ni corrosivo                     | Opone resistencia inercial a alta velocidad y permeabilidad.                             |
| No requiere la operación de limpieza después de la medición | La permeabilidad es menos representativa.  |
| Nulo crecimiento microbiológico de bacterias.               |  |
| La movilidad del gas a través de la roca es muy alta.       |  |

**2.6. Partes que componen el equipo de desplazamiento de fluidos (EDF)**

Para describir cada parte es necesario conocer el diagrama de operación del EDF, el cual se presenta en la Figura. 2.3., así como las partes que conforman la celda hidrostática (Figura. 2.4.), la cual es la parte principal del EDF.

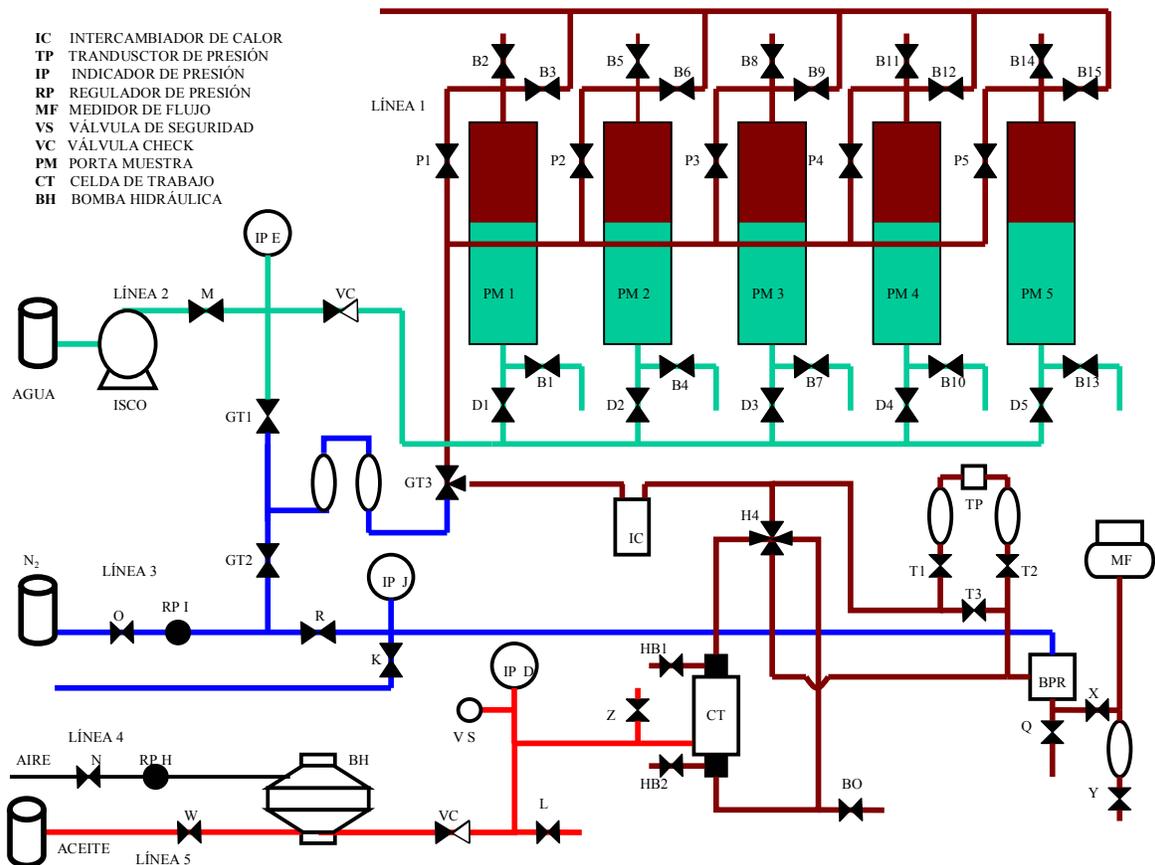


Figura. 2.3. Diagrama de flujo del EDF.

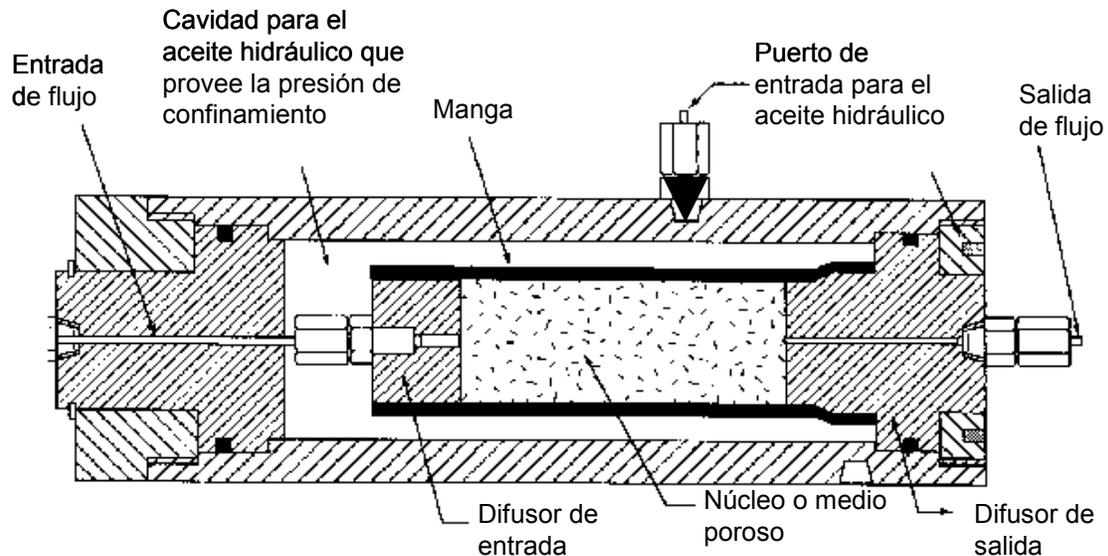


Figura. 2.4. Partes que componen la celda hidrostática

El equipo está integrado por los siguientes sistemas:

### 2.6.1. Celda hidrostática

En este sistema se reproducen las condiciones operacionales de temperatura y presión de confinamiento del yacimiento petrolero y a las cuales está sometido el medio poroso de estudio.

### 2.6.2. Módulo de presión de confinamiento

La presión de confinamiento son los esfuerzos que se generan en el yacimiento debido al peso que ejercen los estratos o capas de roca superiores al yacimiento, por lo tanto este módulo suministra la presión de confinamiento, del yacimiento a estudiar, sobre el medio poroso; roca que puede ser extraído del mismo yacimiento o que puede ser fabricado de manera sintética.

### 2.6.3. Módulo de presión de desplazamiento axial

Una vez que el yacimiento se encuentra en producción, el fluido que fluye, en una condición óptima a través de la roca, es el crudo o petróleo, de forma análoga el módulo de presión provee movilidad al fluido de estudio, el cual circulará a lo largo del medio poroso a gasto constante.

#### **2.6.4. Módulo térmico**

Esté módulo provee la temperatura al medio poroso en estudio similar a la que se encuentra en el yacimiento, a través de un serpentín integrado a la celda hidrostática.

#### **2.6.5. Módulo de adquisición de datos**

En esté módulo se reciben todas las señales que emiten los dispositivos de control del EDF, como transductores de presión, termopares, sensores de flujo, etc., para almacenar en tiempo real toda la información que se genera durante el desarrollo de la prueba experimental.

#### **2.6.6. Celdas de almacenamiento**

En un yacimiento la naturaleza de los fluidos varía de estado gaseoso a líquido coexistiendo dentro del espacio confinado tanto gas, aceite y agua, para reproducir las condiciones a las cuales se encuentra el yacimiento, el equipo cuenta con celdas independientes que pueden albergar diferentes tipos de fluidos.

#### **2.6.7. Red de tuberías y accesorios**

En está clasificación entran todas las partes menores, por decirlo así, pero igualmente importantes, que componen el EDF como: red de tuberías, bombas, válvulas, sensores, etc., y que sirven de enlace entre los módulos que conforman el EDF.

### **2.7. Principio de operación del EDF**

El principio de operación del EDF está basado en la ley de Darcy y partiendo de la expresión matemática que la describe, ecuación 2.2, se observa que los únicos parámetros que tienen que ser cuantificados y controlados por el equipo son el gasto y la caída de presión, ya que el área y longitud son dependientes del medio poroso y la viscosidad depende del fluido y de su temperatura.

El gasto se manipula y mide directamente de la bomba que lo suministra o se puede medir al final del sistema, en cuanto a la caída de presión, es registrada por los transductores de presión que se encuentran ubicados a la entrada y salida de la celda hidrostática, lo que hace que la operación del equipo sea muy sencilla para el operario. El resto de las partes componentes del EDF permiten reproducir el estado de esfuerzos al cual está sometido el medio poroso en el yacimiento, como es la presión de confinamiento y temperatura del mismo.

### 3.1. Comportamiento de flujo de fluidos debido al difusor

El estudio del comportamiento de flujo del fluido dentro de un sistema es complejo, ya que, un sistema real puede presentar simultáneamente los dos tipos de flujos ideales: el flujo pistón y el de mezcla completa.

El flujo pistón se caracteriza por el comportamiento ordenado del fluido, sin que ningún elemento del mismo sobrepase o se mezcle con cualquier otro elemento situado antes o después; en realidad, en este tipo de flujo puede haber mezcla lateral de fluido, pero nunca debe existir mezcla o difusión a lo largo de la trayectoria del flujo. La condición necesaria y suficiente para que exista flujo pistón es que el tiempo de residencia en el sistema debe ser el mismo para todos los elementos del fluido. El valor de la dispersión axial del tiempo promedio de los elementos contenidos en el sistema que presentan un flujo pistón, es muy pequeño, mientras que en el caso de un flujo 100 % pistón (Himmelblau, 1968), (Levenspiel, 1967) el valor llega a ser cero (Figura 3.1).

El flujo de mezcla completa, se presenta cuando dentro del sistema existe un mecanismo de agitación, y su composición en cada instante es la misma en todos los puntos del sistema. Por lo tanto, la corriente de salida tiene la misma composición que la del flujo contenido en el mismo. El valor de la dispersión axial del tiempo promedio de los elementos contenidos en el sistema cuando presenta un flujo de mezcla completa, es muy grande. En un flujo 100% de mezcla completa, el valor de la dispersión axial tiende al infinito (Levenspiel, 1967) (Figura 3.1).

El comportamiento de flujo desarrollado en el EDF es del tipo flujo pistón, ya que no existe ningún sistema de agitación en el EDF que pudiera generar el flujo en mezcla completa.

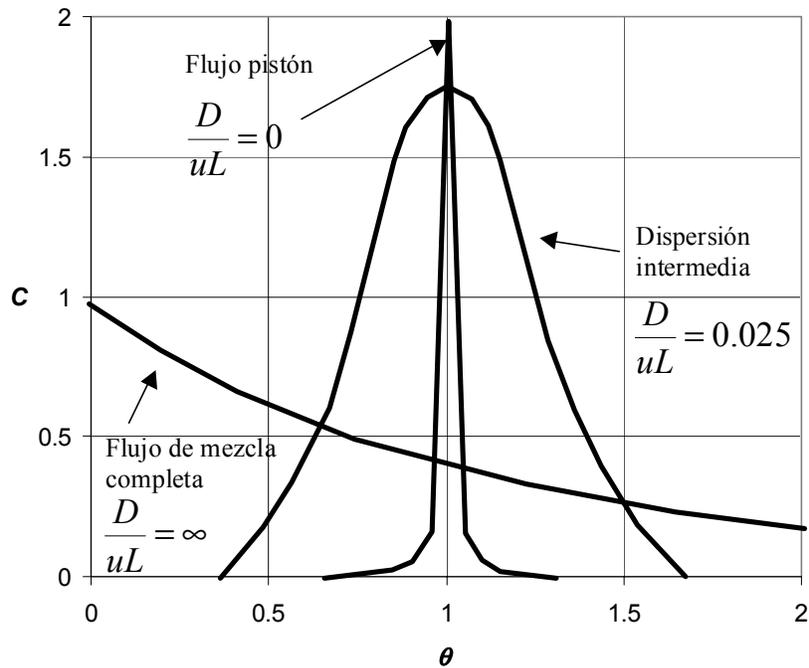


Figura 3.1. Curvas de distribución de tiempos de residencia (DTR) del comportamiento de flujos ideales.

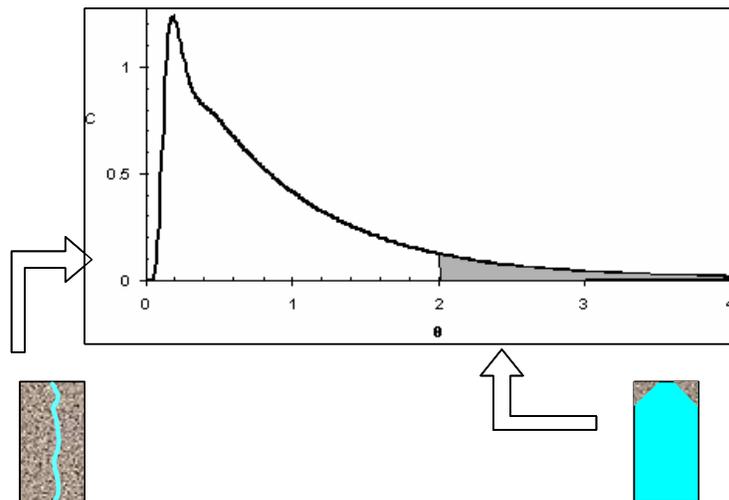
Las desviaciones con respecto al flujo ideal cuando el flujo se comporta tipo pistón dentro del sistema, es el siguiente, los elementos del fluido pueden moverse a través del sistema a diferentes velocidades causando canalizaciones y “zonas muertas”. Para que ocurra este comportamiento, los elementos del fluido no deben mezclarse por completo localmente, sino que tienen que permanecer segregados, cuando menos en forma parcial, a medida que se mueven en el sistema.

La influencia del flujo no ideal perturba indirectamente el cálculo de la permeabilidad ya que tanto un efecto de canalización como de zonas muertas inducido por el difusor afecta directamente una de las premisas de la ley de Darcy, en la cual se basa el principio de operación del EDF, viéndose perturbado el

régimen estacionario sobre el medio poroso, con lo cual el parámetro de permeabilidad no sería representativo de la muestra de estudio.

Para caracterizar el comportamiento del flujo no ideal que se presenta en el medio poroso es necesario usar la técnica DTR (Distribución de tiempo de residencia). Esta técnica permite predecir el comportamiento de los fluidos en el interior del medio de estudio, es una técnica sencilla y económica. En la figura 3.2, se muestran los principales tipos de flujo no ideal (curva DTR, concentración vs tiempo), que pueden presentarse en el medio poroso debido a un flujo pistón y el efecto sobre la curva de distribución de tiempos de residencia si el diseño del difusor no es el apropiado.

En las canalizaciones de flujo o circuitos cortos no se emplearía el volumen completo del medio poroso ha estudiar y la saturación del 100% que debe de tener el medio poroso por el fluido no se cumpliría, lo mismo sucedería si se presentaran zonas muertas, por tanto un buen comportamiento de flujo será aquel donde el porcentaje de volumen muerto sea menor.



a) Canalizaciones de flujo o circuitos cortos      b) Volumen muerto o zonas de estancamiento

Figura 3.2. Tipos de flujo no ideal que pueden presentarse debido a un flujo pistón y el efecto sobre la curva DTR.

En el análisis de comportamiento de flujo de fluidos dentro de un sistema, es muy difícil saber exactamente lo que sucede en su interior, es decir, no se tiene una representación completa de los perfiles de velocidad. Aunque esta información resultaría muy importante en el diseño, es suficiente con saber cuánto tiempo permanece cada una de las moléculas en el sistema, o exactamente la distribución del tiempo de residencia (DTR) de la corriente del fluido.

Esta información puede determinarse de manera fácil y directa por un método de investigación empleado ampliamente: el método experimental estímulo – respuesta (Levenspiel, 1967). En este caso, el estímulo es una inyección de trazador en el fluido que entra al sistema, la respuesta es una representación del trazador a la salida del sistema con respecto al tiempo. El análisis estadístico de la gráfica de la respuesta indicará el porcentaje de los diferentes tipos de flujo que se presentan en el sistema, a esta gráfica se le conoce como curva de distribución de tiempo de residencia (Levenspiel, 1967; Johnstone and Thring, 1957).

Puede emplearse como trazador cualquier sustancia que se pueda detectar y que no perturbe el flujo en el sistema, la señal de entrada es un impulso. El trazador, debe reunir las siguientes características (Levenspiel, 1967).

- Su comportamiento en flujo y mezclado debe ser igual a cualquier otro elemento del fluido (misma densidad, soluble en todas las proporciones, etc.)
- Cuantitativamente debe conservarse, es decir, que no desaparezca por reacción o adsorción.
- Fácil de analizar, inerte y no tóxico.
- La magnitud de la respuesta a la salida debe ser proporcional a la cantidad de trazador en la entrada.
- No debe de modificar el comportamiento del fluido.
- Inyectar y detectar dentro de una zona con fuerte turbulencia, para garantizar un buen mezclado.

**3.2. Selección del trazador**

Tomando como base los criterios descritos anteriormente, las limitantes en cuanto a equipo para detectar el trazador y la disponibilidad en existencia de materia prima que pueda fungir como trazador, el compuesto seleccionado fue sulfato de cobre pentahidratado ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).

Descripción: Cristales azules, solubles en agua y metanol; ligeramente soluble en alcohol y glicerina, cuyas especificaciones y usos se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Especificaciones técnicas del trazador

| <b>PROPIEDAD</b>   | <b>ESPECIFICACION</b> |
|--|-----------------------|
| Pureza ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), %  | 98,0% mín.            |
| Cobre (como Cu), %   | 25% mín.              |
| Acidez libre (como $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), %  | 0,1% máx.             |
| Material insoluble en agua, %  | 0,1% máx.             |
| Fe   | 0,1% máx.             |
| Pb   | 0,01% máx.            |
| pH (Sol. al 10%)   | 4 máx.                |
| <b>USOS</b>  |                       |
| Usado en tratamiento de aguas como algicida, fabricación de concentrados para animales, abonos, pesticidas, mordientes textiles, industria del cuero, pigmentos, baterías eléctricas, recubrimiento de galvanizados, sales de cobre, medicina, preservativos de la madera, procesos de grabado y litografía, flotación de menas, industria del petróleo, caucho sintético, industria del acero, tratamiento del asfalto natural. |                       |

**3.3. Técnica empleada para el análisis de las curvas DTR**

La técnica empleada para el análisis de las curvas DTR es una adaptación de los diferentes métodos que existen en la literatura para caracterizar el comportamiento de flujo, es decir: el tiempo promedio usado para el análisis de las curvas DTR, es el tiempo promedio calculado, según la propuesta hecha por Himmelblau, 1968. El tiempo adimensional, la concentración adimensional y el factor de dispersión, se calcula de acuerdo con las ecuaciones propuestas por Levenspiel, 1967. Los diferentes tipos de flujos: pistón, de mezclado y muerto, están calculados de acuerdo a la propuesta hecha por Sahai and Toshihiko, 1996. Esta metodología reproduce satisfactoriamente los resultados que se observan en la experimentación.

## 1.- Cálculo del tiempo promedio de residencia (TPR).

Esta es la medida más importante cuando se caracteriza una distribución de tiempo de residencia en el sistema, también se le denomina media o centroide de la distribución. Un buen diseño de difusor, será aquel en donde la dispersión axial sea cercana a cero, es decir el flujo tienda a flujo pistón (Turkdogan, 1968) porque el fluido se desplaza sobre toda la sección transversal del medio poroso.

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} t c dt}{\int_0^{\infty} c dt} \quad (3.1)$$

Sí la curva de distribución solo se conoce para un número de valores discretos del tiempo,  $t_i$  entonces:

$$\bar{t} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} \quad 3.2$$

2.- Cálculo de la amplitud de la distribución de tiempo de residencia.

Después del tiempo promedio de residencia, la siguiente magnitud descriptiva, en orden de importancia, es la amplitud de la distribución de tiempo de residencia que se mide por la varianza  $\sigma_{\theta}^2$  que se define por la ecuación 3.4.

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} t^2 c dt}{\int_0^{\infty} c dt} - \bar{t}^2 \quad 3.3$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma^2}{\bar{t}^2} \quad 3.4$$

Y para valores discretos toma la forma:

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - \bar{t}^2 \quad 3.5$$

3.- Cálculo del número de dispersión  $\left(\frac{D}{uL}\right)$ , (Levenspiel, 1967).

El grupo adimensional  $\left(\frac{D}{uL}\right)$  es conocido como módulo de dispersión del difusor, esté parámetro mide el grado de dispersión axial de la velocidad en el sistema y se calcula de la siguiente manera.

$$\sigma_{\theta}^2 = 2\left(\frac{D}{uL}\right) - 2\left(\frac{D}{uL}\right)^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{uL}{D}\right)\right] \quad 3.6$$

Cuando la dispersión es pequeña, la expresión 3.6 toma la forma:

$$\sigma_{\theta}^2 = 2 \left( \frac{D}{uL} \right) \quad 3.6a$$

$$\left( \frac{D}{uL} \right) \rightarrow 0 \quad \text{Se tiende a flujo pistón}$$

$$\left( \frac{D}{uL} \right) \rightarrow \infty \quad \text{Se tiende a mezcla completa}$$

En la figura 3.1, se muestran gráficamente los valores del módulo de dispersión de acuerdo a la forma de la curva DTR.

4.- Cálculo del tiempo adimensional ( $\theta$ ), (Himmelblau, 1968).

Para el estudio de los distintos modelos es conveniente medir el tiempo en función del tiempo promedio de residencia calculado, dando una medida adimensional:

$$\theta_i = \frac{t_i}{\bar{t}} \quad 3.7$$

El subíndice  $i$  se refiere a que esté tratamiento se le debe aplicar a todos los datos registrados en el experimento.

5.- Cálculo de la concentración adimensional ( $C$ ), (Levenspiel, 1967).

Se denomina curva C o curva DTR a la respuesta normalizada del trazador en la corriente de salida con respecto al tiempo adimensional.

La normalización se lleva a cabo dividiendo la concentración entre el área ( $A$ ) bajo la curva concentración - tiempo (cantidad de trazador que sale del sistema de análisis).

$$A = \int_0^{\infty} c \, d\theta \quad 3.8$$

$$\int_0^{\infty} C \, d\theta = 1 \quad 3.9$$

$$\int_0^{\infty} \frac{c}{A} \, d\theta = 1 \quad 3.10$$

$$C_i = \frac{c_i}{A} \quad 3.11$$

La curva  $C$  representa la concentración del trazador a la salida en función al tiempo, por consiguiente es un indicativo del tiempo en que tardan en salir del sistema (edad).

El subíndice  $i$  se refiere a que este tratamiento se le debe aplicar a todos los datos registrados en el experimento.

6.- Cálculo del volumen muerto ( $V_d$ ), (Sahai and Toshihiko, 1996).

Condiciones necesarias para llevar a cabo el análisis del tipo de flujo que se presenta en el sistema (Ecuaciones 3.12 y 3.13).

$$\int_0^{\infty} C \, d\theta = 1 \quad 3.12$$

$$\bar{\theta} = \frac{\int_0^{\infty} C \theta d\theta}{\int_0^{\infty} C d\theta} = 1 \quad 3.13$$

Tiempo promedio de residencia de la curva comprendida entre  $\theta = 0$  y  $\theta = 2$  (sin considerar el área bajo la curva debido al volumen muerto).

$$\bar{\theta}_c = \frac{\int_0^2 C \theta d\theta}{\int_0^2 C d\theta} \quad 3.14$$

Área bajo la curva desde  $\theta = 0$  hasta  $\theta = 2$ .

$$\frac{Q_a}{Q} = \int_0^2 C d\theta \quad 3.15$$

De las ecuaciones 3.13 y 3.14, el volumen muerto está dado por:

$$\frac{V_d}{V} = 1 - \frac{Q_a}{Q} \bar{\theta}_c \quad 3.16$$

Donde 1, es el área total de la curva, de acuerdo a la ecuación 3.8

La ecuación 3.15 cuantifica la cantidad de colorante con respecto a la unidad (área total de la curva), que permanece en el sistema por un tiempo mayor de dos veces el tiempo adimensional.

7.- Cálculo del volumen pistón ( $V_p$ ), (Sahai and Toshihiko, 1996).

$$\int_0^{\frac{V_p}{V}} C d\theta = 0.01 \quad 3.17$$

Se considera cuando el 1 % del total de colorante inyectado ha salido del sistema.

8.- Cálculo del volumen de mezclado ( $V_m$ ), (Sahai and Toshihiko, 1996).

$$\frac{V_m}{V} = 1 - \frac{V_p}{V} - \frac{V_d}{V} \quad 3.18$$

Con este procedimiento se hace el análisis de los diferentes tipos de volúmenes que se presentan en el medio poroso promovido por el difusor.

A partir de la curva adimensional obtenida se puede obtener otra característica que sirve para evaluar el funcionamiento del difusor, esta característica es la máxima concentración (MC). La máxima concentración es el punto más alto de la curva DTR y está asociado al flujo pistón. Cuando el comportamiento del difusor tiende al volumen pistón, el trazador dentro del sistema viaja en forma de paquetes, por esto, entre más grande sea el valor de la máxima concentración, el funcionamiento del difusor, tiende al volumen pistón. Al tiempo en donde se presenta la máxima concentración, se le conoce como TMC.

## 4.1. Diseño experimental

### 4.1.1. Introducción

En esta etapa se planeará la secuencia completa de pasos a seguir durante el diseño experimental asegurando que la información obtenida concerniente al problema sea apropiada, de modo que, permita un análisis objetivo que conduzca a deducciones válidas con respecto al problema establecido y el primer paso es definir los objetivos que deberá cubrir la experimentación.

### 4.2. Objetivos del diseño experimental

- Proporcionar la máxima cantidad de información pertinente al problema bajo investigación.
- El diseño, plan o programa debe ser tan simple como sea posible.
- La investigación debe efectuarse lo más eficientemente posible.

Para establecer el diseño experimental seguiremos el proceso de razonamiento que se muestra a continuación.

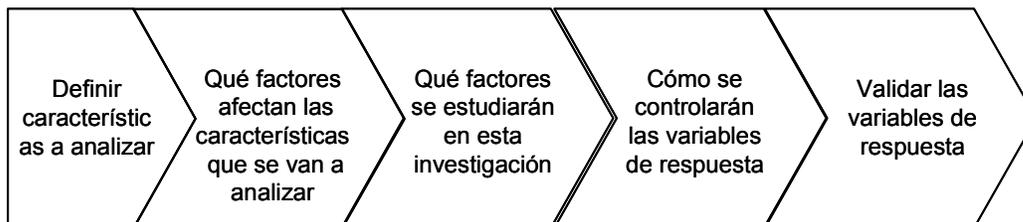


Figura 4.1. Diagrama de razonamiento para definir el programa experimental.

### 4.3. Características a analizar

En el capítulo anterior se planteó que la problemática estará centrada en el principio de la Ley de Darcy, la cual tiene por objeto medir la permeabilidad, siendo esta la variable de respuesta a monitorear a condiciones de régimen estacionario en el EDF, así mismo, la técnica que se empleará para caracterizar el comportamiento de flujo del fluido es la de distribución de tiempos de residencia

(DTR) y las variables de respuesta serán el volumen muerto, volumen pistón y volumen de mezclado.

#### **4.3.1. Factores que afectan la permeabilidad**

Los factores que pueden afectar la permeabilidad fueron tratados en el capítulo 2 y se pueden clasificar en dos grupos: aquellos que dependen de la naturaleza del material y aquellos que dependen de factores externos pero que pueden ser controlados, dentro del primer grupo se encuentran la granulación y molimiento, arreglo y empaquetamiento, distribución, tamaño y forma del grano y en el segundo grupo está la cementación, re-cristalización, fracturamiento y contaminación microbiológica.

#### **4.3.2. Factores que afectan el volumen muerto, pistón y de mezclado**

#### **4.3.3. Inyección del trazador**

El estímulo o inyección de trazador dentro del sistema no afecta los valores de volumen muerto, pistón ni de mezclado, pero se requiere que estos valores sean representativos al régimen de flujo correspondiente una vez alcanzada la permeabilidad del medio poroso en estudio; recordando que en este caso de estudio la permeabilidad se medirá en régimen estacionario, es decir, el gasto y la presión permanecerán constantes, una vez alcanzada la permeabilidad del medio poroso en estudio, por lo tanto para no afectar el comportamiento de flujo al inyectar el trazador dentro del sistema deberá seguirse el procedimiento de inyección de trazador descrito en el anexo 3.

El trazador inyectado no afecta la permeabilidad de la roca, ya que es inerte al medio poroso y es soluble en agua bidestilada.

#### **4.3.4. Que factores se tomarán en cuenta**

Se tomarán en cuenta únicamente aquellos factores que no dependan de la naturaleza de la roca. Con base en lo anterior, los factores a tomar en cuenta para

no afectar la permeabilidad de la roca y que caen en esta categoría son: Cementación, re-cristalización, fracturamiento y contaminación microbiológica. La operación de cementación no estará contemplada en este trabajo, por lo que los únicos factores posibles que pudieran afectar el diseño experimental serían los de re-cristalización, fracturamiento y contaminación microbiológica.

#### **4.3.5. Plan a seguir para controlar los factores que afectan las características a analizar**

##### **4.3.5.1. Re-cristalización**

El efecto de re-cristalización puede presentarse debido al trazador empleado, el cual es una mezcla compuesta de agua y sulfato de cobre prehidratado  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , que al estar a temperatura ambiente y permanecer en reposo, la mezcla empieza a separarse y el  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  se precipita en forma de cristales.

Para evitar la formación de cristales dentro del núcleo la mezcla permanecerá en movimiento constante, pero además se aplicará el procedimiento de limpieza de núcleos descrito en las prácticas recomendadas para análisis de núcleos (API RP-40 Recommended Practices for Core Analysis API/PETRO RP 40-ENGL 1778), el cual es descrito dentro del Anexo A, con lo cual se eliminará cualquier cristal que pueda formarse en el interior del medio poroso. El solvente a emplear es tolueno, con un punto de ebullición de 110 °C.

##### **4.3.5.2. Fracturamiento**

El esfuerzo permisible de la arena Berea es de  $0.28 \text{ MPa m}^{1/2}$  equivalente a 40.6 psi.  $\text{m}^{1/2}$  (estudio realizado por Zoback, 1978, bajo el método de fracturamiento hidráulico), a través de estudios experimentales (Perkins and Krech, 1966) determinaron que el esfuerzo permisible incrementa al aplicarle una presión de confinamiento, para el caso de las areniscas de Tennessee al ser aplicada una presión de confinamiento de 2000 psi., la resistencia al esfuerzo es de 401.7 psi., este valor será el límite de resistencia al esfuerzo en función a la presión de

confinamiento que no deberá rebasarse, ya que se podría inducir la fractura del medio poroso.

#### **4.3.5.3 Contaminación microbiológica**

Como se menciona en el capítulo 3, las condiciones necesarias para que una bacteria se reproduzca son un ambiente húmedo y una temperatura entre 5 y 65°C, por lo que existe la posibilidad de crecimiento de bacterias dentro de la red poral del medio poroso y con ello el detrimento de la porosidad efectiva, por lo tanto, la acción a seguir para evitar el crecimiento de bacterias será someter el medio poroso en estudio a un gradiente de temperatura por encima de 70 °C con un tiempo de exposición de 30 min. Aunado a ello el sulfato de cobre es usado en el tratamiento de aguas como algicida y para elaborar pesticidas por lo cual actuará también como mecanismo inhibidor de bacterias.

#### **4.3.5.4. Inyección del trazador**

Para poder inyectar el trazador dentro del sistema primero debe determinarse la permeabilidad del medio poroso en estudio bajo un régimen estacionario, y de acuerdo al principio de operación del EDF los mensurados que registra el equipo para determinar la permeabilidad de un medio poroso son el gasto y la caída de presión, el gasto es constante y la caída de presión será aquella desarrollada en el instante en que el fluido vence la resistencia que opone el medio poroso al paso del fluido a través de su red poral efectiva, por lo tanto la presión de inyección del trazador deberá ser igual o mayor que la desarrollada al alcanzar la permeabilidad en ese instante por lo que podemos establecer la siguiente relación de presión de inyección de trazador como:

$$P_{SISTEMA} + 500 \text{ lbs} = P_{iny-trazador}$$

Se estableció un factor de seguridad de 500 lbs. al momento de la inyección con el fin de que los valores de volumen muerto, pistón y de mezclado sean representativos al instante de alcanzar la permeabilidad del medio poroso.

#### **4.4. Validación experimental**

La validación del estudio experimental fue a través de un análisis de veracidad y precisión, de acuerdo a ISO 5725 *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results* (parte 1 a 6). Los resultados y análisis obtenidos de la validación se presentan en el anexo 4.

#### **4.5. Programa experimental**

Para diseñar el programa experimental, se tomarán en cuenta las premisas establecidas por la ley de Darcy, las especificadas por la técnica estímulo respuesta, así como también los factores que afectan el desarrollo experimental encontrados durante el proceso de razonamiento desarrollado en esta sección como son la recristalización, fracturamiento y contaminación microbiológica.

El programa de desarrollo experimental generalizado engloba diferentes procedimientos, mismos que se describen al final de este trabajo en la sección de anexos, y es representado por el diagrama de bloques mostrado en la Figura. 4.2.

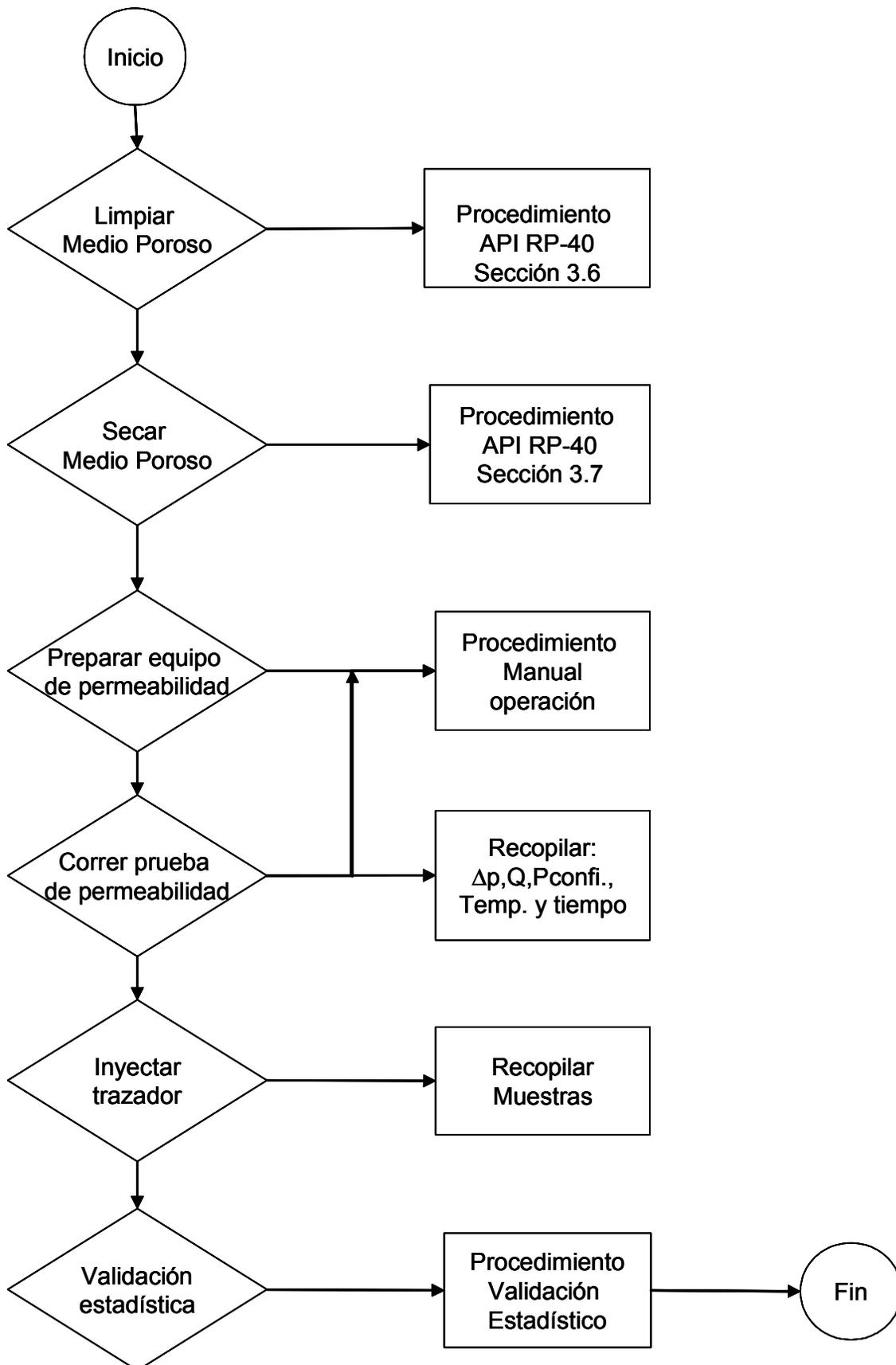


Figura. 4.2. Diagrama del programa experimental planteado.

## 4.6. Esquema de trabajo

Tabla 4.2. Descripción de hipótesis por sistema, descripción de sistemas y condiciones operacionales por corrida.

| <b>Hipótesis</b>    |                           |                           |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|
| <b>Medio poroso</b> | <b>Fluido</b>             | <b>Trazador</b>           |
| Isotrópico          | Comportamiento Newtoniano | Comportamiento Newtoniano |
| Homogéneo           | Incompresible             | Incompresible             |
| Inerte              | Flujo Laminar             | Inerte                    |
|                     |                           | Soluble en el fluido      |

| <b>Medio poroso</b> |  |  |
|---------------------|--|--|
| Descripción         | Núcleo sintético de Arena berea libre de lutitas |  |
| Diámetro            | 1 pulg.  |  |
| Longitud            | 2 pulg.  |  |

| <b>Fluido</b> |                                 |
|---------------|---------------------------------|
| Descripción   | Agua bidestilada libre de sales |

| <b>Trazador</b>                     |   |  |
|-------------------------------------|---|--|
| Descripción                         | Sulfato de cobre pentahidratado ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) |  |
| Solubilidad en $\text{H}_2\text{O}$ | 99.9 %  |  |

| <b>Corrida para Validación</b>  |      |  |
|---------------------------------|------|--|
| Gasto, [cc/min]                 | 2.5  |  |
| Presión de confinamiento, [psi] | 2000 |  |
| Temperatura, [°C]               | 21   |  |
| No. replicas                    | 10   |  |
| No. repeticiones                | 6    |  |

| <b>Corrida experimental</b>     |      |  |
|---------------------------------|------|--|
| Gasto, [cc/min]                 | 0.5  |  |
| Presión de confinamiento, [psi] | 2000 |  |
| Temperatura, [°C]               | 21   |  |
|                                 |      |  |

## 5.1. Simulación matemática

### 5.1.1. Introducción

En esta parte del trabajo, se utiliza la técnica de dinámica de fluidos computacionales (DFC) para analizar el desempeño de flujo de fluidos que desarrolla el difusor a través de un medio poroso en el EDF a condiciones reales de operación. En estas circunstancias, la simulación matemática es una herramienta muy útil porque reproduce una situación real en donde es posible analizar de manera integral varios aspectos en todo el sistema, tales como: forma del flujo, vectores de velocidades, perfiles de presión, etc. A diferencia de la simulación física en donde es necesario cumplir con ciertos criterios de similitud para apreciar algún fenómeno particular, hoy en día la simulación matemática reproduce casi todos los fenómenos que se presentan en situaciones reales o de laboratorio. La condición necesaria para lograr una buena representación del comportamiento real es que se utilicen la geometría, condiciones en la frontera, modelos matemáticos y métodos numéricos adecuados, probados y ajustados en una situación real. En este caso se obtienen todos estos parámetros reproduciendo el comportamiento del flujo de fluidos obtenidos con la simulación física.

La simulación matemática del desempeño del difusor inicia estableciendo la geometría del sistema, que está compuesto por las siguientes geometrías: difusor a la entrada, medio poroso y difusor a la salida ya que es el espacio físico que ocupa el fluido en el sistema. La segunda parte corresponde al mallado de la geometría en sub-volúmenes utilizando como herramienta el preprocesador conocido como preBFC\*, herramienta gráfica que permite dibujar cualquier forma física en un espacio 2D o tridimensional. Todas las esquinas que forman los sub-volúmenes tienen una posición  $x, y, z$  en el espacio tridimensional. En la tercera parte de este trabajo se definen las condiciones frontera en el espacio tridimensional creado, aquí, es necesario definir la posición de las paredes, velocidad de entrada, superficie libre, salidas, etc. Las diferentes condiciones en la

\*FLUENT y \*preBFC son marcas registradas por Fluent Inc., Lebanon, NH.

frontera reportadas fueron probadas hasta encontrar las adecuadas en términos de reproducibilidad del comportamiento real. También es necesario definir las propiedades del fluido de trabajo (densidad, viscosidad, gasto, etc.), así como también la permeabilidad del medio poroso. FLUENT\* es una herramienta muy importante y básica para llevar a cabo la simulación matemática, en el se encuentran programados diferentes modelos matemáticos y métodos numéricos. La tarea aquí, es conocer cuales son los modelos matemáticos y métodos numéricos que resuelven con mayor eficiencia; en términos de reproducibilidad del fenómeno y rapidez de convergencia, el problema propuesto.

## 5.2. Modelo matemático

En esta parte se hará una breve revisión de la teoría del DFC utilizada en este trabajo.

Los aspectos físicos de cualquier situación que involucre flujo de fluidos están gobernados por las siguientes ecuaciones básicas:

Conservación de masa.

Conservación de momentum.

Conservación de energía.

Conservación de especies.

Una práctica común en el análisis numérico, es transformar estas ecuaciones de conservación de su forma diferencial a ecuaciones algebraicas que se resuelven por técnicas apropiadas para obtener la distribución de los perfiles de flujo. Tal transformación es conocida como la técnica de discretización. Hay varias formas de técnicas disponibles, cada una tiene ventajas y desventajas dependiendo de la naturaleza de los flujos en las que se aplican (Hoffmann and Chiang, 1989)

En este trabajo se usa una técnica basada en un volumen de control (Fluent,

\*FLUENT y \*preBFC son marcas registradas por Fluent Inc., Lebanon, NH.

1999), para convertir las ecuaciones diferenciales que gobiernan la física de flujo de fluido, transferencia de calor y turbulencia en ecuaciones algebraicas que se resuelven numéricamente. Esta técnica consiste en la integración de las ecuaciones diferenciales en cada volumen de control, produciendo una ecuación en un esquema de diferencias finitas que conservan cada cantidad en el volumen de control de estudio.

### 5.3. Ecuaciones fundamentales

El modelo matemático consiste en la solución simultánea de la ecuación de continuidad, transferencia de momentum y transferencia de energía bajo condiciones de flujo turbulento y cuando se estudia el comportamiento del trazador en el sistema, se agrega la ecuación de conservación de especies. Estas ecuaciones se resuelven con las ecuaciones de energía cinética turbulenta y las ecuaciones de velocidad de disipación de la energía cinética turbulenta usando el modelo  $\tilde{k}$ - $\varepsilon$  para flujo turbulento (Launder and Spalding, 1974).

Ecuación de conservación de masa o ecuación de continuidad.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (5.1)$$

Ecuación de conservación de momentum.

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \mu_{eff} \left[ \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \quad (5.2)$$

El último término corresponde a las fuerzas de flotación.

Ecuación de conservación de especies  $i'$ .

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho m_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i m_i) = \frac{\partial}{\partial x_i}(J_{i,i}) \quad (5.3)$$

$$J_{i,i} = -\rho D_{eff\ i,m} \frac{\partial m_i}{\partial x_i} \quad (5.4)$$

Para la simulación del flujo turbulento, se usó el modelo  $\tilde{k}$ - $\varepsilon$  propuesto por Jones and Launder, 1972. La viscosidad turbulenta se calcula a través de su relación con la energía cinética ( $k$ ) y su velocidad de disipación ( $\varepsilon$ ):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_1 G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5.6)$$

Los términos  $G_k$  y  $G_b$  son la velocidad de producción de energía cinética turbulenta y generación debido a las fuerzas de flotación, respectivamente.

$$G_k = \mu_t \left[ \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (5.7)$$

$$G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho \sigma_h} \frac{\partial(\rho)}{\partial x_i} \quad (5.8)$$

La viscosidad turbulenta se obtiene asumiendo que es proporcional al producto de una escala de velocidad turbulenta y a una escala de longitud, y está dada por:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5.9)$$

La viscosidad efectiva del fluido bajo un régimen turbulento está dada por:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (5.10)$$

Los valores para  $C_\mu, C_1, C_2, \sigma_k, \sigma_\varepsilon, \sigma_h$  fueron obtenidos de Launder and Spalding, 1974 y los valores son: 1.44, 1.92, 0.09, 1.0, 1.3, y 0.9, respectivamente.

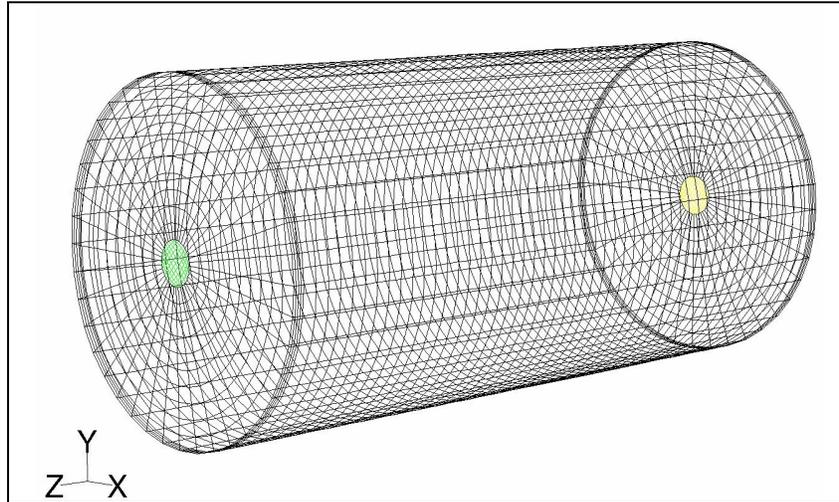


Figura 5.1a. Difusor original: Malla utilizada en la simulación matemática.

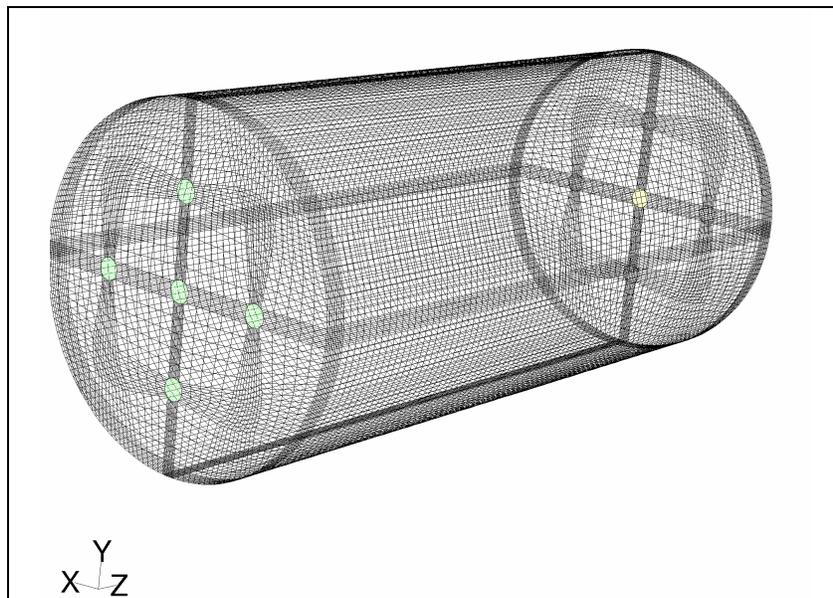


Figura 5.1b. Difusor prototipo: Malla utilizada en la simulación matemática.

#### 5.4. Malla

Se emplea lo que podría llamarse una geometría basada en la malla, en la cual la geometría del modelo se determina por volúmenes de control determinados por la malla. Se emplean coordenadas curvilíneas fijadas en el cuerpo en la cual las líneas de las mallas se determinan por un sistema de coordenadas que conforma la frontera geométrica del modelo.

El procedimiento más común para generar la malla fijada en el cuerpo consiste en los siguientes pasos de procedimientos utilizando el preBFC\*:

Definir la geometría del sistema en términos de puntos (en coordenadas cartesianas), curvas y superficies (en 3D).

Determinar los puntos de la malla sobre las fronteras geométrica del modelo computacional

Determinar la localización de todos los puntos interiores de la malla interpolando los puntos de la frontera de la malla.

La región de estudio (Figura 5.1a y b) fue fraccionado en un total de 1,012,500 nodos, en las zonas de mayor importancia como son la entrada y salidas del difusor, así como el medio poroso, regiones en donde se encuentran localizados los modificadores de flujo, se estableció una malla más fina para observar detalladamente estas zonas de gran interés. En la figura 5.1a y 5.1.b se muestra la distribución de la malla empleada para ambos casos de estudio.

\*FLUENT y \*preBFC son marcas registradas por Fluent Inc., Lebanon, NH.

### 5.5. Condiciones en la frontera

Se establecerán las condiciones de frontera comunes en los casos de estudio.

La velocidad media vertical a la salida del difusor es uniforme a través de su sección transversal y se calcula dividiendo al gasto volumétrico del agua bidestilada entre el área transversal, las otras dos velocidades perpendiculares ( $x,z$ ) se asumen con una velocidad igual a cero. La velocidad media vertical coincide con el eje "y", porque sobre éste eje actúa la atracción debida a la fuerza gravitacional. Las condiciones frontera para la transferencia de momentum de todas las superficies sólidas que incluyen las paredes, el difusor de entrada y salida, así como el medio poroso, fueron consideradas de no – deslizamiento (Barrón, 1997). Esta condición establece que el fluido en contacto con la pared, asume la velocidad de ésta, es decir que no existe deslizamiento entre el fluido y la pared en la interfase.

En todos los análisis que se presentan en esta parte del estudio, incluyendo la reproducción de las curvas DTR, no se incluye la ecuación de la energía, ya que la experimentación se llevo a cabo bajo condiciones isotérmicas.

Las propiedades del fluido de estudio (agua bidestilada) empleadas en la simulación matemática se muestran en la tabla 5.1 respectivamente.

Tabla 5.1. Propiedades del agua bidestilada utilizados en la simulación matemática.

| Propiedad                    | Valor       |
|------------------------------|-------------|
| Viscosidad, cp @ 21°C        | 0.008046 cp |
| Densidad , g/cm <sup>3</sup> | 1           |

## 5.6. Método numérico

Las ecuaciones de continuidad, momentum y de turbulencia y de todas las condiciones frontera, se adaptaron a un esquema de diferencias finitas en la malla mostrada en la figura 5.1, y se resolvieron simultáneamente por una técnica numérica conocida como SIMPLE (Método semi- implícito para ecuaciones enlazadas por la presión (Hoffmann and Chiang, 1989). El término de la presión será nuestra variable de respuesta, por tal motivo, a esta variable se le elige como un indicador de la convergencia. Para verificar que se cumple tal propósito, se compararon los resultados de la simulación con las corridas experimentales, cuyos resultados se muestran en el capítulo 6.

El algoritmo SIMPLE relaciona la velocidad y los campos de presión los cuales satisfacen las ecuaciones de momentum y continuidad en un punto. Como las ecuaciones no se resuelven simultáneamente en todos los puntos, porque las ecuaciones son no lineales y están acopladas, se requiere un procedimiento de solución iterativo con iteraciones continuas hasta satisfacer todas las ecuaciones en todos los puntos.

Cada iteración del procedimiento de solución consiste de los siguientes pasos.

1. Se resuelven las ecuaciones de momentum usando un campo de presión supuesto.
2. Se resuelve la ecuación correctiva de presión (balance de masa) para obtener las correcciones necesarias al campo de presión. En este punto se hacen también los ajustes correspondientes a los componentes de velocidad.
3. Se resuelven las ecuaciones de flujo turbulento usando el campo de velocidades actualizado para obtener la distribución de la viscosidad efectiva.
4. Se resuelven las ecuaciones auxiliares de conservación de especies utilizando los valores actualizados de las otras variables.

5. Se actualizan las propiedades del fluido.

Estos pasos deben de repetirse hasta que el error de cada ecuación de conservación en cada volumen y sobre el dominio global disminuya al valor requerido.

Los cálculos realizados en la simulación matemática se llevaron a cabo en una pc IBM con procesadores Pentium IV a 2.20 Ghz y 256 MGbytes en Ram. El tiempo total de cómputo para todas las simulaciones realizadas exceden las 1000 horas.

### **5.7. Procedimiento empleado para el análisis del comportamiento de flujo de fluidos en el sistema**

El estudio de los fenómenos que se presentan en cualquier sistema de interés empleando la simulación matemática como herramienta es complicado, porque aunque existan herramientas muy poderosas que facilitan esta operación, esto no garantiza que los resultados obtenidos sean los que realmente representen los fenómenos. Es una gran ventaja para esta parte del estudio el contar con los resultados experimentales, porque éstos ayudan a establecer las condiciones adecuadas para llevar a cabo una simulación matemática confiable y eficiente. En la medida que se cuente con máquinas con más recursos en términos de velocidad de cálculo, memoria y despliegue gráfico, los fenómenos predichos con esta herramienta estarán más cercanos a la realidad.

En esta sección se explicará brevemente el procedimiento seguido para estudiar el comportamiento del flujo de fluidos que se presenta en el sistema de estudio.

Además de las condiciones de frontera generales mencionadas en la sección 5.5 de este trabajo, se indicarán las condiciones de frontera en la entrada empleadas para alcanzar la finalidad establecida en cada una de las siguientes etapas:

Etapa 1. **Simulación matemática del comportamiento de flujo de fluidos.** En esta etapa del trabajo se reproducen los tipos de comportamientos que desde el punto de vista de flujo de fluidos se obtuvieron con la simulación física.

Finalidad: Definir el algoritmo matemático y el modelo de turbulencia que reproduzca satisfactoriamente el comportamiento de flujo; que se empleará en las siguientes etapas.

El algoritmo y el modelo elegido deben de reproducir la forma del flujo que desarrolla el agua bidestilada en el sistema y las caídas de presión obtenidas en la simulación física. La metodología establecida se usa también para analizar, a través de la obtención de las curvas DTR, el tipo de flujo que el agua bidestilada presenta en el EDF. Se considera como trazador en el análisis del difusor un material órgano-metálico como es el sulfato de cobre pentahidratado; que al mezclarlo con el agua bidestilada no altera sus propiedades, con la finalidad de que éste no altere el comportamiento de flujo de fluidos dentro del sistema. En la obtención de las curvas DTR del difusor, no se incluyó la ecuación de energía y se consideró la entrada de sulfato de cobre pentahidratado a temperatura constante y sin pérdidas de calor por las paredes y la superficie. Sin profundizar sobre esta etapa porque no es la finalidad de este trabajo, se mostrarán en la parte de resultados las curvas DTR y forma de flujo obtenidas para las diferentes corridas con el algoritmo y el modelo de turbulencia establecido. A continuación se muestra el procedimiento empleado para el análisis del desempeño del difusor.

Como primer paso, se resuelven las ecuaciones de masa, momentum y especies en estado estacionario. Se considera como estado estacionario cuando en todo el sistema, ninguna de las variables de operación (velocidad, comportamiento de flujo y especies), cambia con respecto al tiempo. Las propiedades del agua bidestilada empleadas en la simulación matemática se muestran en la tabla 5.1. En la tabla 5.2 y 5.3 se muestran las condiciones de entrada utilizadas en este paso para el difusor original, como el prototipo.

\*O2 es una marca registrada por Silicon Graphics.

Tabla 5.2. Condiciones establecidas en la entrada del difusor original en estado estacionario.

| Condición de entrada                         | Valor                     |
|--|---------------------------|
| Velocidad, m/s.                              | 0.001052505               |
| Composición, fracción masa de trazador, g/ml | 0.35                      |
| Resistencia viscosa, $m^{-1}$                | $1.054544 \times 10^{15}$ |

Tabla 5.3. Condiciones establecidas en la entrada del difusor prototipo en estado estacionario.

| Condición de entrada                         | Valor                     |
|--|---------------------------|
| Velocidad, m/s.                              | 0.000210501               |
| Composición, fracción masa de trazador, g/ml | 0.35                      |
| Resistencia viscosa, $m^{-1}$                | $1.054544 \times 10^{15}$ |

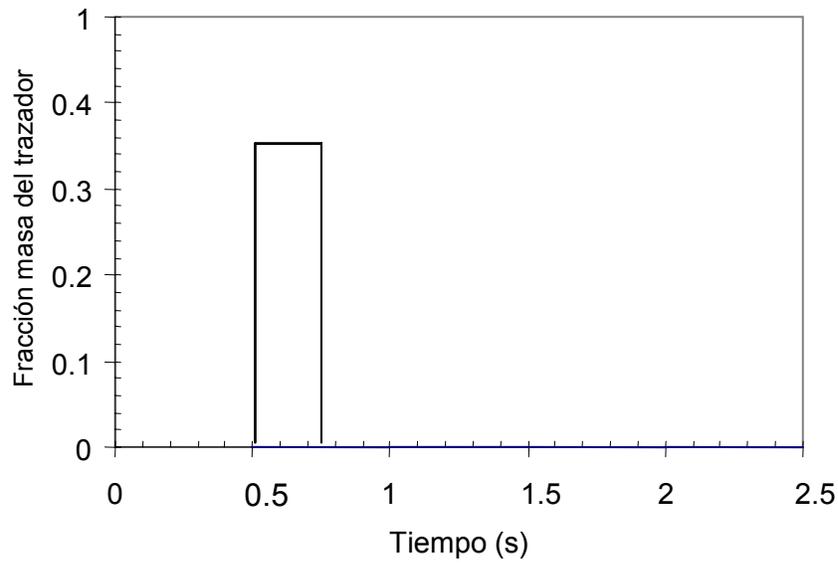


Figura 5.2. Señal empleada en la simulación matemática que indica la inyección en impulso del trazador.

Con los campos de velocidad obtenidos en el paso anterior, se continúa con la solución del sistema en estado transitorio (dependiente del tiempo) a la misma velocidad de entrada que el paso anterior, variando solamente la composición de las especies (agua bidestilada y trazador) en la entrada conforme a la figura 5.2. El tamaño de paso en tiempo utilizado en las soluciones del sistema en estado transitorio fue de 0.5 s.

En el estado transitorio se resuelven las ecuaciones fundamentales en cada tiempo establecido. Cuando se alcanza la convergencia en el tiempo  $t$ , los campos de todas las variables son la base para el cálculo en el siguiente incremento de tiempo  $t=t+0.5$ . En las celdas que conforman cada una de las salidas, se monitorea la concentración del trazador con respecto al tiempo.

Normalmente la condición frontera de salida está conformada por un grupo de celdas en donde todas son monitoreadas para determinar el valor de la variable a la salida del difusor y para definir el valor de la variable de interés (concentración

del trazador), se realiza el siguiente procedimiento (Dipak, Mazumdar and Roderick, 1999):

Se considera que las velocidades del flujo volumétrico a través de las “ $n$ ” celdas que conforman la salida, son idénticas. La cantidad de trazador inyectado que abandona el difusor en un período  $dt$  a través de la celda “ $i$ ” será:

$$dm_i = c_i(t) Q dt \quad 5.15$$

Donde  $c_i$  es la concentración en la celda “ $i$ ”,  $Q$  es el flujo volumétrico y  $m_i$  la cantidad de masa del trazador en la celda “ $i$ ”

Considerando a “ $M$ ” como la masa total de trazador inyectado, se obtiene por definición la siguiente expresión:

$$\frac{dm_i}{M} = \frac{c_i(t) Q dt}{M} = E_i(t) dt \quad 5.16$$

Donde  $E_i(t)$  es la función de distribución de tiempo de residencia para la celda “ $i$ ”.

Integrando la ecuación 5.16 y para todas las celdas, se tiene:

$$\int_0^{\infty} E_1(t) dt + \int_0^{\infty} E_2(t) dt + K \int_0^{\infty} E_n(t) dt = 1.0 \quad 5.17$$

O simplemente:

$$\int_0^{\infty} E(t) dt = 1.0 \quad 5.18$$

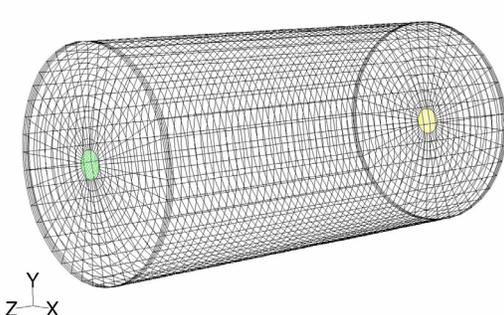
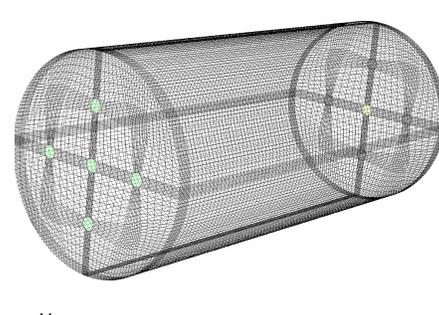
Donde  $E(t)$  es la función global de distribución de tiempo de residencia (DTR) y es la suma de las funciones individuales de DTR de las “ $n$ ” celdas. El procedimiento empleado para analizar las curvas DTR globales es el mismo al utilizado en la simulación física (ecuaciones 4.1-4.18).

### 6.1. Análisis numérico

La simulación numérica, es una herramienta que permite evaluar diferentes alternativas de solución dentro de una misma problemática, lo que permite obtener información valiosa para la toma de decisiones en un tiempo menor; que al hacerlo mediante una técnica experimental, siempre y cuando sea validada la simulación, al hacer uso de estas herramientas, es posible mejorar el diseño de partes en cuanto a la función específica que debe de cumplir cada parte, por tal razón, en esté trabajo, la optimización de la herramienta de difusión fue a través de un simulador de flujo (Fluent), siguiendo la técnica de dinámica de fluidos computacionales (DFC), con el propósito de evaluar el desempeño de diferentes configuraciones geométricas de difusores, simulando la corrida experimental en el EDF para encontrar cual de éstas es la configuración óptima de acuerdo a las necesidades.

Para cumplir con tal propósito, el análisis numérico contemplo los casos que se presentan en la tabla 6.1.

Tabla 6.1. Matriz de configuraciones geométricas para el análisis numérico.

| Difusor 1   |                       |                     | Difusor 2  |                       |                      |
|---|-----------------------|---------------------|--|-----------------------|----------------------|
|  |                       |                     |  |                       |                      |
| Caso  | Diámetro de la tobera | Tobera de inyección | Caso   | Diámetro de la tobera | Toberas de inyección |
| 1A  | 2/16"                 | 1                   | 2A   | 2/16"                 | 5                    |
| 1B  | 1/16"                 | 1                   | 2B   | 1/16"                 | 5                    |
| 1C  | 3/16"                 | 1                   | 2C   | 3/16"                 | 5                    |
| 1D  | 1/32"                 | 1                   | 2D   | 1/32"                 | 5                    |

## 6.2. Resultados del análisis numérico

Los resultados para cada caso se presentan en las tablas 6.2 y 6.3., su grafica correspondiente en las figuras 6.1 a 6.5, y su curva de distribución de tiempos de residencia en las figuras 6.6 a 6.13.

Tabla 6.2. Resultado Experimental de referencia.

| Gasto<br>[cc/min] | Caída<br>Presión<br>[psi] | Permeabilidad<br>[mD] |
|-------------------|---------------------------|-----------------------|
| 0.5               | 103.33                    | 0.9608                |

Tabla 6.3. Resultados de la simulación numérica de los criterios de diseño

| Gasto<br>[cc/min] | Difusor  | Caída Presión<br>[psi] | Permeabilidad<br>[mD] | Volumen<br>Muerto | Volumen<br>Pistón | Volumen<br>mezclado | TCAL     | VARO   | Dispersión<br>Axial |
|-------------------|----------|------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|---------------------|----------|--------|---------------------|
| 0.5               | 1A-2/16" | 102.42                 | 0.9644                | 0.3841            | 0.0680            | 0.5479              | 73.5000  | 0.7193 | 0.3596              |
| 0.5               | 1B-1/16" | 102.8409               | 0.9605                | 0.2591            | 0.0242            | 0.7166              | 165.0160 | 0.4837 | 0.2418              |
| 0.5               | 1C-3/16" | 102.8279               | 0.9606                | 0.3651            | 0.0999            | 0.5350              | 50.0575  | 0.7438 | 0.3719              |
| 0.5               | 1D-1/32" | 102.8601               | 0.9603                | 0.3622            | 0.0475            | 0.5902              | 556.0400 | 0.2327 | 0.1163              |
| 0.5               | 2A-2/16" | 102.286                | 0.9661                | 0.3145            | 0.1247            | 0.5608              | 24.0588  | 0.8060 | 0.4030              |
| 0.5               | 2B-1/16" | 102.3224               | 0.9653                | 0.3756            | 0.0755            | 0.5489              | 39.7127  | 0.8616 | 0.4308              |
| 0.5               | 2C-3/16" | 102.2774               | 0.9662                | 0.2834            | 0.1267            | 0.5900              | 23.6814  | 0.6586 | 0.3293              |
| 0.5               | 2D-1/32" | 101.0038               | 0.9780                | 0.1025            | 0.6221            | 0.2753              | 106.0770 | 0.3653 | 0.1827              |

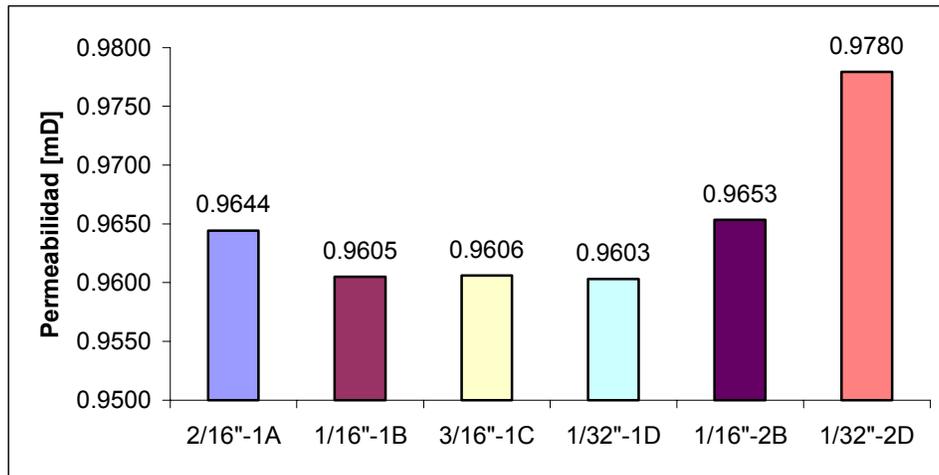


Figura 6.1. Resultados de permeabilidad.

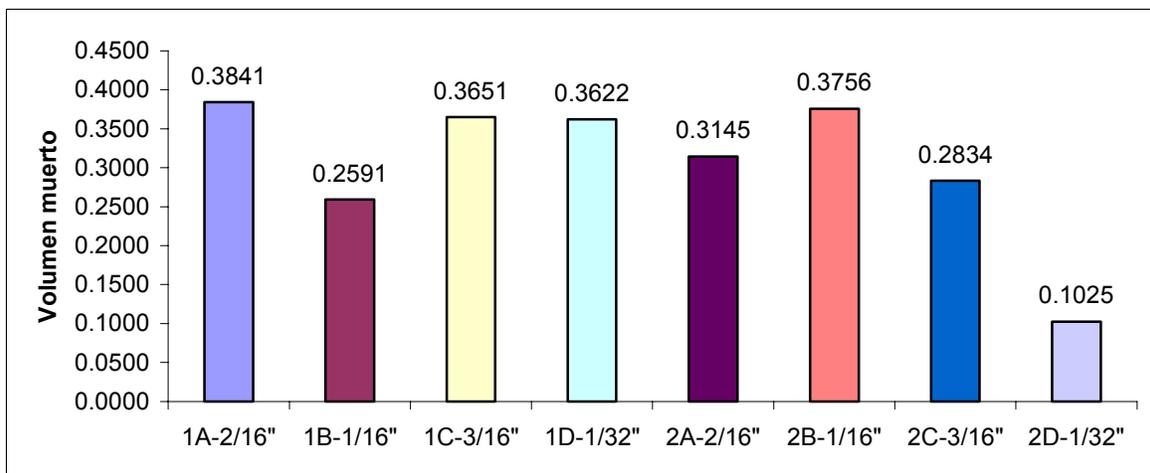


Figura 6.2. Resultados de volumen muerto.

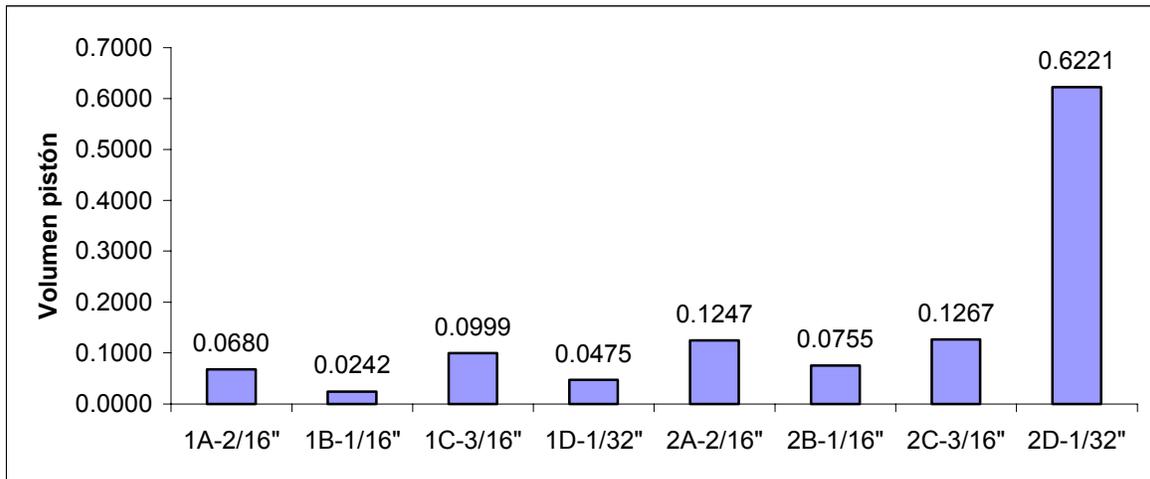


Figura 6.3. Resultados de volumen pistón.

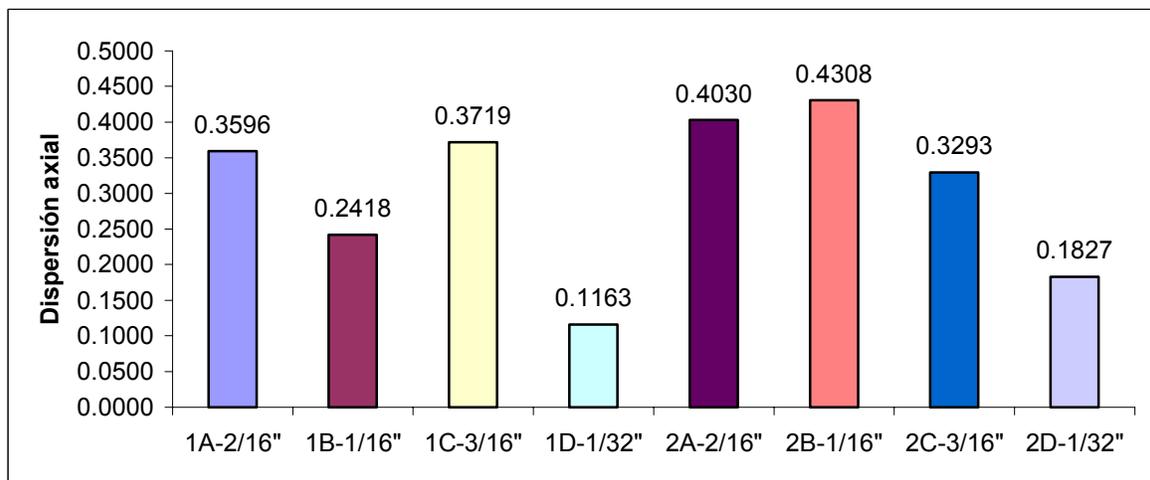


Figura 6.4. Resultados de dispersión axial.

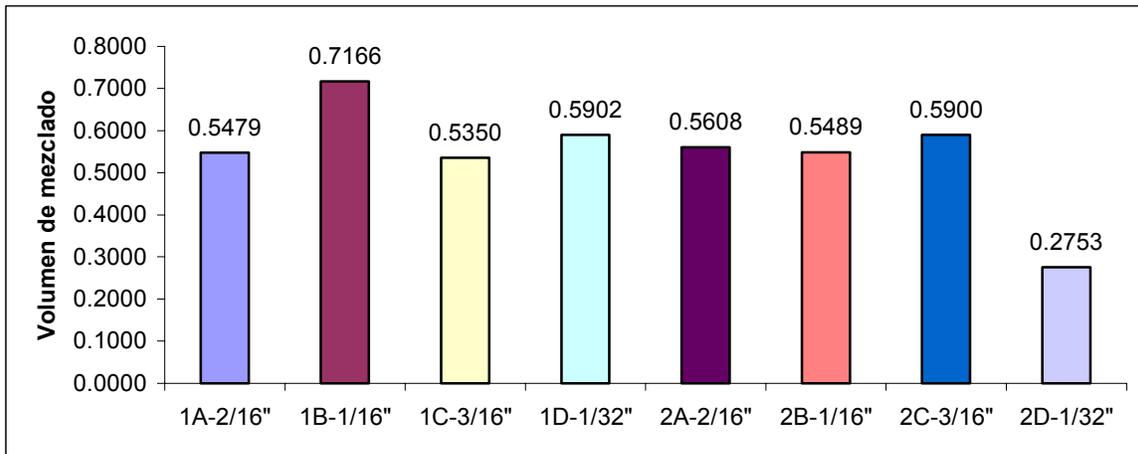


Figura 6.5. Resultados de volumen de mezclado.

**6.2.1. Curva de distribución de tiempos de residencia DTR**

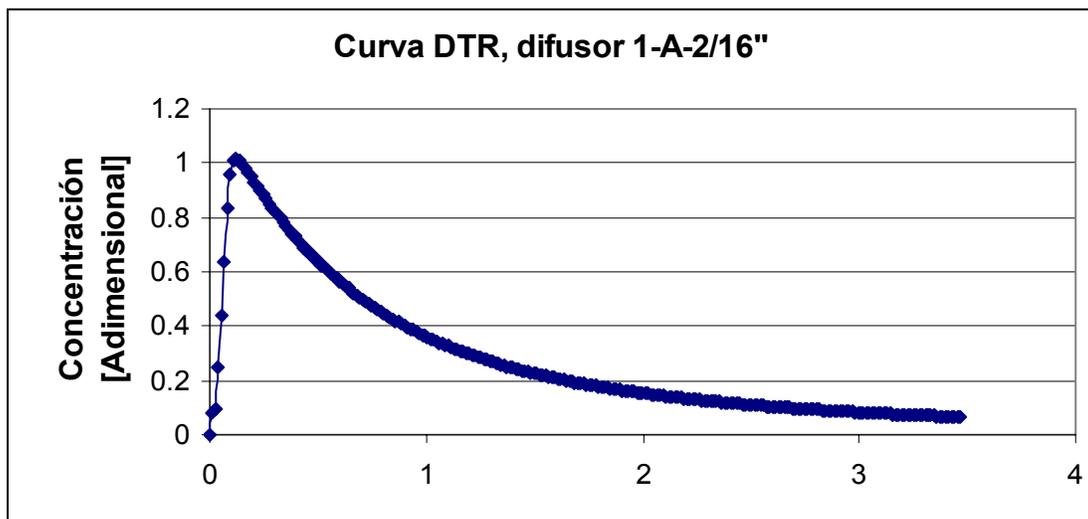


Figura 6.6. Curva de distribución de tiempos de residencia, caso 1-A-2/16”.

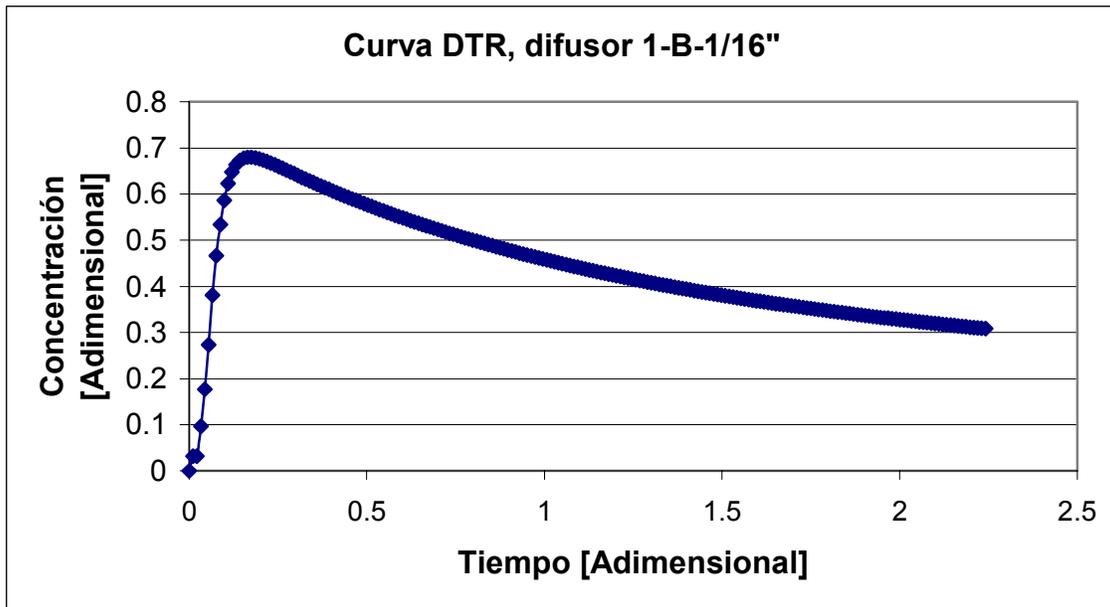


Figura 6.7. Curva de distribución de tiempos de residencia, caso 1-B-1/16".

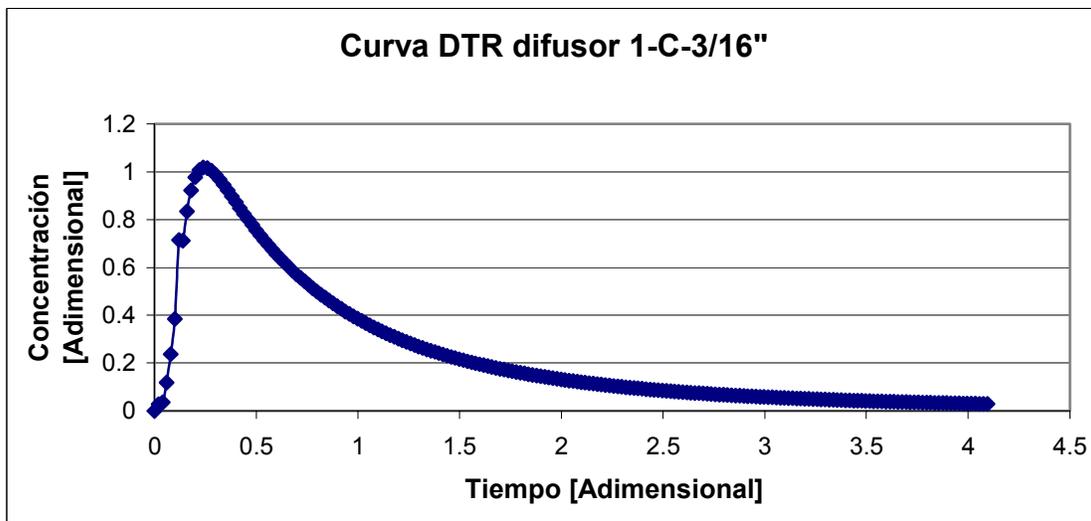


Figura 6.8. Curva de distribución de tiempos de residencia, caso 1-C-3/16".

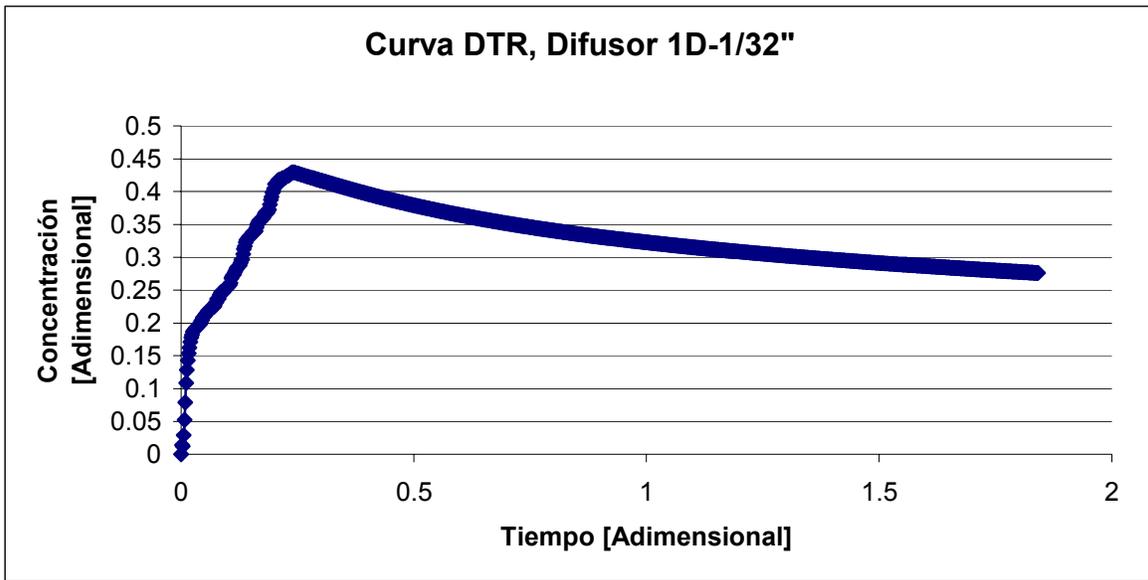


Figura 6.9. Curva de distribución de tiempos de residencia, caso 1-D-1/32".

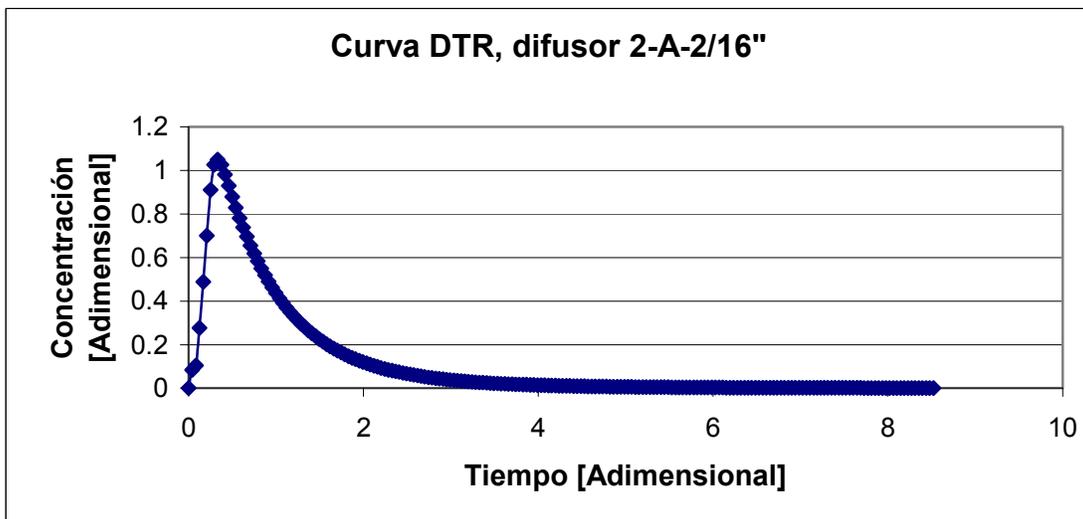


Figura 6.10. Curva de distribución de tiempos de residencia, caso 2-A-2/16".

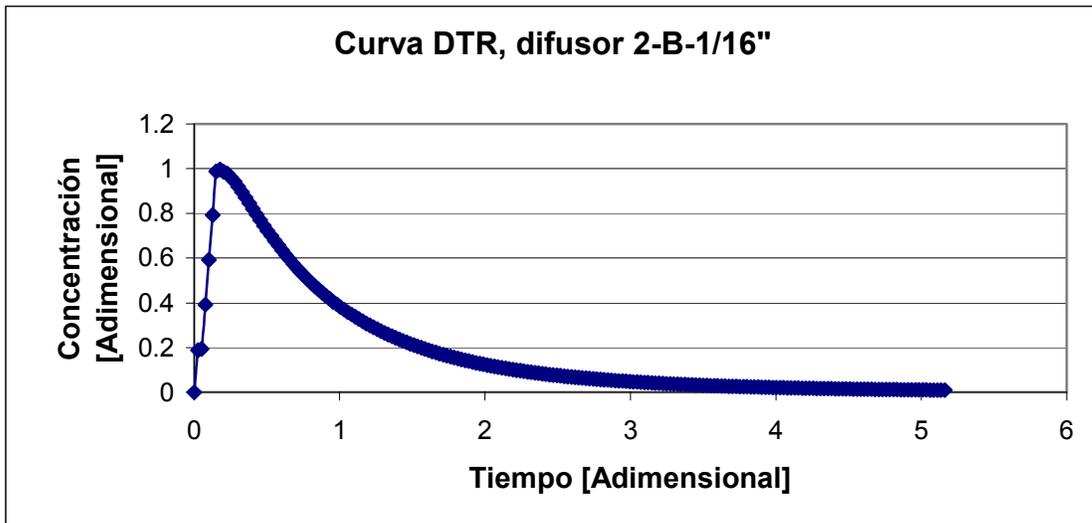


Figura 6.11. Curva de distribución de tiempos de residencia, caso 2-B-1/16".

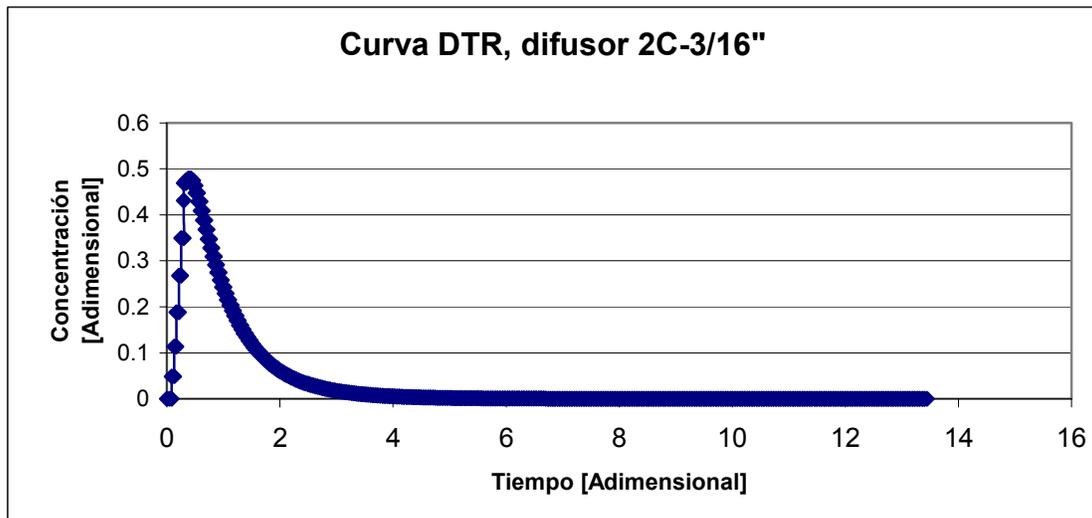


Figura 6.12. Curva de distribución de tiempos de residencia, caso 2-C-3/16".

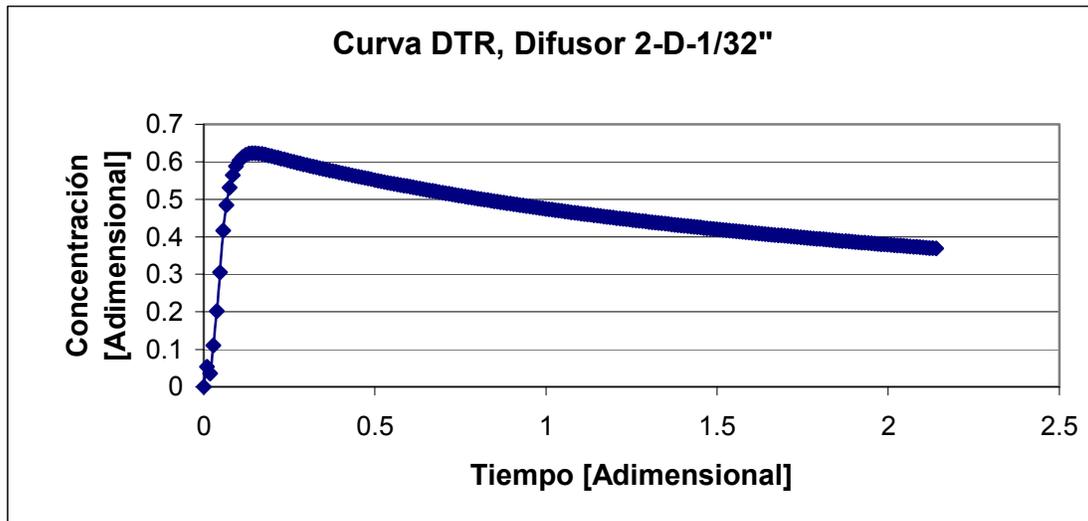


Figura 6.13. Curva de distribución de tiempos de residencia, caso 2-D-1/32".

### 6.3. Discusión de resultados

Una vez modelado un campo de configuraciones geométricas de ocho alternativas de solución, y sabiendo que un buen comportamiento de flujo está definido por un valor mínimo de volumen muerto, así como de mezclado y un valor máximo de volumen pistón; donde la dispersión axial indica si el flujo del fluido tiende a un comportamiento pistón cuando su valor tiende a cero, por lo tanto la alternativa de solución que mostró un mejor desempeño de flujo, en función a los criterios de diseño, fue la configuración geométrica “2D”, correspondiente al difusor 2 e integrada por cinco toberas con diámetro de 1/32”, que con respecto a la configuración original “1A”, reduce las zonas de volumen muerto y de mezclado en un 28% y 27%, respectivamente, e incrementa el volumen pistón en un 55%. Los resultados del comportamiento de flujo de la configuración “2D” con respecto a la “1A” se muestran en la Figura. 6.14.

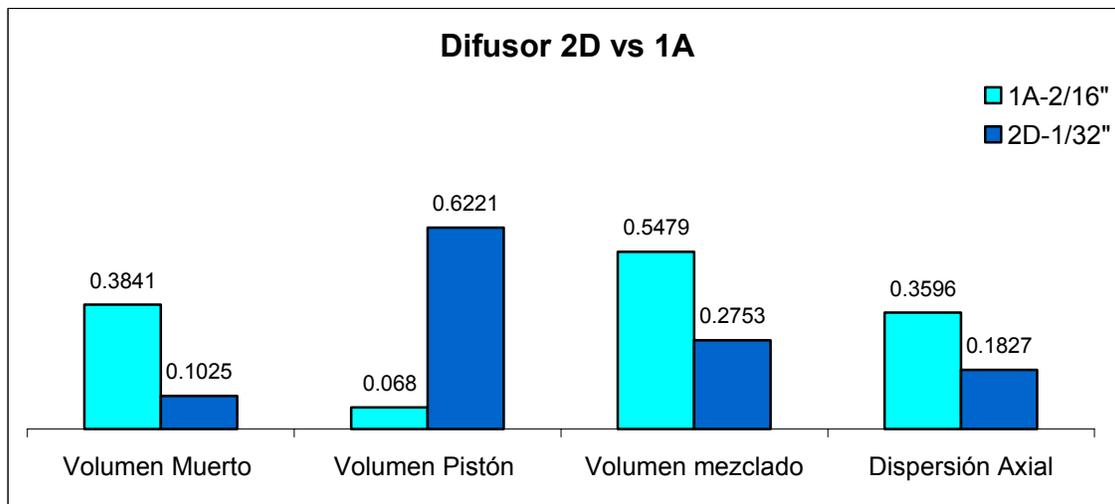


Figura 6.14. Caso que mostró un optimo comportamiento de flujo con respecto a los criterios de selección:  $V_d$ ,  $V_p$ ,  $V_m$  y  $D_a$ .

## Conclusiones

La meta principal de este proyecto fue alcanzada con éxito, y consistió en diseñar una herramienta que optimizará la difusión de flujo de fluidos en medios porosos evitando perturbaciones en la distribución del fluido tales como: zonas muertas y canalizaciones de flujo, debidas a un diseño no óptimo. Los criterios de diseño para lograr la meta trazada son aquellos que caracterizan el comportamiento de flujo de fluidos y los parámetros que lo definen son: el volumen muerto, volumen pistón, volumen de mezclado y dispersión axial.

Las diferentes alternativas de solución propuestas, fueron sometidas a pruebas de desempeño de comportamiento de flujo, a través del empleo de herramientas de simulación numérica; previa validación de la metodología, de tal forma que el difusor seleccionado (2D), prueba ser el óptimo, dentro de las propuestas planteadas, ya que cuantitativamente es el que menor irregularidades de flujo desarrollo en la prueba de desempeño de comportamiento de flujo.

El trabajar de forma planeada, a través de un proceso que integro diferentes metodologías de diseño, pruebas experimentales, cuyos resultados experimentales fueron validados y herramientas de simulación numérica, para probar diferentes posibles soluciones, permitió definir cual de las alternativas de solución propuestas, minimiza las irregularidades de flujo.

Por consiguiente, el proceso de diseño fue más allá de proponer diferentes conceptos geométricos, ya que, no sólo se llego a una solución que cuantitativamente cumple con la función para la cual está requerido, sino que también quedó definida una metodología de gran aplicación, a través de la cual es posible diseñar la forma geométrica en función al tipo de flujo requerido.

## ANEXO 1. PROCEDIMIENTO API-RP-40. RECOMMENDED PRACTICES FOR CORE ANALYSIS, SECCIÓN 3.6.

### A.1.1. Limpieza de núcleos

Antes de realizar cualquier medición de permeabilidad o porosidad, los fluidos originales del núcleo o muestra deben ser completamente removidos. Esto generalmente se lleva a cabo mediante una corriente de varios solventes para extraer los hidrocarburos, agua o sales presentes, algunos de estos solventes se presentan en la tabla siguiente.

Tabla. A.1.1. Selección de Solventes y usos

| Solvent                               | Boiling Point, °C | Solubility         |
|---------------------------------------|-------------------|--------------------|
| Acetone                               | 56.5              | oil, water, salt   |
| Chloroform/methanol azeptrope (65/35) | 53.5              | oil, water, salt   |
| Cyclohexane                           | 81.4              | oil                |
| Ethylene Chloride                     | 83.5              | oil, limited water |
| Hexane                                | 49.7-68.7         | oil                |
| Methanol                              | 64.7              | water, salt        |
| Methylene Chloride                    | 40.1              | oil, limited water |
| Naphtha                               | 160.0             | oil                |
| Tetrachloroethylene                   | 121               | oil                |
| Tetrahydrofurane                      | 65.0              | oil, water, salt   |
| Toluene                               | 110.6             | oil                |
| Trichloroethylene                     | 87.0              | oil, limited water |
| Xylene                                | 138.0-144.4       | oil                |

Existen varias técnicas para eliminar estos residuos, en nuestro caso se empleo el “método de extracción por destilación”, el cual se describe brevemente a continuación, para mayor referencias consultar el procedimiento API-RP-40 Secc. 3.6.4.4.

### A.1.2. Método de extracción por destilación

A través del empleo de un equipo de extracción tipo Soxhlet y un solvente o solventes adecuados se disuelve y extrae cualquier residuo de aceite, agua o sal que pueda existir dentro del medio poroso. El solvente pasa continuamente por un ciclo de destilación – condensación y por medio de esté proceso se eliminan los residuos existentes en el medio poroso.

ANEXO 1. PROCEDIMIENTO API-RP-40. RECOMMENDED PRACTICES FOR CORE ANALYSIS, SECCIÓN 3.6.

**A.1.2.1. Procedimiento**

- 1.- Coloque el medio poroso a limpiar dentro del soxhlet
- 2.- Agregue el solvente dentro del soxhlet hasta rebasar el espécimen a limpiar.
- 3.- Ensamble el equipo soxhlet.
- 4.- Encienda la chaqueta de calentamiento
- 5.- Una vez que el color del solvente regrese a su color inicial durante el proceso de extracción la limpieza de la muestra concluye.
- 6.- Seque la muestra

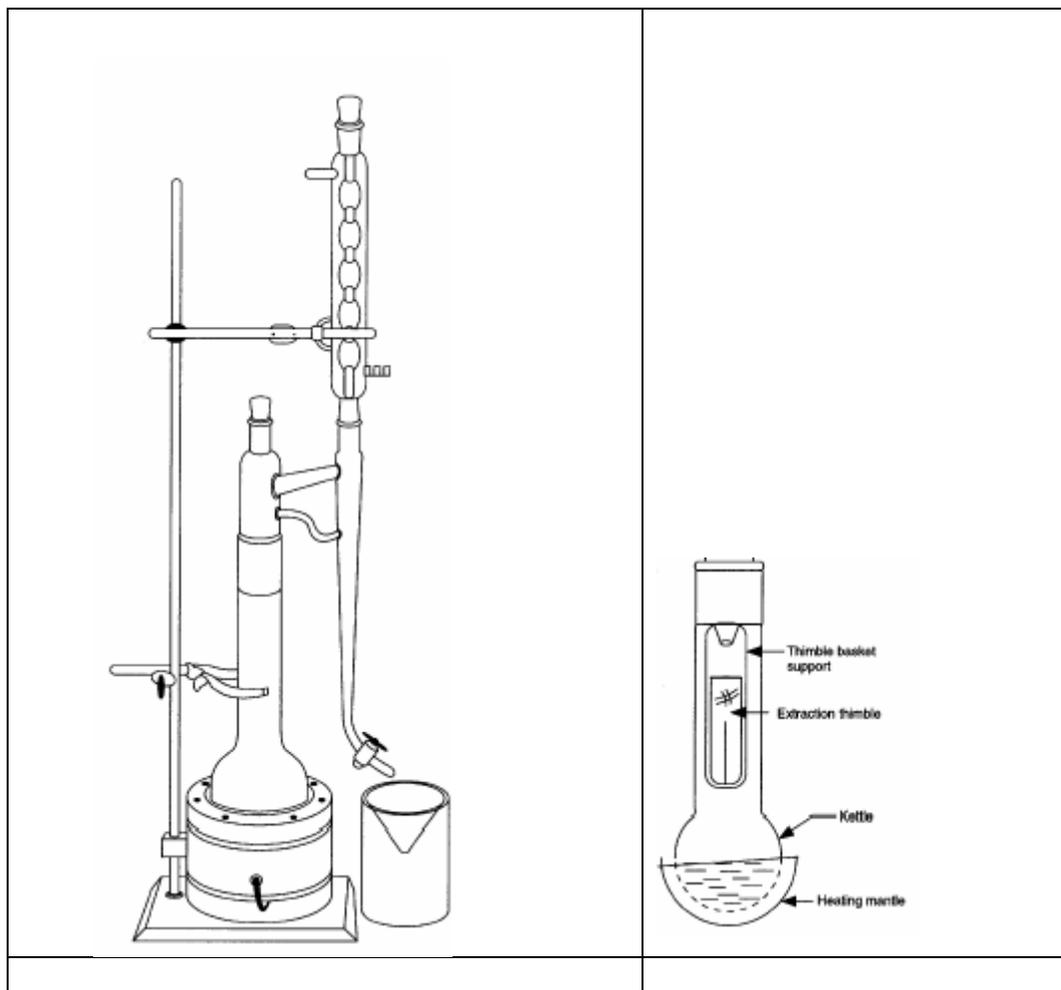


Figura. A.1.1. Equipo de destilación tipo soxhlet

ANEXO 2. PROCEDIMIENTO API-RP-40. RECOMMENDED PRACTICES FOR CORE ANALYSIS SECCIÓN 3.7.

**A.2.1. Secado**

Los núcleos convencionales deben ser secados por el método listado en la tabla A.2.

Tabla. A.2.1. Métodos de secado para núcleos

| <b>Tipo de roca</b>                                | <b>Método</b>                               | <b>Temperatura, °C</b> |
|--|---|------------------------|
| Arenisca<br>(bajo contenido de arcilla)            | Horno convencional                          | 116                    |
|  | Horno de vacío                              | 90                     |
| Arenisca<br>(alto contenido de arcilla)            | Horno humidificado,<br>40% humedad relativa | 63                     |
| Carbonato  | Horno convencional                          | 116                    |
|  | Horno de vacío                              | 90                     |
| Lutita u otra roca de alto<br>contenido de arcilla | Horno humidificado,<br>40% humedad relativa | 60                     |

Cada núcleo debe ser secado hasta que el peso se mantenga constante. El tiempo de secado puede variar sustancialmente, pero generalmente no excede de 4 horas.

## ANEXO 3. PROCEDIMIENTO PREPARACIÓN, INYECCIÓN Y MUESTREO DEL TRAZADOR

### A.3.1. Procedimiento de preparación

- 1.- Pese 7 gramos de Sulfato de cobre.
- 2.- Mida 20 ml. de agua bidestilada.
- 3.- Mezcle el sulfato de cobre con el agua bidestilada y agite hasta diluir la mezcla.

El trazador será el producto de mezclar sulfato de cobre con agua bidestilada.

### A.3.2. Procedimiento de inyección del trazador

- 1.- Coloque el trazador en el dispositivo contenedor a través del cual será inyectado (By pass).
- 2.- Conecte el by pass al EDF, como se muestra en la figura.
- 3.- Una vez que se ha determinado la permeabilidad y sigue fluyendo fluido a través del medio de estudio, proceda a cerrar la válvula (Va).
- 4.- Cambie la dirección del flujo girando la válvula de 4 pasos (V4pasos) 180°.
- 5.- Abra la válvula (Vb) una vez alcanzada la presión de inyección.
- 6.- Abra la válvula (Vc) una vez alcanzada la presión de inyección, en este momento el trazador empieza a entrar al sistema.

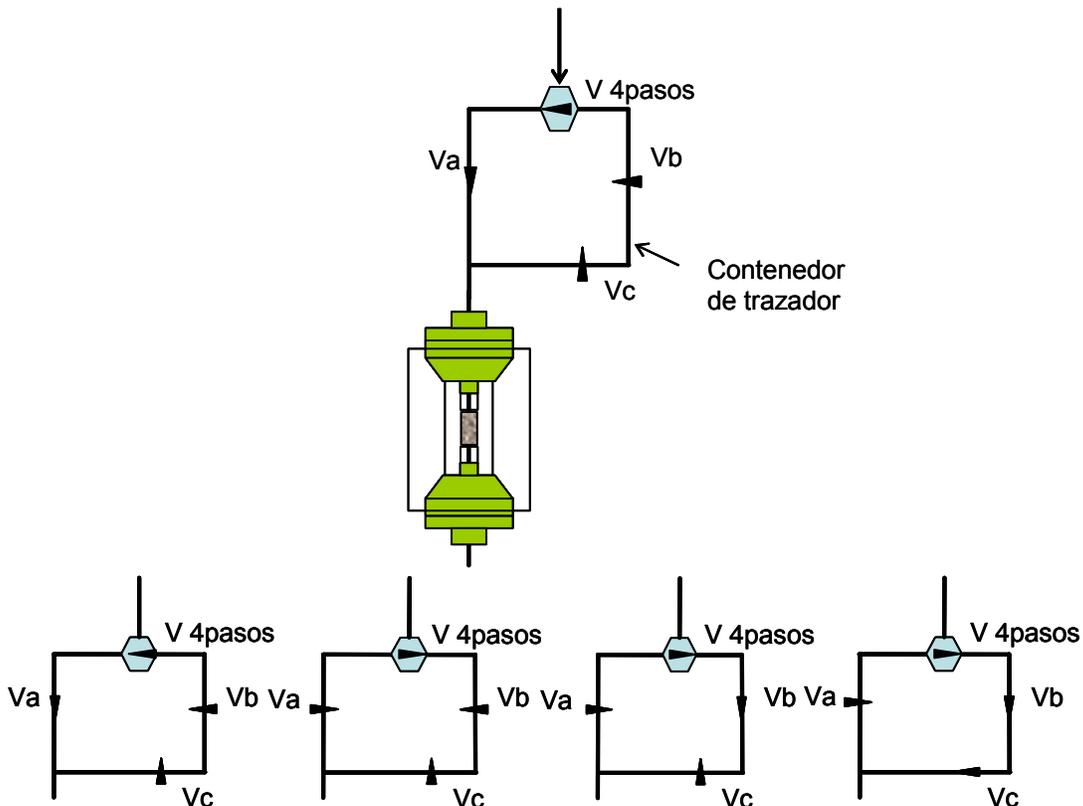


Figura A.3.1. Arreglo del by pass y secuencia para inyectar el trazador.

## ANEXO 3. PROCEDIMIENTO PREPARACIÓN, INYECCIÓN Y MUESTREO DEL TRAZADOR

### **A.3.3. Procedimiento de muestreo del trazador**

Inicio de muestreo: 1 min. después de inyectar el trazador,

Tiempo de muestreo: cada 15 seg.

Duración de muestreo: 1 min.

Número de muestreos: 60

### A.4.1. Validación Experimental

Una de las propiedades más importantes del método de medición empleado es que debe de estar libre de errores sistemáticos y aleatorios. Esto significa que el valor evaluado para el mensurando debería ser el valor verdadero. Sin embargo, aunque no existieran errores sistemáticos, los errores aleatorios hacen poco probable que la cantidad medida sea exactamente igual que la cantidad patrón conocida. En ocasiones estos errores son detectados por simple inspección, sin embargo, en otras no, al tener orígenes muy distintos en la técnica experimental y el equipo utilizado. Esto afecta a la precisión y reproducibilidad. Para decidir si la diferencia entre la cantidad medida y la cantidad conocida se puede atribuir a estos errores sistemáticos y principalmente aleatorios, se aplican las pruebas de validación (prueba estadística de contraste de significación). Como su nombre indica, esta aproximación contrasta si son significativas las diferencias entre los resultados, o si se pueden justificar solo por variaciones aleatorias.

Al hacer un contraste de significación se prueba la veracidad de una hipótesis denominada **Hipótesis nula**, denotada por **H<sub>0</sub>**. Se adopta como hipótesis nula aquella mediante la cual un método de medición no está sujeto a errores sistemáticos. El término nulo es empleado para indicar que no hay otra diferencia entre el valor observado y el conocido, que la atribuible a la variación aleatoria. Suponiendo que está hipótesis nula es verdadera, la teoría estadística se puede emplear para calcular la probabilidad de que la diferencia observada (o una superior a ella) entre la medida muestral,  $\bar{x}$ , y el valor verdadero  $\mu$ , se deba solamente a errores aleatorios. Cuanto mas pequeña sea la probabilidad de que la diferencia observada ocurra por azar, menos probable será que la hipótesis nula sea verdadera. Normalmente la hipótesis nula se rechaza cuando la probabilidad de que dicha diferencia observada ocurra por azar es menor que 1 en 20 veces (es decir 0.05 o 5%). En este caso se dice que la diferencia **es significativa al nivel 0.05 (ó 5%)**. Utilizando este nivel de significación se rechaza, en promedio, la hipótesis nula, aunque sea de hecho verdadera, 1 de cada 20 veces. Para estar mas seguros de que se toma la decisión adecuada, se maneja también un nivel de significación mas pequeño, normalmente 0.01 ó 0.001 (1% ó 0.01%).

Para evaluar y cuantificar la calidad de los resultados obtenidos en este trabajo, se procedió a realizar la validación del estudio experimental, a través de un análisis de veracidad y precisión, considerando los aspectos anteriormente mencionados, de acuerdo a ISO 5725 *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results* (parte 1 a 6).

Entendiendo como veracidad, el grado de concordancia existente entre el valor medio del mensurando obtenido de una gran serie de resultados de ensayo y el valor aceptado como verdadero. Para el caso de estudio, el mensurando es la permeabilidad registrada por el EDF, en tanto, el valor verdadero es el valor teórico basado en los resultados de la simulación matemática. La veracidad se expresa en términos del sesgo o desviación (BIAS).

## ANEXO 4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

La precisión es el grado de concordancia entre resultados de ensayo independientes obtenidos en las condiciones determinadas para hacer al experimento repetible y reproducible r&R.

### A.4.2. Consideraciones para el estudio estadístico

Incertidumbre: Tipo A (atribuible solo a la medición, solo son considerados errores aleatorios)

Mensurando: Permeabilidad.

Condiciones de la medición:

- Fluido: Agua bidestilada ( viscosidad de 0.008046 cp)
- Gasto: 2.5 cc/min
- Flujo: Laminar descendente, en medio poroso cilíndrico (radio de 0.5 *pulg.* y longitud de 2 *pulg.*).
- Presión de confinamiento: 2000 psi
- Temperatura: 21°C
- Difusores: Original y Propuesto

Numero de pruebas: 6

Numero de replicas por prueba: 10

Niveles: 2 geometrías de difusores

Nivel de significancia: Intervalo de confianza del 95% con una distribución normal.

La desviación estándar poblacional es considerada igual a la desviación estándar muestral, debido a que se trata de  $n$  mediciones no limitadas.

El análisis de los resultados implicó una serie de pruebas de escrutinio, Mendel ( $h$  y  $k$ ), Cochran y Grubbs. El Algoritmo del método empleado para validar los resultados experimentales aparece al final de este anexo

Los estadísticos de Mendel permitieron investigar cuidadosamente la existencia potencial de los valores aberrantes. En tanto el estadístico de Cochran sirvió para probar la homogeneidad de la varianza. Donde la hipótesis rechaza que la varianza más grande no sea un valor anómalo, si el valor crítico de Cochran es mayor que el valor adecuado de experimentos. Cuando se rechaza la hipótesis nula, se descartan los resultados procedentes del experimento en cuestión. Después de estas pruebas se aplicó el estadístico de Grubbs, el cual compara la desviación del valor sospechoso y la media muestral, con la desviación estándar de la muestra. Se aplica en primer lugar como contraste simple de valores anómalos y en su forma modificada como contraste de replicas anómalas. Esta serie de contrastes es recomendada por ISO. Una vez que se aplican las tres pruebas de escrutinio, se puede proceder a los cálculos de Precisión y Veracidad.

En la precisión se evalúa la repetibilidad y reproducibilidad del experimento y en la veracidad se determina el sesgo y su incertidumbre.

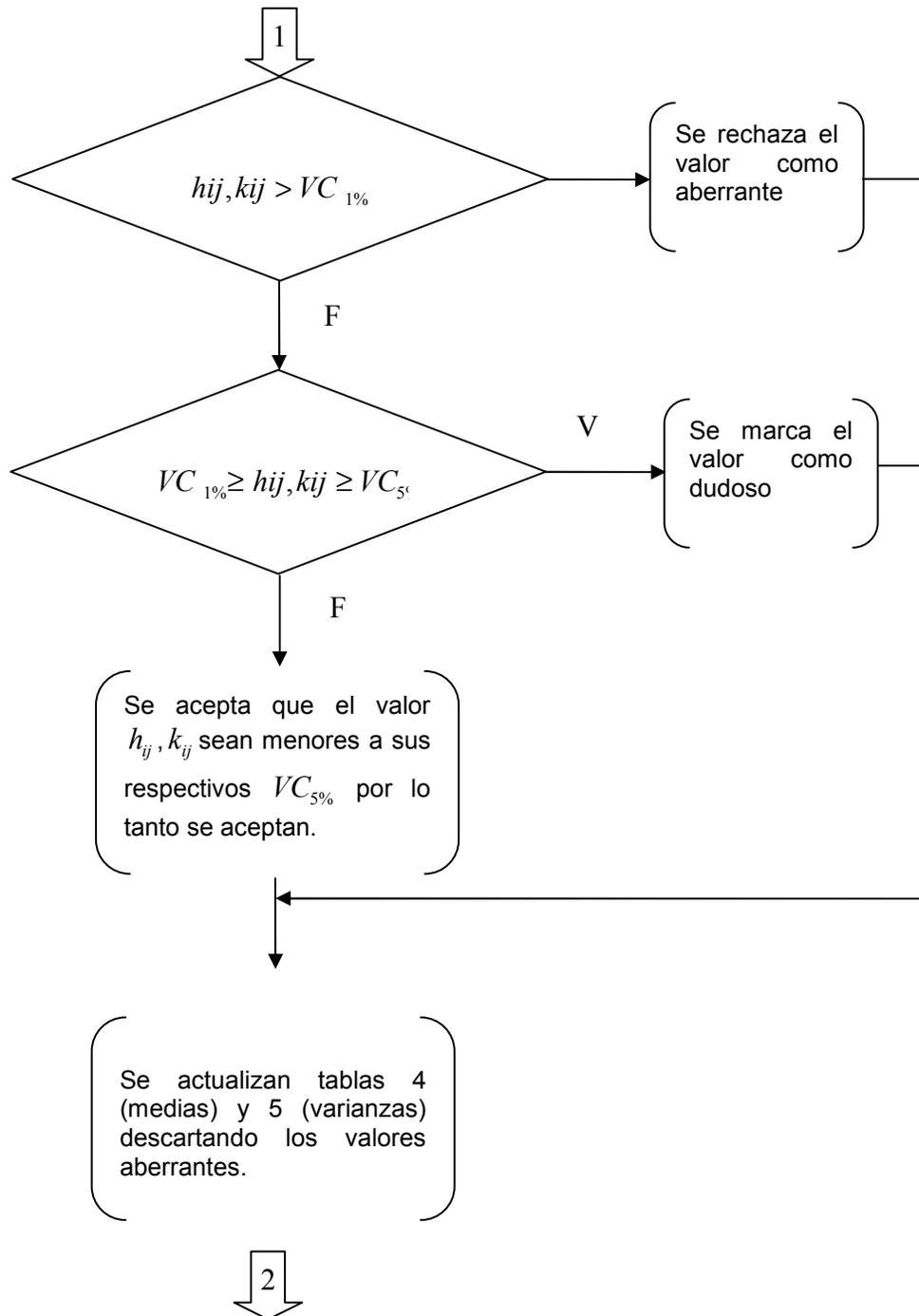
ANEXO 4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

**A.4.3. ALGORITMO DE EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE MEDICIÓN**

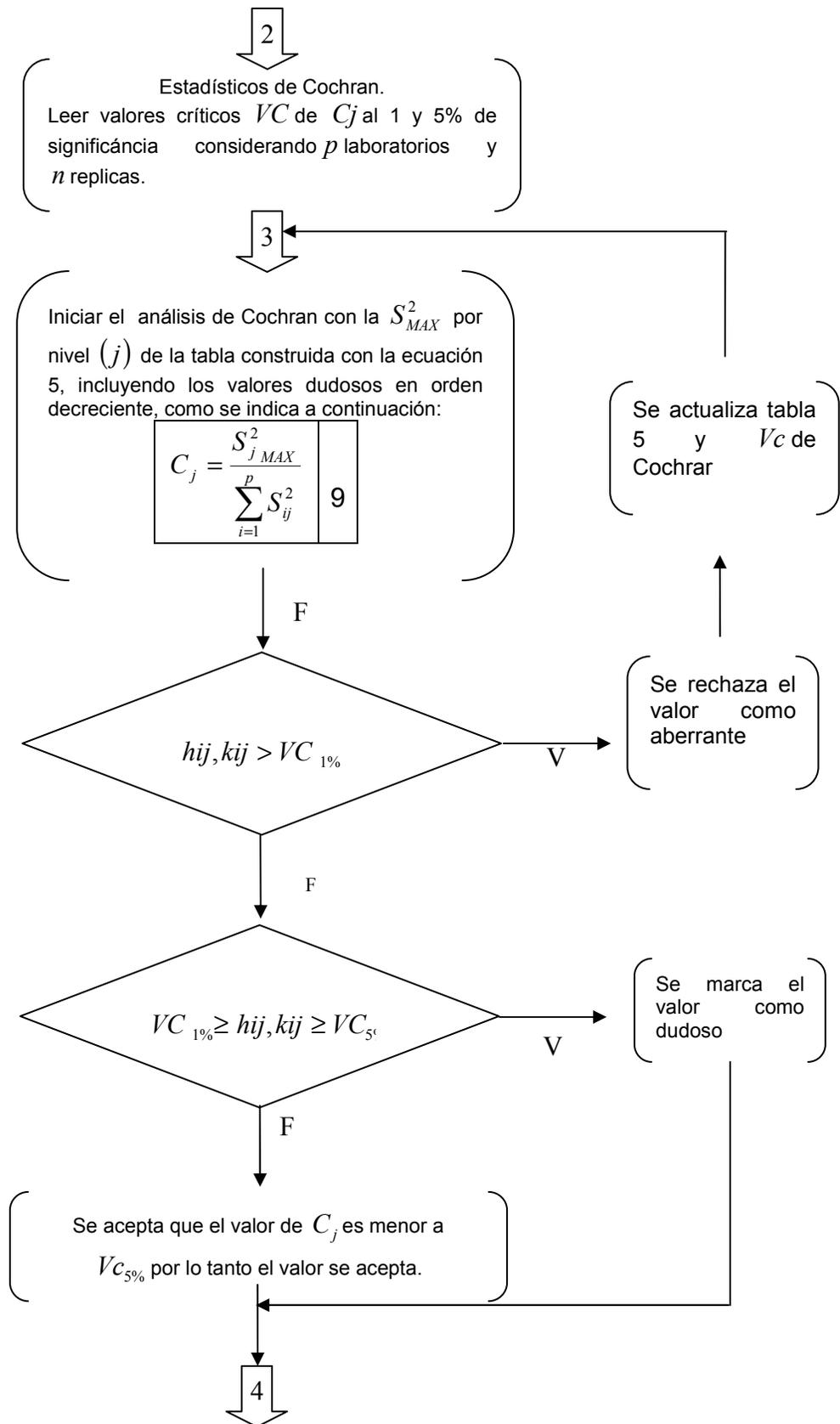
| <b>INICIO</b>   |  |   |  |                  |  |                                   |  |   |  |                               |
|---|--|---|--|------------------|--|-----------------------------------|--|---|--|-------------------------------|
| <p>Datos experimentales.</p> <table border="1" style="width: 100%; margin-top: 10px;"> <tr> <td style="text-align: center; width: 80%;"> <math display="block">\sum_{i=1}^p \sum_{k=1}^{n'} \sum_{j=1}^m Y_{ikj}</math> </td> <td style="text-align: center; width: 20%;">1</td> </tr> </table>   | $\sum_{i=1}^p \sum_{k=1}^{n'} \sum_{j=1}^m Y_{ikj}$                        | 1 | <table border="1" style="width: 100%; margin-top: 10px;"> <tr><td><math>Y</math> = Mensurando</td></tr> <tr><td><math>i</math> = Laboratorio</td></tr> <tr><td><math>p</math> = Número total de laboratorio</td></tr> <tr><td><math>k</math> = Replica por laboratorio</td></tr> <tr><td><math>n'</math> = Número de replicas por laboratorio</td></tr> <tr><td><math>j</math> = Niveles</td></tr> <tr><td><math>m</math> = Número total de niveles</td></tr> </table> | $Y$ = Mensurando | $i$ = Laboratorio  | $p$ = Número total de laboratorio | $k$ = Replica por laboratorio                            | $n'$ = Número de replicas por laboratorio | $j$ = Niveles  | $m$ = Número total de niveles |
| $\sum_{i=1}^p \sum_{k=1}^{n'} \sum_{j=1}^m Y_{ikj}$   | 1  |   |  |                  |  |                                   |  |   |  |                               |
| $Y$ = Mensurando  |  |   |  |                  |  |                                   |  |   |  |                               |
| $i$ = Laboratorio   |  |   |  |                  |  |                                   |  |   |  |                               |
| $p$ = Número total de laboratorio   |  |   |  |                  |  |                                   |  |   |  |                               |
| $k$ = Replica por laboratorio   |  |   |  |                  |  |                                   |  |   |  |                               |
| $n'$ = Número de replicas por laboratorio   |  |   |  |                  |  |                                   |  |   |  |                               |
| $j$ = Niveles   |  |   |  |                  |  |                                   |  |   |  |                               |
| $m$ = Número total de niveles   |  |   |  |                  |  |                                   |  |   |  |                               |
| <p style="text-align: center;">Estadísticos básicos de replicas por laboratorio.</p> <table border="1" style="width: 100%; margin-top: 10px;"> <tr> <td style="text-align: center; width: 80%;"> <math display="block">\bar{Y}_{ij} = \sum_{k=1}^n \frac{Y_{ik}}{n}</math> </td> <td style="text-align: center; width: 20%;">2</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"> <math display="block">S_{ij}^2 = \frac{\sum_{k=1}^{n'} (Y_{ik} - \bar{Y}_i)^2}{n-1}</math> </td> <td style="text-align: center;">3</td> </tr> </table> <p>Se obtienen tablas</p> <table border="1" style="width: 100%; margin-top: 10px;"> <tr> <td style="text-align: center; width: 80%;"> <math display="block">\sum_i^p \sum_j^m \bar{Y}_{ij}</math> </td> <td style="text-align: center; width: 20%;">4</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"> <math display="block">\sum_i^p \sum_j^m S_{ij}^2</math> </td> <td style="text-align: center;">5</td> </tr> </table> | $\bar{Y}_{ij} = \sum_{k=1}^n \frac{Y_{ik}}{n}$                             | 2 | $S_{ij}^2 = \frac{\sum_{k=1}^{n'} (Y_{ik} - \bar{Y}_i)^2}{n-1}$  | 3                | $\sum_i^p \sum_j^m \bar{Y}_{ij}$   | 4                                 | $\sum_i^p \sum_j^m S_{ij}^2$                             | 5   | <p>Promedio de replicas por laboratorio (<math>i</math>) y nivel (<math>j</math>).</p> <p>Varianza de replicas por laboratorio y nivel (<math>j</math>)</p> <p>Medios del Mensurando</p> <p>Varianzas del Mensurando</p> |                               |
| $\bar{Y}_{ij} = \sum_{k=1}^n \frac{Y_{ik}}{n}$  | 2  |   |  |                  |  |                                   |  |   |  |                               |
| $S_{ij}^2 = \frac{\sum_{k=1}^{n'} (Y_{ik} - \bar{Y}_i)^2}{n-1}$   | 3  |   |  |                  |  |                                   |  |   |  |                               |
| $\sum_i^p \sum_j^m \bar{Y}_{ij}$  | 4  |   |  |                  |  |                                   |  |   |  |                               |
| $\sum_i^p \sum_j^m S_{ij}^2$  | 5  |   |  |                  |  |                                   |  |   |  |                               |
| <p style="text-align: center;">Estadísticos de Mendel.</p> <table border="1" style="width: 100%; margin-top: 10px;"> <tr> <td style="text-align: center; width: 80%;"> <math display="block">\bar{Y} = \frac{\sum_{j=1}^p n'_{ij} \bar{Y}_{ij}}{\sum_{j=1}^p n'_{ij}}</math> </td> <td style="text-align: center; width: 20%;">6</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"> <math display="block">K_{ij} = \frac{S_{ij} \sqrt{p_j}}{\sqrt{\sum_{i=1}^p S_{ij}^2}}</math> </td> <td style="text-align: center;">7</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"> <math display="block">h_{ij} = \frac{Y_{ij} - \bar{Y}_j}{\sqrt{\frac{1}{(p_j - 1)} \sum_{i=1}^{p_j} (Y_{ij} - \bar{Y}_j)^2}}</math> </td> <td style="text-align: center;">8</td> </tr> </table> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;">  </div>  | $\bar{Y} = \frac{\sum_{j=1}^p n'_{ij} \bar{Y}_{ij}}{\sum_{j=1}^p n'_{ij}}$ | 6 | $K_{ij} = \frac{S_{ij} \sqrt{p_j}}{\sqrt{\sum_{i=1}^p S_{ij}^2}}$  | 7                | $h_{ij} = \frac{Y_{ij} - \bar{Y}_j}{\sqrt{\frac{1}{(p_j - 1)} \sum_{i=1}^{p_j} (Y_{ij} - \bar{Y}_j)^2}}$ | 8                                 | <p>Promedio de promedios por nivel (<math>j</math>).</p> |   |  |                               |
| $\bar{Y} = \frac{\sum_{j=1}^p n'_{ij} \bar{Y}_{ij}}{\sum_{j=1}^p n'_{ij}}$  | 6  |   |  |                  |  |                                   |  |   |  |                               |
| $K_{ij} = \frac{S_{ij} \sqrt{p_j}}{\sqrt{\sum_{i=1}^p S_{ij}^2}}$   | 7  |   |  |                  |  |                                   |  |   |  |                               |
| $h_{ij} = \frac{Y_{ij} - \bar{Y}_j}{\sqrt{\frac{1}{(p_j - 1)} \sum_{i=1}^{p_j} (Y_{ij} - \bar{Y}_j)^2}}$  | 8  |   |  |                  |  |                                   |  |   |  |                               |

## ANEXO 4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

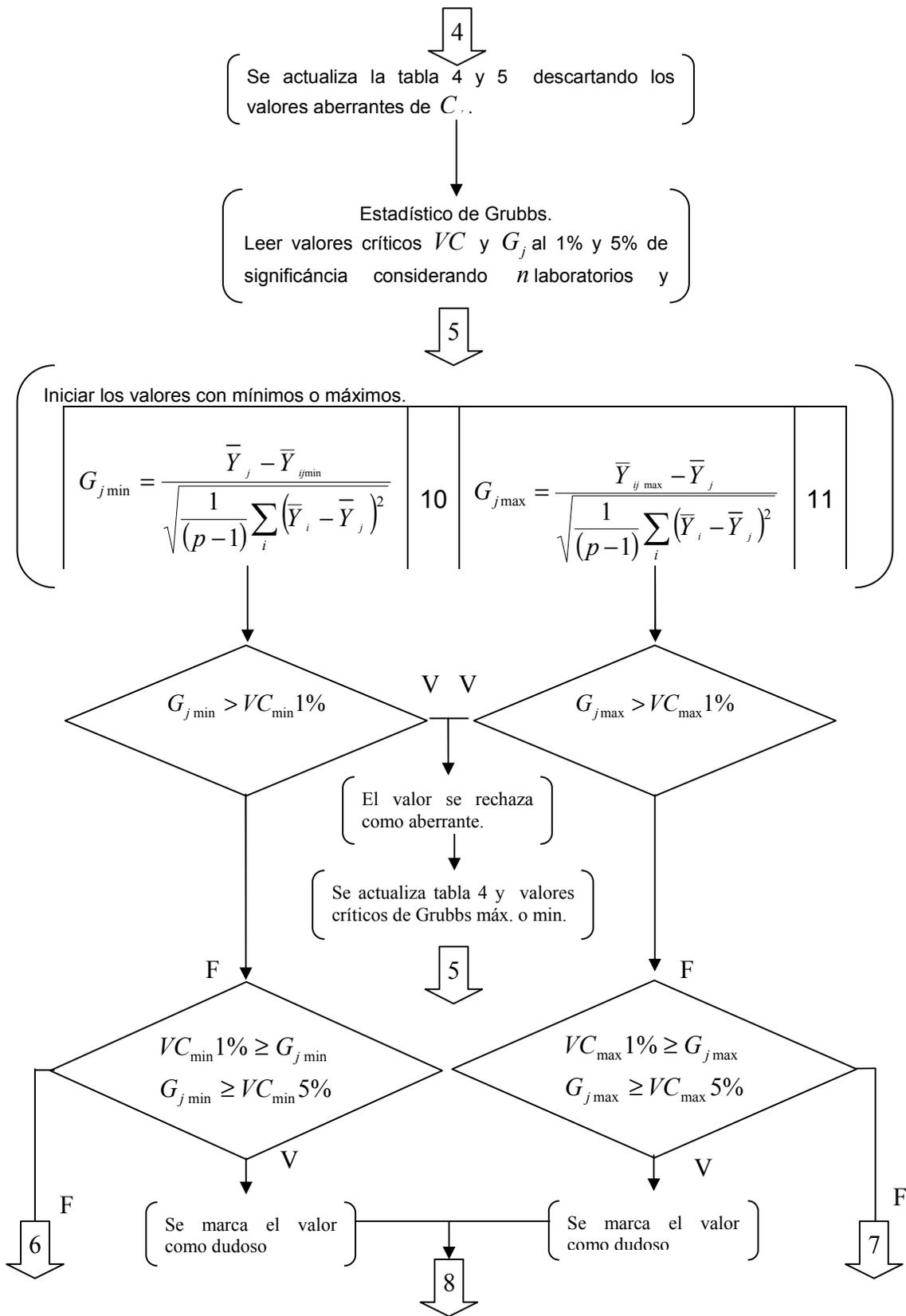
Leer valores críticos  $VC$  de  $h$  y  $k$  al 1% y 5% de significancia para  $p$  laboratorios y  $n$  replicas.



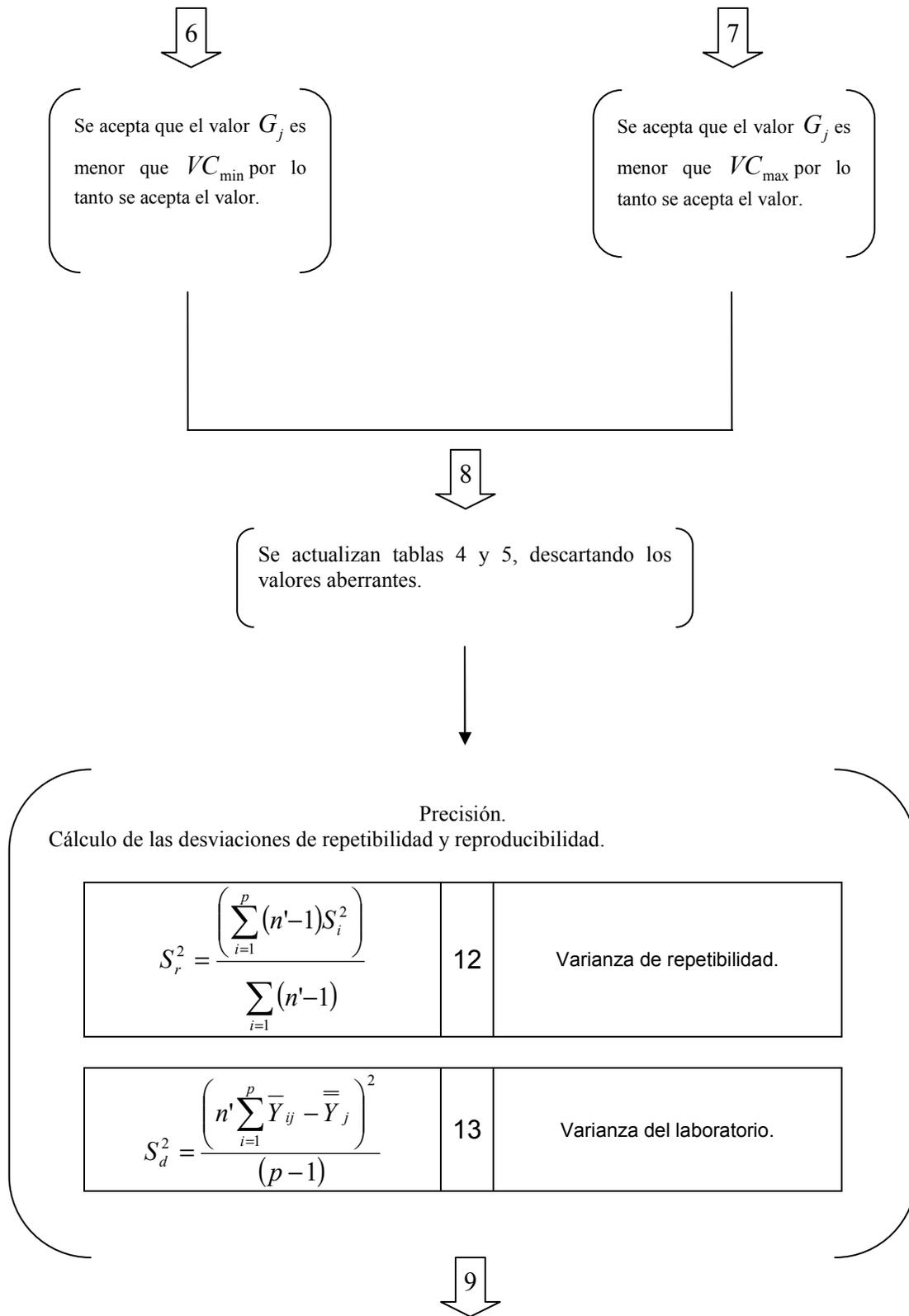
## ANEXO 4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL



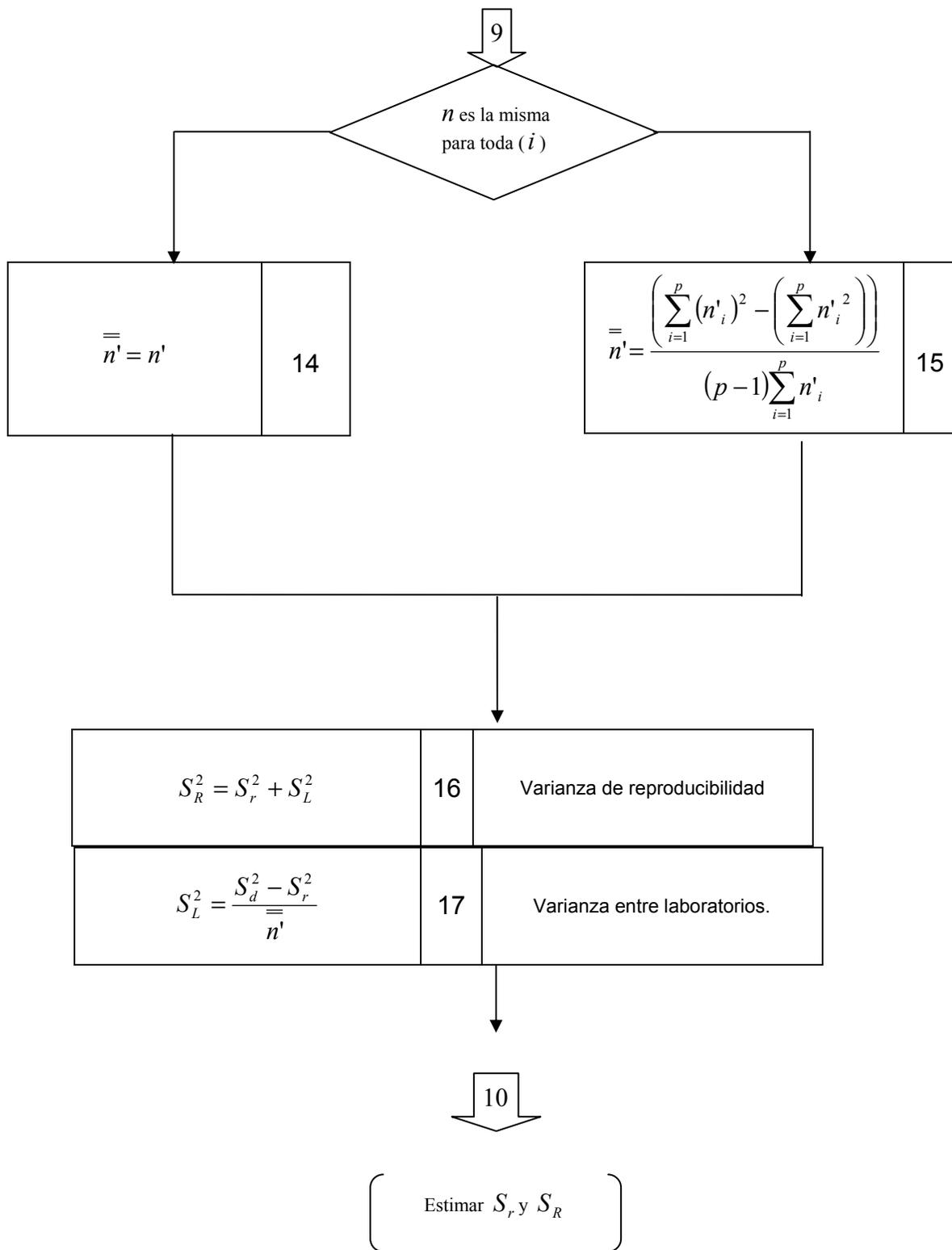
# ANEXO 4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL



## ANEXO 4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL



ANEXO 4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL



## ANEXO 4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

|  |    |  |
|--|----|--|
| Veracidad.   |    |  |
| $\gamma = \frac{S_R}{S_r}$                                 | 18 | Relación $r$ & $R$ Repetibilidad y Reproducibilidad. |
| BIAS (Sesgo)   |    |  |
| $\hat{\delta} = \bar{Y}_j - \mu_j$                         | 19 | $\mu_j$ = valor verdadero.<br>(teórico por nivel)    |
| $A = 1.95 \sqrt{\frac{n(\gamma^2 - 1) + 1}{\gamma^2 p_n}}$ | 20 |  |
| $A_{SR} = A \times SR$                                     | 21 |  |
| Incertidumbre del sesgo.                                   |    |  |
| $\hat{\delta} - A_{SR}$                                    | 22 |  |
| $\hat{\delta} + A_{SR}$                                    | 23 |  |

### A.4.4. Datos y resultados del algoritmo de evaluación del método de medición

Los valores de referencia aceptados para el gasto = 2.5 cm<sup>3</sup>/min, viscosidad agua bidestilada = 0.008046 cp, medio poroso = 1" Diam. x 2" long. y presión de confinamiento de 2000 psi, que fueron obtenidos a partir de la simulación numérica en los dos niveles son los siguientes:

Tabla A.4.1 Valor de referencia aceptado. Permeabilidad (mD)

| Niveles                             | 1. Difusor original | 2. Difusor propuesto |
|-------------------------------------|---------------------|----------------------|
| Valor de referencia aceptado K (mD) | 3.3087              | 3.2678               |

## ANEXO 4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

La siguiente tabla muestra los ensayos y valores de permeabilidad medidos en el EDF para el caso del difusor original.

Tabla A.4.2a Difusor original: Valores de permeabilidad medidos en el EDF.

| <b>Permeabilidad [mD]</b>         |            |            |            |            |            |
|-----------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Ensayos - Difusor original</b> |            |            |            |            |            |
| 1                                 | 2          | 3          | 4          | 5          | 6          |
| 3.76470228                        | 3.48057381 | 3.39516095 | 3.92490238 | 3.69012797 | 3.58033214 |
| 3.76470228                        | 3.50260275 | 3.41611874 | 3.89726222 | 3.66279369 | 3.55457436 |
| 3.71416936                        | 3.48057381 | 3.43733686 | 3.87000864 | 3.63586138 | 3.50415486 |
| 3.59357945                        | 3.48057381 | 3.43733686 | 3.84313358 | 3.60932225 | 3.47947771 |
| 3.54750792                        | 3.52491233 | 3.39516095 | 3.84313358 | 3.58316774 | 3.50415486 |
| 3.57039507                        | 3.45882022 | 3.41611874 | 3.84313358 | 3.58316774 | 3.50415486 |
| 3.59357945                        | 3.43733686 | 3.41611874 | 3.81662921 | 3.43386909 | 3.47947771 |
| 3.59357945                        | 3.43733686 | 3.41611874 | 3.84313358 | 3.43386909 | 3.4551457  |
| 3.50260275                        | 3.45882022 | 3.41611874 | 3.84313358 | 3.48223344 | 3.50415486 |
| 3.45882022                        | 3.43733686 | 3.41611874 | 3.84313358 | 3.45788216 | 3.53900466 |

Tabla A.4.2b Difusor propuesto: Valores de permeabilidad medidos en el EDF.

| <b>Permeabilidad [mD]</b>          |            |            |            |            |            |
|------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Ensayos - Difusor Propuesto</b> |            |            |            |            |            |
| 1                                  | 2          | 3          | 4          | 5          | 6          |
| 3.54750792                         | 3.41611874 | 3.45882022 | 3.45882022 | 3.746039   | 3.92131615 |
| 3.57039507                         | 3.35400749 | 3.37445875 | 3.41611874 | 3.7178733  | 3.92131615 |
| 3.66497507                         | 3.41611874 | 3.37445875 | 3.35400749 | 3.69012797 | 3.98456319 |
| 3.54750792                         | 3.41611874 | 3.39516095 | 3.41611874 | 3.55738956 | 4.08335401 |
| 3.50260275                         | 3.43733686 | 3.31383973 | 3.35400749 | 3.53197963 | 4.22295586 |
| 3.37445875                         | 3.39516095 | 3.35400749 | 3.35400749 | 3.50693013 | 4.11738196 |
| 3.37445875                         | 3.39516095 | 3.35400749 | 3.31383973 | 3.45788216 | 4.0498839  |
| 3.39516095                         | 3.35400749 | 3.37445875 | 3.27462269 | 3.53197963 | 4.11738196 |
| 3.39516095                         | 3.45882022 | 3.37445875 | 3.27462269 | 3.50693013 | 4.01695801 |
| 3.35400749                         | 3.48057381 | 3.43733686 | 3.27462269 | 3.53197963 | 4.12042868 |

## ANEXO 4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Tabla A.4.3. Valores de las medias de la permeabilidad medidas en el EDF en los dos niveles utilizados en este estudio de repetibilidad y reproducibilidad.

|          | Niveles    |            |
|----------|------------|------------|
|          | DO         | DP         |
| Ensayo 1 | 3.61036382 | 3.47262356 |
| Ensayo 2 | 3.46988875 | 3.4123424  |
| Ensayo 3 | 3.41617081 | 3.38110077 |
| Ensayo 4 | 3.85676039 | 3.3490788  |
| Ensayo 5 | 3.55722945 | 3.57791111 |
| Ensayo 6 | 3.51046317 | 4.05555399 |

Tabla A.4.4. Valores de las varianzas de la permeabilidad medidas en el EDF en los dos niveles utilizados en este estudio de repetibilidad y reproducibilidad.

|          | Niveles    |            |
|----------|------------|------------|
|          | DO         | DP         |
| Ensayo 1 | 0.01987755 | 0.02080316 |
| Ensayo 2 | 0.00157284 | 0.00297591 |
| Ensayo 3 | 0.00035577 | 0.00311382 |
| Ensayo 4 | 0.00183678 | 0.00779554 |
| Ensayo 5 | 0.01699558 | 0.01833656 |
| Ensayo 6 | 0.01987755 | 0.01665029 |

**Resultados de los valores de h**

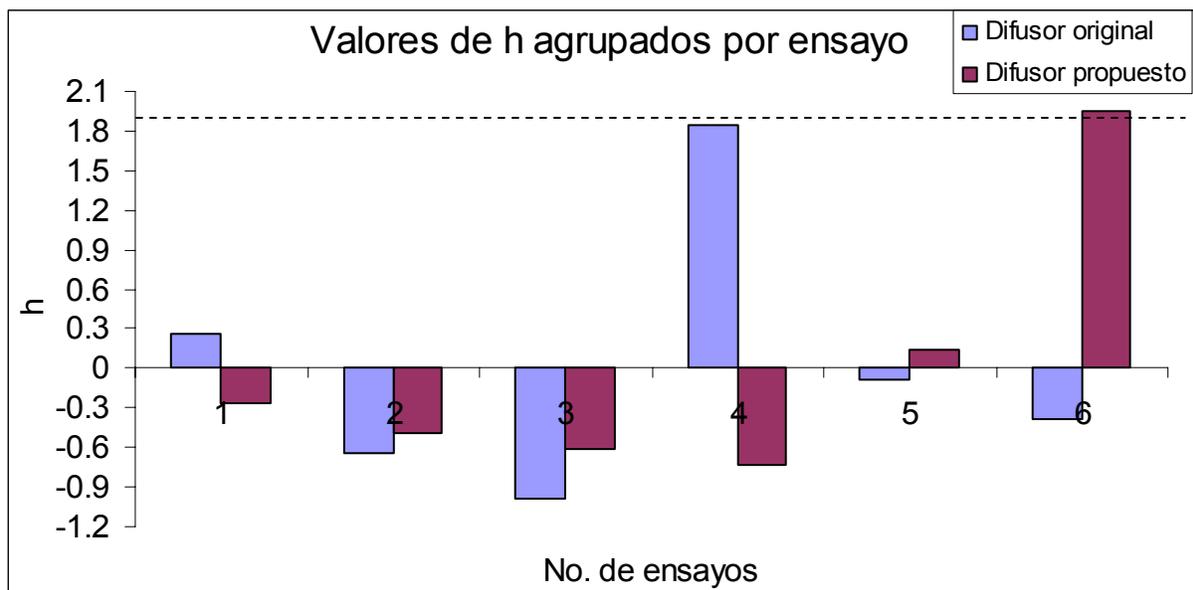


Figura. A.4.1 Gráfica Permeabilidad: valores h agrupados por pares de ensayos, valor de significancia 1% @ 1.87, 5% @ 1.66, la línea punteada indica el límite superior admisible para valores de h.

**Resultados de los valores de k**

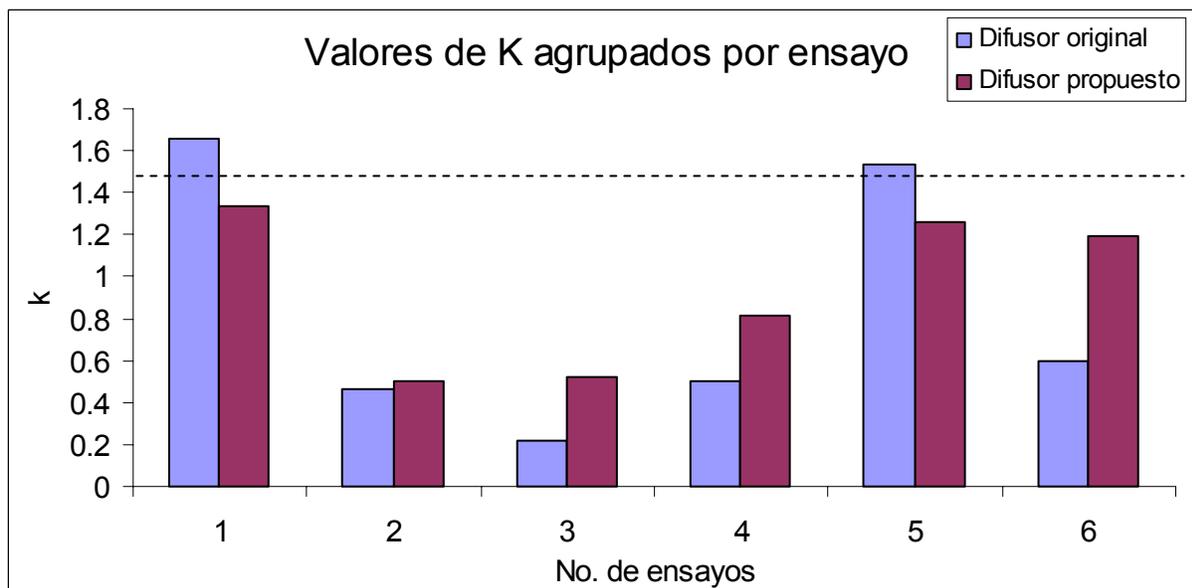


Figura. A.4.2. Gráfica Permeabilidad: valores k agrupados por pares de ensayos, valor de significancia 1% @ 1.47, 5% @ 1.33, la línea punteada indica el límite superior admisible para valores de k.

## ANEXO 4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

### Resultados de los valores de Cochran

Tabla A.4.5a. Los valores calculados cumplen con el criterio de selección de Cochran

|   |            |
|---|------------|
| <b>C estadístico de Cochran, 1% 0.676, 5% 0.600</b> |            |
| Nivel DO @ 4 ensayos, 10 replicas                   |            |
| DO  | Aberrantes |
| 0.40436934  | 0          |

Tabla A.4.5b. Los valores calculados cumplen con el criterio de selección de Cochran

|  |            |
|--|------------|
| <b>C estadístico de Cochran, 1% 0.520 5% 0.445</b> |            |
| Nivel DP @ 6 ensayos, 10 replicas                  |            |
| DP   | Aberrantes |
| 0.298573049  | 0          |

### Resultados de los valores de Grubbs

Tabla A.4.6a. Los valores calculados cumplen con el criterio de selección de Grubbs.

|  |            |
|--|------------|
| <b>Grubbs Máximos, 1%- 1.973, 5% 1.887</b> |            |
| Nivel DO @ 6 ensayos, 10 replica           |            |
| DO   | Aberrantes |
| 1.8404956                                  | 0          |

Tabla A.4.6b. Los valores calculados cumplen con el criterio de selección de Grubbs.

|  |            |
|--|------------|
| <b>Grubbs Máximos, 1%- 1.764, 5% 1.715</b> |            |
| Nivel DP @ 5 ensayos, 10 replicas          |            |
| DP   | Aberrantes |
| 1.5436157                                  | 0          |

## ANEXO 4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Estimación de las desviaciones típicas de repetibilidad, reproducibilidad y del sesgo de medición:

Tabla A.4.7. Resultados de permeabilidad experimentales vs. simulación numérica.

| Difusor   | Gasto [cc/min] | Caso         | Caída Presión [psi] | Permeabilidad [mD] | Volumen Muerto % | Volumen Pistón % | VM/VP % | TCAL    | VARO   | Dispersión Axial |
|-----------|----------------|--------------|---------------------|--------------------|------------------|------------------|---------|---------|--------|------------------|
| Original  | 2.5            | Experimental | 139.64              | 3.5417             | 0.2109           | 0.356            | 0.432   | 449.32  | 0.3930 | 0.1965           |
| Original  | 2.5            | Simulación   | 138.88              | 3.5576             | 0.3458           | 0.0896           | 0.5646  | 66.9378 | 0.6098 | 0.3049           |
| Prototipo | 2.5            | Simulación   | 138.66              | 3.5633             | 0.3129           | 0.1336           | 0.5535  | 22.459  | 0.7774 | 0.3887           |

Tabla A.4.8. Permeabilidad: Estimación de las desviaciones típicas de repetibilidad y reproducibilidad, así como el sesgo del método de medición.

|  |                 | Niveles       |               |
|--|-----------------|---------------|---------------|
|  |                 | DO            | DP            |
| Varianza de repetibilidad                      | $Sr^2$          | 0.00075308    | 0.01161255    |
| Desviación típica de repetibilidad             | $Sr$            | 0.02744227    | 0.10776152    |
| Varianza de los campos de velocidades          | $Sd^2$          | 2.42508071    | 0.81437142    |
| Varianza entre los campos de velocidades       | $SL^2$          | 0.24243276    | 0.08027589    |
| Número de réplicas                             | $n'$            | 10            | 10            |
| Varianza de reproducibilidad                   | $SR^2$          | 0.24318584    | 0.09188843    |
| Desviación típica de reproducibilidad          | $SR$            | 0.49313877    | 0.30313105    |
| Veracidad (relación entre $Sr$ y $SR$ )        | $\gamma$        | 17.9700418    | 2.81298034    |
|  | $A$             | 0.87085042    | 0.7494451     |
|  | $A*SR$          | 0.4294501     | 0.22718008    |
| Sesgo  | $\delta'$       | 0.26144607    | 0.17081133    |
| Incertidumbre del sesgo                        | $\delta' - ASR$ | -0.16800403   | -0.05636875   |
|  | $\delta' + ASR$ | 0.69089617    | 0.39799141    |
| Valor medido (promedio de promedios por nivel) | $\bar{y}$       | <b>3.92</b>   | <b>3.4386</b> |
| Valor verdadero (teórico por nivel)            | $\mu'$          | <b>3.3087</b> | <b>3.2678</b> |

**Gráficas de la repetibilidad y reproducibilidad**

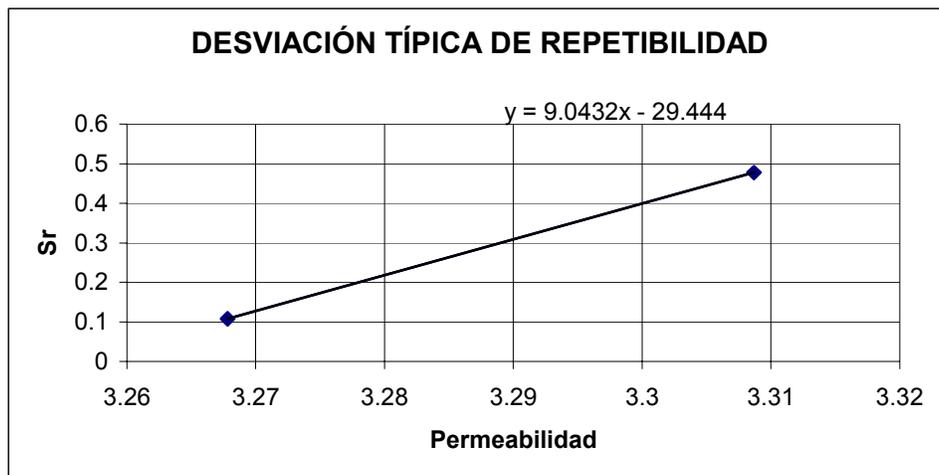


Figura. A.4.3. Gráfica Permeabilidad: Desviaciones típicas de repetibilidad.

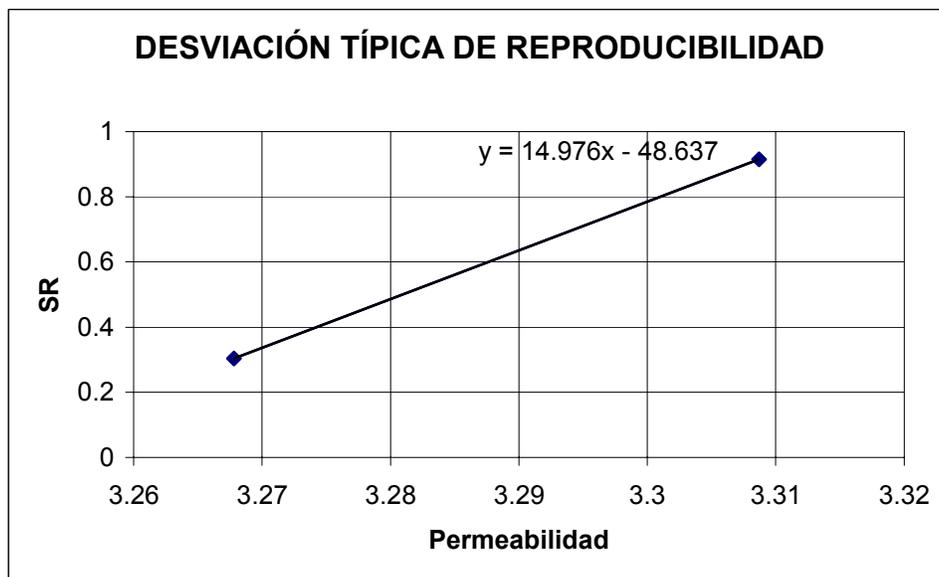


Figura. A.4.4. Gráfica Permeabilidad: Desviaciones típicas de reproducibilidad.

### A.4.5. Discusión de resultados

- Para el análisis de Mendel se descartaron únicamente los valores aberrantes mayores al 1% de significancia, para h 1.87 y k 1.47, es decir los datos correspondientes al nivel DP del ensayo 6; del nivel DO también se descartaron el ensayo 1 y 5; ver la gráfica A.4.1 y A.4.2.
- Al llevar a cabo el análisis estadístico de Cochran no se descarto ningún dato; ver las tablas A.5a y A.5b.
- El análisis estadístico de Grubbs tampoco descarto ningún dato; ver las tablas A.6a y A.6b.

### A.4.6. Precisión y veracidad

La veracidad del método de medición del EDF con respecto al mensurado de permeabilidad, se evaluó bajo el intervalos de confianza del 95% del sesgo, en dos niveles o configuraciones geométricas (difusor original “DO” y difusor prototipo “DP”), que actúan sobre el mismo medio poroso a las mismas condiciones de medición planteadas al inicio. Estos intervalos de confianza cubren el valor cero. El sesgo del método de medición del EDF es despreciable para las dos configuraciones geométricas. Los valores de Sr y SR pequeños nos indican que el método de medición es repetible y reproducible.

### A.4.7. Recomendaciones

Debido a limitaciones de disponibilidad del EDF, no fue posible llevar a cabo un mayor número de experimentaciones para encontrar el factor de corrimiento que existe entre las curvas de DTR obtenidas experimentalmente con respecto a las obtenidas numéricamente, véase tabla A.4.7, lo cual resultaría benéfico para el Laboratorio de perforación pudiendo ofrecer un análisis predictivo a un menor tiempo y costo. Por lo es recomendable que el área de interés le de seguimiento a este trabajo encontrando el factor de corrimiento.

ANEXO 4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Tabla A 4.9. Indicadores de Mandel h y k al 1 % de significancia.

| <i>p</i> | <i>h</i> | <i>K</i> |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------|----------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|          |          | <i>N</i> |      |      |      |      |      |      |      |      |
|          |          | 2        | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
| 3        | 1.15     | 1.71     | 1.64 | 1.58 | 1.53 | 1.49 | 1.46 | 1.43 | 1.41 | 1.39 |
| 4        | 1.49     | 1.91     | 1.77 | 1.67 | 1.60 | 1.55 | 1.51 | 1.48 | 1.45 | 1.43 |
| 5        | 1.72     | 2.05     | 1.85 | 1.73 | 1.66 | 1.59 | 1.55 | 1.51 | 1.48 | 1.46 |
| 6        | 1.87     | 2.14     | 1.90 | 1.77 | 1.68 | 1.62 | 1.57 | 1.53 | 1.50 | 1.47 |
| 7        | 1.98     | 2.20     | 1.94 | 1.79 | 1.70 | 1.63 | 1.58 | 1.54 | 1.51 | 1.48 |
| 8        | 2.06     | 2.25     | 1.97 | 1.81 | 1.71 | 1.65 | 1.59 | 1.55 | 1.52 | 1.49 |
| 9        | 2.13     | 2.29     | 1.99 | 1.82 | 1.73 | 1.66 | 1.60 | 1.56 | 1.53 | 1.50 |
| 10       | 2.18     | 2.32     | 2.00 | 1.84 | 1.74 | 1.66 | 1.61 | 1.57 | 1.53 | 1.50 |
| 11       | 2.22     | 2.34     | 2.01 | 1.85 | 1.75 | 1.67 | 1.62 | 1.57 | 1.54 | 1.51 |
| 12       | 2.25     | 2.36     | 2.02 | 1.85 | 1.75 | 1.68 | 1.62 | 1.58 | 1.54 | 1.51 |
| 13       | 2.27     | 2.38     | 2.03 | 1.86 | 1.76 | 1.68 | 1.63 | 1.58 | 1.55 | 1.52 |
| 14       | 2.30     | 2.38     | 2.04 | 1.87 | 1.76 | 1.69 | 1.63 | 1.58 | 1.55 | 1.52 |
| 15       | 2.32     | 2.41     | 2.05 | 1.87 | 1.76 | 1.69 | 1.63 | 1.59 | 1.55 | 1.52 |
| 16       | 2.33     | 2.42     | 2.05 | 1.88 | 1.77 | 1.69 | 1.63 | 1.59 | 1.55 | 1.52 |
| 17       | 2.35     | 2.44     | 2.06 | 1.88 | 1.77 | 1.69 | 1.64 | 1.59 | 1.56 | 1.52 |
| 18       | 2.36     | 2.44     | 2.06 | 1.88 | 1.77 | 1.70 | 1.64 | 1.59 | 1.56 | 1.52 |
| 19       | 2.37     | 2.44     | 2.07 | 1.88 | 1.78 | 1.70 | 1.64 | 1.59 | 1.56 | 1.53 |
| 20       | 2.39     | 2.45     | 2.07 | 1.89 | 1.78 | 1.70 | 1.64 | 1.60 | 1.56 | 1.53 |
| 21       | 2.39     | 2.46     | 2.07 | 1.89 | 1.78 | 1.70 | 1.64 | 1.60 | 1.56 | 1.53 |
| 22       | 2.40     | 2.46     | 2.08 | 1.90 | 1.78 | 1.70 | 1.65 | 1.60 | 1.56 | 1.53 |
| 23       | 2.41     | 2.47     | 2.08 | 1.90 | 1.78 | 1.71 | 1.65 | 1.60 | 1.56 | 1.53 |
| 24       | 2.42     | 2.47     | 2.08 | 1.90 | 1.79 | 1.71 | 1.65 | 1.60 | 1.56 | 1.53 |
| 25       | 2.42     | 2.47     | 2.08 | 1.90 | 1.79 | 1.71 | 1.65 | 1.60 | 1.56 | 1.53 |
| 26       | 2.43     | 2.48     | 2.08 | 1.90 | 1.79 | 1.71 | 1.65 | 1.60 | 1.56 | 1.53 |
| 27       | 2.44     | 2.48     | 2.09 | 1.90 | 1.79 | 1.71 | 1.65 | 1.60 | 1.56 | 1.53 |
| 28       | 2.44     | 2.49     | 2.09 | 1.91 | 1.79 | 1.71 | 1.65 | 1.60 | 1.57 | 1.53 |
| 29       | 2.45     | 2.49     | 2.09 | 1.91 | 1.79 | 1.71 | 1.65 | 1.60 | 1.57 | 1.53 |
| 30       | 2.45     | 2.49     | 2.10 | 1.91 | 1.79 | 1.71 | 1.65 | 1.60 | 1.57 | 1.53 |

*p* = número total de pruebas permeabilidad en un nivel dado.  
*n* = Número de replicas por prueba de permeabilidad en el mismo nivel.

ANEXO 4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Tabla A 4.10. Tabla de los indicadores de Mandel h y k al 5% de significancia.

| <i>p</i> | <i>h</i> | <i>k</i> |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------|----------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|          |          | <i>n</i> |      |      |      |      |      |      |      |      |
|          |          | 2        | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
| 3        | 1.16     | 1.65     | 1.53 | 1.45 | 1.40 | 1.37 | 1.34 | 1.32 | 1.30 | 1.29 |
| 4        | 1.42     | 1.76     | 1.59 | 1.50 | 1.44 | 1.40 | 1.37 | 1.35 | 1.33 | 1.31 |
| 5        | 1.57     | 1.81     | 1.62 | 1.53 | 1.46 | 1.42 | 1.38 | 1.36 | 1.34 | 1.32 |
| 6        | 1.66     | 1.85     | 1.64 | 1.54 | 1.48 | 1.43 | 1.40 | 1.37 | 1.35 | 1.33 |
| 7        | 1.71     | 1.87     | 1.66 | 1.55 | 1.49 | 1.44 | 1.41 | 1.38 | 1.36 | 1.34 |
| 8        | 1.75     | 1.88     | 1.67 | 1.56 | 1.50 | 1.45 | 1.41 | 1.38 | 1.36 | 1.34 |
| 9        | 1.78     | 1.90     | 1.68 | 1.57 | 1.50 | 1.45 | 1.42 | 1.39 | 1.36 | 1.35 |
| 10       | 1.80     | 1.90     | 1.68 | 1.57 | 1.50 | 1.46 | 1.42 | 1.39 | 1.37 | 1.35 |
| 11       | 1.82     | 1.91     | 1.69 | 1.58 | 1.51 | 1.46 | 1.42 | 1.39 | 1.37 | 1.35 |
| 12       | 1.83     | 1.92     | 1.69 | 1.58 | 1.51 | 1.46 | 1.42 | 1.40 | 1.37 | 1.35 |
| 13       | 1.84     | 1.92     | 1.69 | 1.58 | 1.51 | 1.46 | 1.43 | 1.40 | 1.37 | 1.35 |
| 14       | 1.85     | 1.92     | 1.70 | 1.59 | 1.52 | 1.47 | 1.43 | 1.40 | 1.37 | 1.35 |
| 15       | 1.86     | 1.93     | 1.70 | 1.59 | 1.52 | 1.47 | 1.43 | 1.40 | 1.38 | 1.36 |
| 16       | 1.86     | 1.93     | 1.70 | 1.59 | 1.52 | 1.47 | 1.43 | 1.40 | 1.38 | 1.36 |
| 17       | 1.87     | 1.93     | 1.70 | 1.59 | 1.52 | 1.47 | 1.43 | 1.40 | 1.38 | 1.36 |
| 18       | 1.88     | 1.93     | 1.71 | 1.59 | 1.52 | 1.47 | 1.43 | 1.40 | 1.38 | 1.36 |
| 19       | 1.89     | 1.93     | 1.71 | 1.59 | 1.52 | 1.47 | 1.43 | 1.40 | 1.38 | 1.36 |
| 20       | 1.89     | 1.94     | 1.71 | 1.59 | 1.52 | 1.47 | 1.43 | 1.40 | 1.38 | 1.36 |
| 21       | 1.89     | 1.94     | 1.71 | 1.60 | 1.52 | 1.47 | 1.44 | 1.41 | 1.38 | 1.36 |
| 22       | 1.89     | 1.94     | 1.71 | 1.60 | 1.52 | 1.47 | 1.44 | 1.41 | 1.38 | 1.36 |
| 23       | 1.90     | 1.94     | 1.71 | 1.60 | 1.53 | 1.47 | 1.44 | 1.41 | 1.38 | 1.36 |
| 24       | 1.90     | 1.94     | 1.71 | 1.60 | 1.53 | 1.48 | 1.44 | 1.41 | 1.38 | 1.36 |
| 25       | 1.90     | 1.94     | 1.71 | 1.60 | 1.53 | 1.48 | 1.44 | 1.41 | 1.38 | 1.36 |
| 26       | 1.90     | 1.94     | 1.71 | 1.60 | 1.53 | 1.48 | 1.44 | 1.41 | 1.38 | 1.36 |
| 27       | 1.91     | 1.94     | 1.71 | 1.60 | 1.53 | 1.48 | 1.44 | 1.41 | 1.38 | 1.36 |
| 28       | 1.91     | 1.94     | 1.71 | 1.60 | 1.53 | 1.48 | 1.44 | 1.41 | 1.38 | 1.36 |
| 29       | 1.91     | 1.94     | 1.72 | 1.60 | 1.53 | 1.48 | 1.44 | 1.41 | 1.38 | 1.36 |
| 30       | 1.91     | 1.94     | 1.72 | 1.60 | 1.53 | 1.48 | 1.44 | 1.41 | 1.38 | 1.36 |

*p* = número total de pruebas permeabilidad en un nivel dado.  
*n* = Número de replicas por prueba de permeabilidad en el mismo nivel.

ANEXO 4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Tabla A. 4.11. Tabla de los indicadores de Cochran al 1% y 5% de significancia.

| <i>p</i> | <i>n</i> = 2 |       | <i>n</i> = 3 |       | <i>n</i> = 4 |       | <i>n</i> = 5 |       | <i>n</i> = 6 |       |
|----------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|
|          | 1%           | 5%    | 1%           | 5%    | 1%           | 5%    | 1%           | 5%    | 1%           | 5%    |
| 2        | -            | -     | 0.995        | 0.975 | 0.979        | 0.939 | 0.959        | 0.906 | 0.937        | 0.877 |
| 3        | 0.993        | 0.967 | 0.942        | 0.871 | 0.883        | 0.788 | 0.934        | 0.746 | 0.793        | 0.702 |
| 4        | 0.968        | 0.906 | 0.864        | 0.768 | 0.781        | 0.684 | 0.721        | 0.629 | 0.676        | 0.600 |
| 5        | 0.926        | 0.841 | 0.788        | 0.684 | 0.696        | 0.668 | 0.633        | 0.544 | 0.698        | 0.506 |
| 6        | 0.883        | 0.781 | 0.722        | 0.616 | 0.626        | 0.632 | 0.564        | 0.488 | 0.520        | 0.445 |
| 7        | 0.838        | 0.727 | 0.664        | 0.581 | 0.568        | 0.480 | 0.506        | 0.431 | 0.466        | 0.397 |
| 8        | 0.794        | 0.686 | 0.618        | 0.516 | 0.521        | 0.438 | 0.463        | 0.391 | 0.423        | 0.360 |
| 9        | 0.754        | 0.638 | 0.573        | 0.478 | 0.481        | 0.403 | 0.425        | 0.358 | 0.387        | 0.329 |
| 10       | 0.718        | 0.602 | 0.536        | 0.445 | 0.447        | 0.373 | 0.393        | 0.331 | 0.357        | 0.303 |
| 11       | 0.684        | 0.570 | 0.504        | 0.417 | 0.418        | 0.348 | 0.386        | 0.308 | 0.332        | 0.281 |
| 12       | 0.653        | 0.541 | 0.475        | 0.392 | 0.392        | 0.326 | 0.343        | 0.288 | 0.310        | 0.262 |
| 13       | 0.624        | 0.516 | 0.480        | 0.371 | 0.369        | 0.307 | 0.322        | 0.271 | 0.291        | 0.243 |
| 14       | 0.599        | 0.492 | 0.427        | 0.352 | 0.349        | 0.291 | 0.304        | 0.255 | 0.274        | 0.232 |
| 15       | 0.575        | 0.471 | 0.407        | 0.335 | 0.332        | 0.276 | 0.288        | 0.242 | 0.259        | 0.220 |
| 16       | 0.553        | 0.452 | 0.388        | 0.318 | 0.316        | 0.262 | 0.274        | 0.230 | 0.246        | 0.208 |
| 17       | 0.532        | 0.434 | 0.372        | 0.305 | 0.301        | 0.250 | 0.261        | 0.218 | 0.234        | 0.198 |
| 18       | 0.514        | 0.418 | 0.356        | 0.293 | 0.288        | 0.240 | 0.249        | 0.209 | 0.223        | 0.189 |
| 19       | 0.496        | 0.403 | 0.343        | 0.281 | 0.278        | 0.230 | 0.238        | 0.200 | 0.214        | 0.181 |
| 20       | 0.480        | 0.389 | 0.330        | 0.270 | 0.265        | 0.220 | 0.229        | 0.192 | 0.205        | 0.174 |
| 21       | 0.466        | 0.377 | 0.318        | 0.261 | 0.256        | 0.212 | 0.220        | 0.185 | 0.197        | 0.167 |
| 22       | 0.450        | 0.365 | 0.307        | 0.252 | 0.248        | 0.204 | 0.212        | 0.178 | 0.189        | 0.160 |
| 23       | 0.437        | 0.354 | 0.297        | 0.243 | 0.238        | 0.197 | 0.204        | 0.172 | 0.182        | 0.155 |
| 24       | 0.426        | 0.343 | 0.287        | 0.236 | 0.230        | 0.191 | 0.197        | 0.166 | 0.176        | 0.149 |
| 25       | 0.413        | 0.334 | 0.278        | 0.228 | 0.222        | 0.185 | 0.190        | 0.160 | 0.170        | 0.144 |
| 26       | 0.402        | 0.325 | 0.270        | 0.221 | 0.216        | 0.178 | 0.184        | 0.155 | 0.164        | 0.140 |
| 27       | 0.391        | 0.316 | 0.262        | 0.216 | 0.209        | 0.173 | 0.178        | 0.150 | 0.159        | 0.135 |
| 28       | 0.382        | 0.308 | 0.255        | 0.209 | 0.202        | 0.168 | 0.173        | 0.146 | 0.154        | 0.131 |
| 29       | 0.372        | 0.300 | 0.248        | 0.203 | 0.196        | 0.164 | 0.168        | 0.142 | 0.150        | 0.129 |
| 30       | 0.363        | 0.293 | 0.241        | 0.198 | 0.191        | 0.159 | 0.164        | 0.138 | 0.145        | 0.124 |
| 31       | 0.355        | 0.286 | 0.235        | 0.193 | 0.186        | 0.155 | 0.159        | 0.134 | 0.141        | 0.120 |
| 32       | 0.347        | 0.280 | 0.229        | 0.188 | 0.181        | 0.151 | 0.156        | 0.131 | 0.138        | 0.117 |
| 33       | 0.339        | 0.273 | 0.224        | 0.184 | 0.177        | 0.147 | 0.151        | 0.127 | 0.134        | 0.114 |
| 34       | 0.332        | 0.267 | 0.218        | 0.178 | 0.172        | 0.144 | 0.147        | 0.124 | 0.131        | 0.111 |
| 35       | 0.325        | 0.262 | 0.213        | 0.176 | 0.168        | 0.140 | 0.144        | 0.121 | 0.127        | 0.108 |
| 36       | 0.318        | 0.256 | 0.208        | 0.172 | 0.165        | 0.137 | 0.140        | 0.118 | 0.124        | 0.106 |
| 37       | 0.312        | 0.251 | 0.204        | 0.166 | 0.161        | 0.134 | 0.137        | 0.116 | 0.121        | 0.103 |
| 38       | 0.306        | 0.246 | 0.200        | 0.164 | 0.157        | 0.131 | 0.134        | 0.113 | 0.118        | 0.101 |
| 39       | 0.300        | 0.242 | 0.196        | 0.161 | 0.154        | 0.129 | 0.131        | 0.111 | 0.116        | 0.098 |
| 40       | 0.294        | 0.237 | 0.192        | 0.158 | 0.151        | 0.126 | 0.128        | 0.108 | 0.114        | 0.092 |

*p* = número total de pruebas permeabilidad en un nivel dado.  
*n* = Número de replicas por prueba de permeabilidad en el mismo nivel.

ANEXO 4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Tabla A. 4.12. Tabla de los indicadores de Grubb al 1% y 5% de significancia.

| $p$ | máximo o mínimo |             | dos máximos o dos mínimos |             |
|-----|-----------------|-------------|---------------------------|-------------|
|     | Superior 1%     | Superior 5% | Inferior 1%               | Inferior 5% |
| 3   | 1.155           | 1.155       | -----                     | -----       |
| 4   | 1.496           | 1.484       | 0.000 0                   | 0.000 2     |
| 5   | 1.764           | 1.715       | 0.001 8                   | 0.000 0     |
| 6   | 1.973           | 1.887       | 0.011 6                   | 0.034 9     |
| 7   | 2.139           | 2.020       | 0.030 8                   | 0.070 8     |
| 8   | 2.274           | 2.126       | 0.056 3                   | 0.130 1     |
| 9   | 2.387           | 2.215       | 0.085 1                   | 0.149 2     |
| 10  | 2.482           | 2.280       | 0.115 8                   | 0.186 4     |
| 11  | 2.504           | 2.355       | 0.144 6                   | 0.221 3     |
| 12  | 2.636           | 2.412       | 0.173 8                   | 0.253 7     |
| 13  | 2.699           | 2.462       | 0.201 6                   | 0.283 6     |
| 14  | 2.755           | 2.507       | 0.228 0                   | 0.313 2     |
| 15  | 2.806           | 2.549       | 0.253 0                   | 0.336 7     |
| 16  | 2.852           | 2.565       | 0.276 7                   | 0.360 3     |
| 17  | 2.884           | 2.620       | 0.298 0                   | 0.382 2     |
| 18  | 2.932           | 2.651       | 0.320 0                   | 0.402 5     |
| 19  | 2.968           | 2.681       | 0.339 6                   | 0.421 4     |
| 20  | 3.001           | 2.709       | 0.358 6                   | 0.439 3     |
| 21  | 3.031           | 2.733       | 0.370 1                   | 0.455 6     |
| 22  | 3.060           | 2.758       | 0.392 7                   | 0.471 1     |
| 23  | 3.087           | 2.781       | 0.408 5                   | 0.485 7     |
| 24  | 3.112           | 2.802       | 0.423 4                   | 0.499 4     |
| 25  | 3.135           | 2.822       | 0.437 6                   | 0.512 3     |
| 26  | 3.157           | 2.843       | 0.451 0                   | 0.524 5     |
| 27  | 3.178           | 2.859       | 0.463 8                   | 0.536 0     |
| 28  | 3.199           | 2.876       | 0.475 9                   | 0.547 0     |
| 29  | 3.218           | 2.893       | 0.487 5                   | 0.557 4     |
| 30  | 3.236           | 2.908       | 0.498 5                   | 0.567 2     |
| 31  | 3.253           | 2.924       | 0.508 1                   | 0.576 0     |
| 32  | 3.270           | 2.938       | 0.518 2                   | 0.585 6     |
| 33  | 3.286           | 2.952       | 0.528 8                   | 0.594 1     |
| 34  | 3.301           | 2.966       | 0.538 3                   | 0.602 3     |
| 35  | 3.318           | 2.979       | 0.546 9                   | 0.610 1     |
| 36  | 3.330           | 2.993       | 0.555 4                   | 0.617 6     |
| 37  | 3.343           | 3.003       | 0.563 8                   | 0.624 7     |
| 38  | 3.356           | 3.014       | 0.573 4                   | 0.631 6     |
| 39  | 3.369           | 3.025       | 0.578 9                   | 0.638 2     |
| 40  | 3.381           | 3.036       | 0.586 2                   | 0.644 5     |

$p$  = número total de pruebas permeabilidad en un nivel dado.  
 $n$  = Número de replicas por prueba de permeabilidad en el mismo nivel.

ANEXO 5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA FRACCIÓN MASA CON RESPECTO AL TIEMPO PARA LOS CASOS EN QUE LA GEOMETRÍA EMPLEADA FUE CON RESPECTO AL DIFUSOR 1.

Tabla A. 5.1.Resultados de la situación numérica caso: difusor 1.

| Histórico de la fracción masa de trazador para los casos en que se simulo con el Difusor 1 |                      |               |                      |               |                      |               |                      |
|--|----------------------|---------------|----------------------|---------------|----------------------|---------------|----------------------|
| Caso 2/16"-1A  |                      | Caso 1/16"-1B |                      | Caso 3/16"-1C |                      | Caso 1/32"-1D |                      |
| Tiempo [min]   | Concentración [gr/l] | Tiempo [min]  | Concentración [gr/l] | Tiempo [min]  | Concentración [gr/l] | Tiempo [min]  | Concentración [gr/l] |
| 0  | 0                    | 0             | 0                    | 0             | 0                    | 0             | 0                    |
| 1  | 0.007107207          | 1             | 0.001555366          | 1             | 0.003698094          | 1             | 0.000100005          |
| 2  | 0.007860766          | 2             | 0.001549012          | 2             | 0.004893358          | 2             | 8.74677E-05          |
| 3  | 0.021322586          | 3             | 0.004612199          | 3             | 0.016008416          | 3             | 0.000210047          |
| 4  | 0.037185241          | 4             | 0.008452599          | 4             | 0.032055501          | 4             | 0.000382003          |
| 5  | 0.054106802          | 5             | 0.013034815          | 5             | 0.051985171          | 5             | 0.000574665          |
| 6  | 0.07110364           | 6             | 0.018177342          | 6             | 0.096514024          | 6             | 0.000788515          |
| 7  | 0.081586763          | 7             | 0.022236682          | 7             | 0.096138179          | 7             | 0.000931507          |
| 8  | 0.085766003          | 8             | 0.02549262           | 8             | 0.11262602           | 8             | 0.001034815          |
| 9  | 0.086667277          | 9             | 0.027972465          | 9             | 0.12439064           | 9             | 0.001113672          |
| 10   | 0.086116016          | 10            | 0.029710839          | 10            | 0.13189736           | 10            | 0.001176692          |
| 11   | 0.084952623          | 11            | 0.030889893          | 11            | 0.13595054           | 11            | 0.001243903          |
| 12   | 0.083556689          | 12            | 0.031638213          | 12            | 0.13744979           | 12            | 0.001290419          |
| 13   | 0.082127199          | 13            | 0.032091375          | 13            | 0.13717307           | 13            | 0.001320112          |
| 14   | 0.080652863          | 14            | 0.03233188           | 14            | 0.13568985           | 14            | 0.001352731          |
| 15   | 0.079221137          | 15            | 0.032430138          | 15            | 0.13342321           | 15            | 0.001365032          |
| 16   | 0.077808991          | 16            | 0.032434605          | 16            | 0.13066758           | 16            | 0.001373923          |
| 17   | 0.076440603          | 17            | 0.032373864          | 17            | 0.12758854           | 17            | 0.001388675          |
| 18   | 0.075104207          | 18            | 0.032266688          | 18            | 0.12436356           | 18            | 0.001401262          |
| 19   | 0.07377097           | 19            | 0.032132994          | 19            | 0.12105066           | 19            | 0.001405683          |
| 20   | 0.072489873          | 20            | 0.031979073          | 20            | 0.11771717           | 20            | 0.0014227            |
| 21   | 0.071234427          | 21            | 0.03181253           | 21            | 0.11443714           | 21            | 0.001426311          |
| 22   | 0.070009232          | 22            | 0.031636726          | 22            | 0.1112164            | 22            | 0.001436126          |
| 23   | 0.068792373          | 23            | 0.031456247          | 23            | 0.10805204           | 23            | 0.001444665          |
| 24   | 0.067597702          | 24            | 0.031273067          | 24            | 0.10500729           | 24            | 0.001474188          |
| 25   | 0.066419102          | 25            | 0.031088475          | 25            | 0.10200637           | 25            | 0.001483864          |
| 26   | 0.065262973          | 26            | 0.030902332          | 26            | 0.099135861          | 26            | 0.001509746          |
| 27   | 0.06413807           | 27            | 0.030716645          | 27            | 0.096334636          | 27            | 0.00151949           |
| 28   | 0.063028261          | 28            | 0.030531669          | 28            | 0.093612723          | 28            | 0.001528945          |
| 29   | 0.061942097          | 29            | 0.030347927          | 29            | 0.091010921          | 29            | 0.001538719          |
| 30   | 0.060878549          | 30            | 0.030165792          | 30            | 0.088475049          | 30            | 0.001557649          |
| 31   | 0.059837431          | 31            | 0.029986802          | 31            | 0.086029299          | 31            | 0.00156926           |
| 32   | 0.058818012          | 32            | 0.029807458          | 32            | 0.083665699          | 32            | 0.001580464          |
| 33   | 0.057819206          | 33            | 0.029630151          | 33            | 0.081365876          | 34            | 0.001599166          |
| 34   | 0.056841049          | 34            | 0.029455198          | 34            | 0.079153508          | 35            | 0.001608415          |
| 35   | 0.055883896          | 35            | 0.029281987          | 35            | 0.077028103          | 36            | 0.00161607           |
| 36   | 0.054946721          | 36            | 0.029110512          | 36            | 0.074941665          | 37            | 0.001616553          |
| 37   | 0.054028761          | 37            | 0.028940946          | 37            | 0.072950587          | 38            | 0.001626831          |
| 38   | 0.053129431          | 38            | 0.028773084          | 38            | 0.070997             | 39            | 0.001627391          |
| 39   | 0.052249398          | 39            | 0.028607057          | 39            | 0.06913317           | 40            | 0.001640588          |
| 40   | 0.051387891          | 40            | 0.028442713          | 40            | 0.067304052          | 41            | 0.001674511          |

ANEXO 5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA FRACCIÓN MASA CON RESPECTO AL TIEMPO PARA LOS CASOS EN QUE LA GEOMETRÍA EMPLEADA FUE CON RESPECTO AL DIFUSOR 1.

| Caso 2/16"-1A |                      | Caso 1/16"-1B |                      | Caso 3/16"-1C |                      | Caso 1/32"-1D |                      |
|---------------|----------------------|---------------|----------------------|---------------|----------------------|---------------|----------------------|
| Tiempo [min]  | Concentración [gr/l] |
| 41            | 0.050543964          | 41            | 0.028281165          | 41            | 0.065557629          | 42            | 0.001681161          |
| 42            | 0.049717598          | 42            | 0.02811981           | 42            | 0.063843556          | 43            | 0.001716032          |
| 43            | 0.048908748          | 43            | 0.027960442          | 43            | 0.062206075          | 44            | 0.001716342          |
| 44            | 0.048120927          | 44            | 0.027803592          | 44            | 0.060591355          | 45            | 0.001719801          |
| 45            | 0.047351833          | 45            | 0.027646948          | 45            | 0.059058566          | 46            | 0.001755772          |
| 46            | 0.04659196           | 46            | 0.027491903          | 46            | 0.057569921          | 47            | 0.001775063          |
| 47            | 0.045854256          | 47            | 0.02733838           | 47            | 0.056107081          | 48            | 0.001791204          |
| 48            | 0.045123171          | 48            | 0.027186612          | 48            | 0.054712273          | 49            | 0.001790704          |
| 49            | 0.044409137          | 49            | 0.027036363          | 49            | 0.053347409          | 50            | 0.001789707          |
| 50            | 0.043707784          | 50            | 0.026887694          | 50            | 0.052038845          | 51            | 0.00180645           |
| 51            | 0.043021355          | 51            | 0.026741879          | 51            | 0.050747693          | 52            | 0.001816352          |
| 52            | 0.042347614          | 52            | 0.026596069          | 52            | 0.049515896          | 53            | 0.001832019          |
| 53            | 0.041689098          | 53            | 0.026451902          | 53            | 0.048320297          | 54            | 0.001840403          |
| 54            | 0.041043241          | 54            | 0.026309226          | 54            | 0.047137741          | 55            | 0.001839446          |
| 55            | 0.040410072          | 55            | 0.026169298          | 55            | 0.04601568           | 56            | 0.001852558          |
| 56            | 0.03980393           | 56            | 0.026028989          | 56            | 0.044923648          | 57            | 0.001859715          |
| 57            | 0.039196484          | 57            | 0.025891762          | 57            | 0.043864127          | 58            | 0.001873762          |
| 58            | 0.038600862          | 58            | 0.025755739          | 58            | 0.042814851          | 59            | 0.001890576          |
| 59            | 0.038017295          | 59            | 0.025621019          | 59            | 0.041814063          | 60            | 0.001940772          |
| 60            | 0.037444696          | 60            | 0.025487579          | 60            | 0.040841576          | 61            | 0.001958931          |
| 61            | 0.036883816          | 61            | 0.025354169          | 61            | 0.039896481          | 62            | 0.001976635          |
| 62            | 0.036333334          | 62            | 0.025222208          | 62            | 0.038983107          | 63            | 0.001984346          |
| 63            | 0.035793938          | 63            | 0.025091629          | 63            | 0.038095023          | 64            | 0.002003819          |
| 64            | 0.035264626          | 64            | 0.024962569          | 64            | 0.037232108          | 65            | 0.002027437          |
| 65            | 0.034746636          | 65            | 0.024834767          | 65            | 0.036391459          | 66            | 0.002047026          |
| 66            | 0.034238104          | 66            | 0.024707893          | 66            | 0.035560638          | 67            | 0.002062785          |
| 67            | 0.033739679          | 67            | 0.024582308          | 67            | 0.034772057          | 68            | 0.002071404          |
| 68            | 0.033250477          | 68            | 0.024458027          | 68            | 0.034004334          | 69            | 0.002078385          |
| 69            | 0.032771304          | 69            | 0.024335206          | 69            | 0.033257127          | 70            | 0.002086527          |
| 70            | 0.032301296          | 70            | 0.024213217          | 70            | 0.032530401          | 71            | 0.002113116          |
| 71            | 0.031840608          | 71            | 0.024092712          | 71            | 0.031824168          | 72            | 0.002144613          |
| 72            | 0.031388953          | 72            | 0.023973307          | 72            | 0.031136701          | 73            | 0.002150442          |
| 73            | 0.030945657          | 73            | 0.023854893          | 73            | 0.03046805           | 74            | 0.00221275           |
| 74            | 0.030510928          | 74            | 0.023737613          | 74            | 0.02981809           | 75            | 0.002268877          |
| 75            | 0.030084381          | 75            | 0.023621425          | 75            | 0.029185878          | 76            | 0.002297697          |
| 76            | 0.029665604          | 76            | 0.023506368          | 76            | 0.028570434          | 77            | 0.002340112          |
| 77            | 0.029254057          | 77            | 0.023392482          | 77            | 0.02797148           | 78            | 0.002364736          |
| 78            | 0.028858535          | 78            | 0.023279566          | 78            | 0.027388455          | 79            | 0.002373852          |
| 79            | 0.028470268          | 79            | 0.023167819          | 79            | 0.026820727          | 80            | 0.00238304           |
| 80            | 0.028091565          | 80            | 0.023057351          | 80            | 0.02626802           | 81            | 0.002402991          |

ANEXO 5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA FRACCIÓN MASA CON RESPECTO AL TIEMPO PARA LOS CASOS EN QUE LA GEOMETRÍA EMPLEADA FUE CON RESPECTO AL DIFUSOR 1.

| Caso 2/16"-1A |                      | Caso 1/16"-1B |                      | Caso 3/16"-1C |                      | Caso 1/32"-1D |                      |
|---------------|----------------------|---------------|----------------------|---------------|----------------------|---------------|----------------------|
| Tiempo [min]  | Concentración [gr/l] |
| 81            | 0.027712245          | 81            | 0.022948911          | 81            | 0.025730029          | 82            | 0.002399843          |
| 82            | 0.027338671          | 82            | 0.022840448          | 82            | 0.025205797          | 83            | 0.002415998          |
| 83            | 0.026977753          | 83            | 0.022732785          | 83            | 0.024692398          | 84            | 0.002424787          |
| 84            | 0.026616784          | 84            | 0.022626249          | 84            | 0.02419246           | 85            | 0.002444282          |
| 85            | 0.026269261          | 85            | 0.022520702          | 85            | 0.023705624          | 86            | 0.002452506          |
| 86            | 0.025921427          | 86            | 0.022417251          | 86            | 0.023233442          | 87            | 0.002449476          |
| 87            | 0.025580117          | 87            | 0.022314237          | 87            | 0.022769913          | 88            | 0.00245705           |
| 88            | 0.025244458          | 88            | 0.02221109           | 88            | 0.022318916          | 89            | 0.002468352          |
| 89            | 0.024921197          | 89            | 0.022110224          | 89            | 0.021879377          | 90            | 0.002505633          |
| 90            | 0.024600098          | 90            | 0.022009078          | 90            | 0.021450877          | 91            | 0.002538815          |
| 91            | 0.024282673          | 91            | 0.021909244          | 91            | 0.021035166          | 92            | 0.002559066          |
| 92            | 0.0239754            | 92            | 0.021811195          | 92            | 0.020626405          | 93            | 0.002579111          |
| 93            | 0.02367322           | 93            | 0.021712888          | 93            | 0.020228606          | 94            | 0.002575276          |
| 94            | 0.023379028          | 94            | 0.021615783          | 94            | 0.01984301           | 95            | 0.002583843          |
| 95            | 0.023090886          | 95            | 0.021519639          | 95            | 0.019466475          | 96            | 0.002603007          |
| 96            | 0.022808438          | 96            | 0.021424351          | 96            | 0.019098347          | 97            | 0.002599534          |
| 97            | 0.022526503          | 97            | 0.021330005          | 97            | 0.018739216          | 98            | 0.002609451          |
| 98            | 0.022247262          | 98            | 0.021236528          | 98            | 0.018388577          | 99            | 0.00262769           |
| 99            | 0.021972558          | 99            | 0.021144776          | 99            | 0.018044936          | 100           | 0.002657368          |
| 100           | 0.021701865          | 100           | 0.021052755          | 100           | 0.017710282          | 101           | 0.002675355          |
| 101           | 0.021435749          | 101           | 0.020962503          | 101           | 0.017385859          | 102           | 0.002671855          |
| 102           | 0.021178555          | 102           | 0.020871911          | 102           | 0.017066481          | 103           | 0.002668411          |
| 103           | 0.02092595           | 103           | 0.020783374          | 103           | 0.016757539          | 104           | 0.002689713          |
| 104           | 0.020678088          | 104           | 0.020694483          | 104           | 0.016455006          | 105           | 0.002701813          |
| 105           | 0.020434558          | 105           | 0.020607496          | 105           | 0.016159739          | 106           | 0.002758483          |
| 106           | 0.020195531          | 106           | 0.020521129          | 106           | 0.015870733          | 107           | 0.002809045          |
| 107           | 0.019960366          | 107           | 0.020434594          | 107           | 0.015588584          | 108           | 0.002841627          |
| 108           | 0.019725095          | 108           | 0.020350032          | 108           | 0.015312822          | 109           | 0.002885503          |
| 109           | 0.019493615          | 109           | 0.020265156          | 109           | 0.015041583          | 110           | 0.002900002          |
| 110           | 0.019265331          | 110           | 0.020182153          | 110           | 0.014777823          | 111           | 0.002931633          |
| 111           | 0.019049516          | 111           | 0.020098787          | 111           | 0.014521807          | 112           | 0.002981714          |
| 112           | 0.0188317            | 112           | 0.020017214          | 112           | 0.014270852          | 113           | 0.002986152          |
| 113           | 0.018617898          | 113           | 0.019936189          | 113           | 0.014025397          | 114           | 0.002983788          |
| 114           | 0.01840567           | 114           | 0.019854914          | 114           | 0.013785334          | 115           | 0.003013116          |
| 115           | 0.018198239          | 115           | 0.019775538          | 115           | 0.013549003          | 116           | 0.003024196          |
| 116           | 0.017988991          | 116           | 0.019696567          | 116           | 0.013318741          | 117           | 0.003029662          |
| 117           | 0.017791806          | 117           | 0.01961742           | 117           | 0.013095236          | 118           | 0.003026153          |
| 118           | 0.017591609          | 118           | 0.01954007           | 118           | 0.012876078          | 119           | 0.003022748          |
| 119           | 0.017401632          | 119           | 0.019462395          | 119           | 0.012661545          | 120           | 0.003019446          |
| 120           | 0.017208317          | 120           | 0.019386403          | 120           | 0.012450104          | 121           | 0.003047157          |

ANEXO 5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA FRACCIÓN MASA CON RESPECTO AL TIEMPO PARA LOS CASOS EN QUE LA GEOMETRÍA EMPLEADA FUE CON RESPECTO AL DIFUSOR 1.

| Caso 2/16"-1A |                      | Caso 1/16"-1B |                      | Caso 3/16"-1C |                      | Caso 1/32"-1D |                      |
|---------------|----------------------|---------------|----------------------|---------------|----------------------|---------------|----------------------|
| Tiempo [min]  | Concentración [gr/l] |
| 121           | 0.017024746          | 121           | 0.019310784          | 121           | 0.012245568          | 122           | 0.003042471          |
| 122           | 0.016844923          | 122           | 0.019235788          | 122           | 0.012043471          | 123           | 0.003056566          |
| 123           | 0.016661467          | 123           | 0.019161385          | 123           | 0.01184766           | 124           | 0.003052039          |
| 124           | 0.016486716          | 124           | 0.019087676          | 124           | 0.011655491          | 125           | 0.003065293          |
| 125           | 0.016315484          | 125           | 0.019013831          | 125           | 0.011467487          | 126           | 0.003074802          |
| 126           | 0.016140567          | 126           | 0.018940816          | 126           | 0.011281954          | 127           | 0.003071648          |
| 127           | 0.015973834          | 127           | 0.018868545          | 127           | 0.011102215          | 128           | 0.003080156          |
| 128           | 0.015807973          | 128           | 0.01879693           | 128           | 0.010925747          | 129           | 0.003076716          |
| 129           | 0.015643792          | 129           | 0.0187259            | 129           | 0.010752813          | 130           | 0.00309873           |
| 130           | 0.015481091          | 130           | 0.018655501          | 130           | 0.010583743          | 131           | 0.003095398          |
| 131           | 0.015320146          | 131           | 0.018585725          | 131           | 0.010417913          | 132           | 0.00310617           |
| 132           | 0.015162027          | 132           | 0.018517232          | 132           | 0.010255761          | 133           | 0.003113177          |
| 133           | 0.015004463          | 133           | 0.018449007          | 133           | 0.010096957          | 134           | 0.0031156            |
| 134           | 0.014849238          | 134           | 0.018381283          | 134           | 0.009941311          | 135           | 0.003113434          |
| 135           | 0.014696442          | 135           | 0.01831333           | 135           | 0.009788964          | 136           | 0.003110679          |
| 136           | 0.014545663          | 136           | 0.018246293          | 136           | 0.009639707          | 137           | 0.003107792          |
| 137           | 0.014397126          | 137           | 0.018179901          | 137           | 0.009493567          | 138           | 0.003104888          |
| 138           | 0.014250739          | 138           | 0.018114142          | 138           | 0.009350318          | 139           | 0.003101938          |
| 139           | 0.014106797          | 139           | 0.018048922          | 139           | 0.009210016          | 140           | 0.003099034          |
| 140           | 0.013965517          | 140           | 0.017984128          | 140           | 0.009072453          | 141           | 0.003096093          |
| 141           | 0.013825553          | 141           | 0.01792055           | 141           | 0.008936586          | 142           | 0.003093194          |
| 142           | 0.013687865          | 142           | 0.017857313          | 142           | 0.008803976          | 143           | 0.003090286          |
| 143           | 0.01355259           | 143           | 0.017793706          | 143           | 0.008674176          | 144           | 0.003087378          |
| 144           | 0.013419196          | 144           | 0.017730929          | 144           | 0.008546921          | 145           | 0.003084506          |
| 145           | 0.013286344          | 145           | 0.017668795          | 145           | 0.008422111          | 146           | 0.003081602          |
| 146           | 0.013156153          | 146           | 0.017607169          | 146           | 0.008299751          | 147           | 0.003078703          |
| 147           | 0.013030681          | 147           | 0.017545998          | 147           | 0.00817964           | 148           | 0.003075834          |
| 148           | 0.012908801          | 148           | 0.017485311          | 148           | 0.008061817          | 149           | 0.003072926          |
| 149           | 0.012788789          | 149           | 0.017425179          | 149           | 0.007946334          | 150           | 0.003070058          |
| 150           | 0.012670666          | 150           | 0.017366126          | 150           | 0.007832944          | 151           | 0.003067167          |
| 151           | 0.01255084           | 151           | 0.01730665           | 151           | 0.007721655          | 152           | 0.003064292          |
| 152           | 0.012435257          | 152           | 0.017247796          | 152           | 0.007612497          | 153           | 0.003061426          |
| 153           | 0.012318403          | 153           | 0.017190095          | 153           | 0.007505386          | 154           | 0.003058588          |
| 154           | 0.012206148          | 154           | 0.017132629          | 154           | 0.007400268          | 155           | 0.003055725          |
| 155           | 0.012095825          | 155           | 0.017075565          | 155           | 0.007297015          | 156           | 0.003052877          |
| 156           | 0.01198443           | 156           | 0.017018273          | 156           | 0.007195838          | 157           | 0.003050015          |
| 157           | 0.011874038          | 157           | 0.016962275          | 157           | 0.007096462          | 158           | 0.003047197          |
| 158           | 0.011764887          | 158           | 0.016905971          | 158           | 0.006999028          | 159           | 0.003044346          |
| 159           | 0.011657093          | 159           | 0.016850378          | 159           | 0.006903302          | 160           | 0.003041514          |
| 160           | 0.011550616          | 160           | 0.016795706          | 160           | 0.006809426          | 161           | 0.003038702          |

ANEXO 5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA FRACCIÓN MASA CON RESPECTO AL TIEMPO PARA LOS CASOS EN QUE LA GEOMETRÍA EMPLEADA FUE CON RESPECTO AL DIFUSOR 1.

| Caso 2/16"-1A |                      | Caso 1/16"-1B |                      | Caso 3/16"-1C |                      | Caso 1/32"-1D |                      |
|---------------|----------------------|---------------|----------------------|---------------|----------------------|---------------|----------------------|
| Tiempo [min]  | Concentración [gr/l] |
| 161           | 0.011445451          | 161           | 0.016740715          | 161           | 0.006717157          | 162           | 0.003035886          |
| 162           | 0.011341078          | 162           | 0.016686358          | 162           | 0.00662662           | 163           | 0.00303307           |
| 163           | 0.011237996          | 163           | 0.016632427          | 163           | 0.006537804          | 164           | 0.003030277          |
| 164           | 0.011136523          | 164           | 0.016578894          | 164           | 0.00645048           | 165           | 0.003027466          |
| 165           | 0.011036308          | 165           | 0.016526397          | 165           | 0.006364691          | 166           | 0.003024669          |
| 166           | 0.01093741           | 166           | 0.016473452          | 166           | 0.006280583          | 167           | 0.003021872          |
| 167           | 0.010839934          | 167           | 0.016421085          | 167           | 0.00619795           | 168           | 0.003019111          |
| 168           | 0.010743644          | 168           | 0.016369218          | 168           | 0.006116787          | 169           | 0.003016323          |
| 169           | 0.010649179          | 169           | 0.016317703          | 169           | 0.006040422          | 170           | 0.003013579          |
| 170           | 0.01055593           | 170           | 0.016266592          | 170           | 0.005961625          | 171           | 0.003010822          |
| 171           | 0.010463948          | 171           | 0.016215898          | 171           | 0.005884803          | 172           | 0.003008069          |
| 172           | 0.010373184          | 172           | 0.016165562          | 172           | 0.005808634          | 173           | 0.003005328          |
| 173           | 0.010282973          | 173           | 0.016115583          | 173           | 0.005734203          | 174           | 0.003002555          |
| 174           | 0.010194738          | 174           | 0.016066005          | 174           | 0.00566111           | 175           | 0.002999831          |
| 175           | 0.010107456          | 175           | 0.016016815          | 175           | 0.005589494          | 176           | 0.002997075          |
| 176           | 0.010020833          | 176           | 0.015967939          | 176           | 0.005519031          | 177           | 0.002994377          |
| 177           | 0.009935326          | 177           | 0.015919918          | 177           | 0.005449815          | 178           | 0.002991627          |
| 178           | 0.009850821          | 178           | 0.015871514          | 178           | 0.005384651          | 179           | 0.0029889            |
| 179           | 0.009767361          | 179           | 0.015823653          | 179           | 0.005317274          | 180           | 0.002986213          |
| 180           | 0.009684969          | 180           | 0.015776264          | 180           | 0.005251618          | 181           | 0.002983489          |
| 181           | 0.009604305          | 181           | 0.015729219          | 181           | 0.005187111          | 182           | 0.002980806          |
| 182           | 0.009523872          | 182           | 0.015682517          | 182           | 0.005123162          | 183           | 0.002978097          |
| 183           | 0.009444611          | 183           | 0.015636114          | 183           | 0.005060454          | 184           | 0.002975419          |
| 184           | 0.009366368          | 184           | 0.015590059          | 184           | 0.005001531          | 185           | 0.002972717          |
| 185           | 0.009289208          | 185           | 0.01554436           | 185           | 0.004940022          | 186           | 0.002970031          |
| 186           | 0.0092129            | 186           | 0.015498982          | 186           | 0.004880376          | 187           | 0.002967339          |
| 187           | 0.009137365          | 187           | 0.015453908          | 187           | 0.004824359          | 188           | 0.002964683          |
| 188           | 0.009062851          | 188           | 0.015409186          | 188           | 0.00476644           | 189           | 0.002961996          |
| 189           | 0.008989335          | 189           | 0.015364768          | 189           | 0.00470938           | 190           | 0.002959318          |
| 190           | 0.008919708          | 190           | 0.015320648          | 190           | 0.004653629          | 191           | 0.002956664          |
| 191           | 0.00884714           | 191           | 0.015276947          | 191           | 0.00459881           | 192           | 0.002953984          |
| 192           | 0.008776936          | 192           | 0.015233493          | 192           | 0.004547207          | 193           | 0.002951351          |
| 193           | 0.008707097          | 193           | 0.015190335          | 193           | 0.004493851          | 194           | 0.002948683          |
| 194           | 0.008638122          | 194           | 0.015147497          | 194           | 0.004441808          | 195           | 0.002946059          |
| 195           | 0.00856996           | 195           | 0.015104931          | 195           | 0.00439062           | 196           | 0.002943403          |
| 196           | 0.008502402          | 196           | 0.015062707          | 196           | 0.004340258          | 197           | 0.002940771          |
| 197           | 0.008435767          | 197           | 0.01502075           | 197           | 0.004290699          | 198           | 0.002938152          |
| 198           | 0.008369966          | 198           | 0.01497907           | 198           | 0.004241948          | 199           | 0.002935526          |
| 199           | 0.008304966          | 199           | 0.014937714          | 199           | 0.004193978          | 200           | 0.002932937          |
| 200           | 0.008240725          | 200           | 0.014896641          | 200           | 0.004146767          | 201           | 0.002930319          |
| 201           | 0.008177719          | 201           | 0.014855926          | 201           | 0.004100339          | 202           | 0.002927753          |
| 202           | 0.008114373          | 202           | 0.014815438          | 202           | 0.004054185          | 203           | 0.002925139          |
| 203           | 0.008052271          | 203           | 0.014775179          | 203           | 0.004010935          | 204           | 0.002922579          |
| 204           | 0.007990912          | 204           | 0.014735267          | 204           | 0.003965629          | 205           | 0.002919965          |

ANEXO 5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA FRACCIÓN MASA CON RESPECTO AL TIEMPO PARA LOS CASOS EN QUE LA GEOMETRÍA EMPLEADA FUE CON RESPECTO AL DIFUSOR 1.

| Caso 2/16"-1A |                      | Caso 1/16"-1B |                      | Caso 3/16"-1C |                      | Caso 1/32"-1D |                      |
|---------------|----------------------|---------------|----------------------|---------------|----------------------|---------------|----------------------|
| Tiempo [min]  | Concentración [gr/l] |
| 205           | 0.007930297          | 205           | 0.014695654          | 205           | 0.003923635          | 206           | 0.002917406          |
| 206           | 0.00787044           |               |                      |               |                      | 207           | 0.002914844          |
| 207           | 0.007811316          |               |                      |               |                      | 208           | 0.002912254          |
| 208           | 0.007752797          |               |                      |               |                      | 209           | 0.002909718          |
| 209           | 0.007694875          |               |                      |               |                      | 210           | 0.002907144          |
| 210           | 0.007637619          |               |                      |               |                      | 211           | 0.002904621          |
| 211           | 0.00758088           |               |                      |               |                      | 212           | 0.002902059          |
| 212           | 0.007525017          |               |                      |               |                      | 213           | 0.002899555          |
| 213           | 0.007469755          |               |                      |               |                      | 214           | 0.002897005          |
| 214           | 0.00741517           |               |                      |               |                      | 215           | 0.002894507          |
| 215           | 0.007361148          |               |                      |               |                      | 216           | 0.002891994          |
| 216           | 0.00730768           |               |                      |               |                      | 217           | 0.00288947           |
| 217           | 0.007254885          |               |                      |               |                      | 218           | 0.002887012          |
| 218           | 0.007202616          |               |                      |               |                      | 219           | 0.002884489          |
| 219           | 0.007150929          |               |                      |               |                      | 220           | 0.002882002          |
| 220           | 0.007099831          |               |                      |               |                      | 221           | 0.002879529          |
| 221           | 0.007049292          |               |                      |               |                      | 222           | 0.00287706           |
| 222           | 0.006999316          |               |                      |               |                      | 223           | 0.00287458           |
| 223           | 0.006949868          |               |                      |               |                      | 224           | 0.002872146          |
| 224           | 0.006900971          |               |                      |               |                      | 225           | 0.002869678          |
| 225           | 0.006852601          |               |                      |               |                      | 226           | 0.002867254          |
| 226           | 0.006804753          |               |                      |               |                      | 227           | 0.002864792          |
| 227           | 0.006757424          |               |                      |               |                      | 228           | 0.00286237           |
| 228           | 0.006710616          |               |                      |               |                      | 229           | 0.002859927          |
| 229           | 0.006664482          |               |                      |               |                      | 230           | 0.002857519          |
| 230           | 0.006618824          |               |                      |               |                      | 231           | 0.002855092          |
| 231           | 0.006573578          |               |                      |               |                      | 232           | 0.002852694          |
| 232           | 0.006528764          |               |                      |               |                      | 233           | 0.002850265          |
| 233           | 0.006484509          |               |                      |               |                      | 234           | 0.002847869          |
| 234           | 0.00644067           |               |                      |               |                      | 235           | 0.002845468          |
| 235           | 0.006397249          |               |                      |               |                      | 236           | 0.002843104          |
| 236           | 0.006354382          |               |                      |               |                      | 237           | 0.002840725          |
| 237           | 0.006311887          |               |                      |               |                      | 238           | 0.002838381          |
| 238           | 0.00626993           |               |                      |               |                      | 239           | 0.00283599           |
| 239           | 0.006228346          |               |                      |               |                      | 240           | 0.002833652          |
| 240           | 0.006187175          |               |                      |               |                      | 241           | 0.002831293          |
| 241           | 0.006146386          |               |                      |               |                      | 242           | 0.002828971          |
| 242           | 0.00610601           |               |                      |               |                      | 243           | 0.002826625          |
| 243           | 0.00606604           |               |                      |               |                      | 244           | 0.002824295          |
| 244           | 0.00602649           |               |                      |               |                      | 245           | 0.002821967          |
| 245           | 0.00598742           |               |                      |               |                      | 246           | 0.002819632          |
| 246           | 0.005948796          |               |                      |               |                      | 247           | 0.002817328          |
| 247           | 0.005910521          |               |                      |               |                      | 248           | 0.002815011          |
| 248           | 0.005871786          |               |                      |               |                      | 249           | 0.002812715          |

ANEXO 5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA FRACCIÓN MASA CON RESPECTO AL TIEMPO PARA LOS CASOS EN QUE LA GEOMETRÍA EMPLEADA FUE CON RESPECTO AL DIFUSOR 1.

| <b>Caso 2/16"-1A</b> |                      | <b>Caso 1/16"-1B</b> |                      | <b>Caso 3/16"-1C</b> |                      | <b>Caso 1/32"-1D</b> |                      |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Tiempo [min]         | Concentración [gr/l] |
| 249                  | 0.005836337          |                      |                      |                      |                      | 250                  | 0.002810423          |
| 250                  | 0.005801224          |                      |                      |                      |                      | 251                  | 0.002808148          |
| 251                  | 0.005766647          |                      |                      |                      |                      | 252                  | 0.002805873          |
| 252                  | 0.005732378          |                      |                      |                      |                      | 253                  | 0.0028036            |
| 253                  | 0.005698451          |                      |                      |                      |                      | 254                  | 0.002801345          |
| 254                  | 0.005663213          |                      |                      |                      |                      | 255                  | 0.002799101          |
| 255                  | 0.005629558          |                      |                      |                      |                      | 256                  | 0.002796849          |

ANEXO 6. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA FRACCIÓN MASA CON RESPECTO AL TIEMPO PARA LOS CASOS EN QUE LA GEOMETRÍA EMPLEADA FUE CON RESPECTO AL DIFUSOR 2.

Tabla A. 6.1.Resultados de la situación numérica caso: difusor 2.

**Histórico de la fracción masa de trazador para los casos en que se simulo con el Difusor 2**

| <b>Caso: 2/16"-2A</b> |                      | <b>Caso: 1/16"-2B</b> |                      | <b>Caso: 3/16"-2C</b> |                      | <b>Caso: 1/32"-2D</b> |                      |
|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| Tiempo [min]          | Concentración [gr/l] |
| 0                     | 0                    | 0                     | 0                    | 1                     | 0                    | 0                     | 0                    |
| 1                     | 0.019640926          | 1                     | 0.02773864           | 2                     | 0.02601076           | 1                     | 0.001662201          |
| 2                     | 0.024418475          | 2                     | 0.028631719          | 3                     | 0.06066414           | 2                     | 0.001112793          |
| 3                     | 0.064903907          | 3                     | 0.05770383           | 4                     | 0.10050207           | 3                     | 0.003471527          |
| 4                     | 0.11456526           | 4                     | 0.087246925          | 5                     | 0.14318164           | 4                     | 0.006308743          |
| 5                     | 0.16421768           | 5                     | 0.11667003           | 6                     | 0.18664534           | 5                     | 0.009538349          |
| 6                     | 0.21339193           | 6                     | 0.14522934           | 7                     | 0.23034634           | 6                     | 0.013034899          |
| 7                     | 0.24034347           | 7                     | 0.14661655           | 8                     | 0.2507869            | 7                     | 0.015125383          |
| 8                     | 0.24602643           | 8                     | 0.14510514           | 9                     | 0.25353342           | 8                     | 0.01659972           |
| 9                     | 0.24048977           | 9                     | 0.14384829           | 10                    | 0.25607792           | 9                     | 0.01765951           |
| 10                    | 0.22999033           | 10                    | 0.14140962           | 11                    | 0.253575             | 10                    | 0.01838194           |
| 11                    | 0.21788345           | 11                    | 0.13861407           | 12                    | 0.2476014            | 11                    | 0.018861417          |
| 12                    | 0.20590827           | 12                    | 0.13535653           | 13                    | 0.2392443            | 12                    | 0.01916589           |
| 13                    | 0.19427355           | 13                    | 0.13185251           | 14                    | 0.22927031           | 13                    | 0.019343732          |
| 14                    | 0.18321694           | 14                    | 0.12816845           | 15                    | 0.21852045           | 14                    | 0.01943801           |
| 15                    | 0.17279124           | 15                    | 0.12441714           | 16                    | 0.20751709           | 15                    | 0.01947411           |
| 16                    | 0.16298227           | 16                    | 0.12066595           | 17                    | 0.19646506           | 16                    | 0.01947272           |
| 17                    | 0.15366979           | 17                    | 0.11696655           | 18                    | 0.18559638           | 17                    | 0.019446788          |
| 18                    | 0.14498079           | 18                    | 0.11332683           | 19                    | 0.17519052           | 18                    | 0.019405441          |
| 19                    | 0.13674663           | 19                    | 0.10975638           | 20                    | 0.1652351            | 19                    | 0.019353025          |
| 20                    | 0.12899972           | 20                    | 0.10631966           | 21                    | 0.15571959           | 20                    | 0.019292828          |
| 21                    | 0.12178857           | 21                    | 0.10294378           | 22                    | 0.14670041           | 21                    | 0.019229231          |
| 22                    | 0.11502221           | 22                    | 0.099608935          | 23                    | 0.13810754           | 22                    | 0.019162921          |
| 23                    | 0.10862226           | 23                    | 0.096442208          | 24                    | 0.13004923           | 23                    | 0.01909557           |
| 24                    | 0.10264003           | 24                    | 0.093366176          | 25                    | 0.1224572            | 24                    | 0.019026812          |
| 25                    | 0.097016782          | 25                    | 0.09037967           | 26                    | 0.11534198           | 25                    | 0.018959021          |
| 26                    | 0.091725573          | 26                    | 0.087508753          | 27                    | 0.10862195           | 26                    | 0.018890845          |
| 27                    | 0.086707674          | 27                    | 0.084689237          | 28                    | 0.1022845            | 27                    | 0.018822746          |
| 28                    | 0.082006894          | 28                    | 0.08201199           | 29                    | 0.09635183           | 28                    | 0.018755505          |
| 29                    | 0.077551179          | 29                    | 0.079411268          | 30                    | 0.09079139           | 29                    | 0.018688962          |
| 30                    | 0.073312469          | 30                    | 0.076899737          | 31                    | 0.08555288           | 30                    | 0.018622121          |
| 31                    | 0.06938415           | 31                    | 0.074472964          | 32                    | 0.08060667           | 31                    | 0.018556636          |
| 32                    | 0.065687798          | 32                    | 0.072130792          | 33                    | 0.07600639           | 32                    | 0.018490916          |
| 33                    | 0.062207717          | 33                    | 0.069878966          | 34                    | 0.07166819           | 33                    | 0.018426538          |
| 34                    | 0.058931943          | 34                    | 0.067689463          | 35                    | 0.06758693           | 34                    | 0.018361667          |
| 35                    | 0.055782739          | 35                    | 0.065591112          | 36                    | 0.06374902           | 35                    | 0.018298728          |
| 36                    | 0.052841078          | 36                    | 0.063570857          | 37                    | 0.06014917           | 36                    | 0.018234896          |
| 37                    | 0.050032381          | 37                    | 0.061616529          | 38                    | 0.0567776            | 37                    | 0.018172879          |
| 38                    | 0.047412705          | 38                    | 0.05973091           | 39                    | 0.05361056           | 38                    | 0.018110303          |
| 39                    | 0.044942092          | 39                    | 0.057910241          | 40                    | 0.05062495           | 39                    | 0.018048072          |

ANEXO 6. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA FRACCIÓN MASA CON RESPECTO AL TIEMPO PARA LOS CASOS EN QUE LA GEOMETRÍA EMPLEADA FUE CON RESPECTO AL DIFUSOR 2.

| Caso: 2/16"-2A |                      | Caso: 1/16"-2B |                      | Caso: 3/16"-2C |                      | Caso: 1/32"-2D |                      |
|----------------|----------------------|----------------|----------------------|----------------|----------------------|----------------|----------------------|
| Tiempo [min]   | Concentración [gr/l] |
| 40             | 0.042630415          | 40             | 0.056152973          | 41             | 0.04780068           | 40             | 0.017986989          |
| 41             | 0.040449891          | 41             | 0.054450683          | 42             | 0.04516365           | 41             | 0.017926605          |
| 42             | 0.038376406          | 42             | 0.052806169          | 43             | 0.0426437            | 42             | 0.017866163          |
| 43             | 0.036416687          | 43             | 0.051224604          | 44             | 0.04028825           | 43             | 0.017806809          |
| 44             | 0.03459537           | 44             | 0.049669944          | 45             | 0.03805916           | 44             | 0.017747883          |
| 45             | 0.032881353          | 45             | 0.048170835          | 46             | 0.03595892           | 45             | 0.017688725          |
| 46             | 0.031237071          | 46             | 0.046740931          | 47             | 0.03398826           | 46             | 0.017630767          |
| 47             | 0.029678652          | 47             | 0.04534271           | 48             | 0.03213615           | 47             | 0.017573634          |
| 48             | 0.028226197          | 48             | 0.044000432          | 49             | 0.03039406           | 48             | 0.017516684          |
| 49             | 0.026813786          | 49             | 0.042689368          | 50             | 0.02874823           | 49             | 0.017459437          |
| 50             | 0.025502155          | 50             | 0.041449405          | 51             | 0.02719072           | 50             | 0.017403264          |
| 51             | 0.024259282          | 51             | 0.040235136          | 52             | 0.02573758           | 51             | 0.01734772           |
| 52             | 0.023093315          | 52             | 0.039073676          | 53             | 0.02436562           | 52             | 0.017291894          |
| 53             | 0.021990824          | 53             | 0.037958849          | 54             | 0.02307782           | 53             | 0.017237194          |
| 54             | 0.020946037          | 54             | 0.03687337           | 55             | 0.02184776           | 54             | 0.01718235           |
| 55             | 0.01994177           | 55             | 0.035823371          | 56             | 0.02069              | 55             | 0.017128324          |
| 56             | 0.018993732          | 56             | 0.034795512          | 57             | 0.01959476           | 56             | 0.017075099          |
| 57             | 0.018097118          | 57             | 0.033813339          | 58             | 0.01855977           | 57             | 0.017021321          |
| 58             | 0.017236771          | 58             | 0.032860197          | 59             | 0.01758735           | 58             | 0.016968561          |
| 59             | 0.016421251          | 59             | 0.031926468          | 60             | 0.01667179           | 59             | 0.016915491          |
| 60             | 0.015644357          | 60             | 0.031037189          | 61             | 0.01580282           | 60             | 0.016863802          |
| 61             | 0.014909032          | 61             | 0.030167839          | 62             | 0.01497958           | 61             | 0.016812226          |
| 62             | 0.014209289          | 62             | 0.029318595          | 63             | 0.01420588           | 62             | 0.016760644          |
| 63             | 0.0135459            | 63             | 0.028504735          | 64             | 0.01347254           | 63             | 0.016710129          |
| 64             | 0.012916225          | 64             | 0.027709147          | 65             | 0.01277692           | 64             | 0.016660042          |
| 65             | 0.01231845           | 65             | 0.026939902          | 66             | 0.0121188            | 65             | 0.016609605          |
| 66             | 0.011751659          | 66             | 0.026206175          | 67             | 0.01149913           | 66             | 0.016559897          |
| 67             | 0.011213213          | 67             | 0.025491258          | 68             | 0.0109159            | 67             | 0.016510447          |
| 68             | 0.010701885          | 68             | 0.02480376           | 69             | 0.01036367           | 68             | 0.016461151          |
| 69             | 0.010216203          | 69             | 0.024130572          | 70             | 0.00983975           | 69             | 0.01641239           |
| 70             | 0.009750303          | 70             | 0.02348586           | 71             | 0.00934561           | 70             | 0.016363559          |
| 71             | 0.009322816          | 71             | 0.022860024          | 72             | 0.00887772           | 71             | 0.016315514          |
| 72             | 0.008908531          | 72             | 0.022254646          | 73             | 0.00843306           | 72             | 0.016267337          |
| 73             | 0.008513806          | 73             | 0.021665817          | 74             | 0.00801251           | 73             | 0.01622002           |
| 74             | 0.008137545          | 74             | 0.021095116          | 75             | 0.00761397           | 74             | 0.016172592          |
| 75             | 0.007779115          | 75             | 0.020538926          | 76             | 0.00724068           | 75             | 0.016126327          |
| 76             | 0.007437775          | 76             | 0.01999885           | 77             | 0.00688381           | 76             | 0.016079638          |
| 77             | 0.007109623          | 77             | 0.019478053          | 78             | 0.00654604           | 77             | 0.016034042          |
| 78             | 0.006808751          | 78             | 0.018975182          | 79             | 0.00622554           | 78             | 0.015988031          |
| 79             | 0.006510507          | 79             | 0.01848748           | 80             | 0.0059198            | 79             | 0.015942695          |
| 80             | 0.006238519          | 80             | 0.018012729          | 81             | 0.00563097           | 80             | 0.015897313          |
| 81             | 0.005973051          | 81             | 0.017552359          | 82             | 0.00535643           | 81             | 0.0158526            |
| 82             | 0.005725751          | 82             | 0.01710907           | 83             | 0.00509667           | 82             | 0.015808245          |
| 83             | 0.005486846          | 83             | 0.016671855          | 84             | 0.00484996           | 83             | 0.015764035          |
| 84             | 0.005257085          | 84             | 0.016247587          | 85             | 0.00461621           | 84             | 0.015720243          |

ANEXO 6. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA FRACCIÓN MASA CON RESPECTO AL TIEMPO PARA LOS CASOS EN QUE LA GEOMETRÍA EMPLEADA FUE CON RESPECTO AL DIFUSOR 2.

| Caso: 2/16"-2A |                      | Caso: 1/16"-2B |                      | Caso: 3/16"-2C |                      | Caso: 1/32"-2D |                      |
|----------------|----------------------|----------------|----------------------|----------------|----------------------|----------------|----------------------|
| Tiempo [min]   | Concentración [gr/l] |
| 85             | 0.005042845          | 85             | 0.015837766          | 86             | 0.00439508           | 85             | 0.015676845          |
| 86             | 0.004835384          | 86             | 0.015441151          | 87             | 0.00418416           | 86             | 0.015633835          |
| 87             | 0.004637266          | 87             | 0.015057237          | 88             | 0.00398531           | 87             | 0.015591166          |
| 88             | 0.004447918          | 88             | 0.014685226          | 89             | 0.00379681           | 88             | 0.015548799          |
| 89             | 0.004266994          | 89             | 0.014320387          | 90             | 0.00361704           | 89             | 0.015506739          |
| 90             | 0.00409709           | 90             | 0.013967074          | 91             | 0.00344693           | 90             | 0.015464874          |
| 91             | 0.0039279            | 91             | 0.013625115          | 92             | 0.00328539           | 91             | 0.015423392          |
| 92             | 0.00377352           | 92             | 0.013291974          | 93             | 0.00313236           | 92             | 0.015382268          |
| 93             | 0.00362186           | 93             | 0.012969572          | 94             | 0.00298595           | 93             | 0.015341435          |
| 94             | 0.003480407          | 94             | 0.012653514          | 95             | 0.00284672           | 94             | 0.015300905          |
| 95             | 0.003343164          | 95             | 0.012346423          | 96             | 0.00271416           | 95             | 0.01526042           |
| 96             | 0.003211934          | 96             | 0.012051417          | 97             | 0.00258849           | 96             | 0.015220235          |
| 97             | 0.003086224          | 97             | 0.011761407          | 98             | 0.00246909           | 97             | 0.015180348          |
| 98             | 0.002965974          | 98             | 0.011483005          | 99             | 0.00235552           | 98             | 0.015140922          |
| 99             | 0.002851858          | 99             | 0.011211099          | 100            | 0.00224764           | 99             | 0.015101832          |
| 100            | 0.002740855          | 100            | 0.010947678          | 101            | 0.00214451           | 100            | 0.015062633          |
| 101            | 0.002636927          | 101            | 0.010691463          | 102            | 0.0020464            | 101            | 0.01502383           |
| 102            | 0.002538019          | 102            | 0.010442151          | 103            | 0.0019532            | 102            | 0.01498524           |
| 103            | 0.002442677          | 103            | 0.010200367          | 104            | 0.00186462           | 103            | 0.014946993          |
| 104            | 0.002351283          | 104            | 0.009965208          | 105            | 0.00178006           | 104            | 0.014909016          |
| 105            | 0.002263615          | 105            | 0.009736212          | 106            | 0.00169964           | 105            | 0.014871074          |
| 106            | 0.002178866          | 106            | 0.009512916          | 107            | 0.00162322           | 106            | 0.014833403          |
| 107            | 0.002098198          | 107            | 0.009295445          | 108            | 0.00155038           | 107            | 0.014796087          |
| 108            | 0.002020797          | 108            | 0.009084567          | 109            | 0.0014812            | 108            | 0.014759056          |
| 109            | 0.001946565          | 109            | 0.008877792          | 110            | 0.00141516           | 109            | 0.014722317          |
| 110            | 0.001875372          | 110            | 0.008678332          | 111            | 0.00135223           | 110            | 0.014685917          |
| 111            | 0.001807124          | 111            | 0.008480638          | 112            | 0.00129239           | 111            | 0.014649462          |
| 112            | 0.001742062          | 112            | 0.008291856          | 113            | 0.00123547           | 112            | 0.01461325           |
| 113            | 0.001679588          | 113            | 0.008104752          | 114            | 0.00118105           | 113            | 0.014577341          |
| 114            | 0.00161942           | 114            | 0.007923078          | 115            | 0.00112924           | 114            | 0.014541788          |
| 115            | 0.00156178           | 115            | 0.007746402          | 116            | 0.00108              | 115            | 0.014506611          |
| 116            | 0.001506466          | 116            | 0.007576444          | 117            | 0.00103303           | 116            | 0.014471192          |
| 117            | 0.001453304          | 117            | 0.007411285          | 118            | 0.0009883            | 117            | 0.014436013          |
| 118            | 0.001402212          | 118            | 0.007249329          | 119            | 0.00094576           | 118            | 0.014401162          |
| 119            | 0.001352626          | 119            | 0.007091475          | 120            | 0.00090486           | 119            | 0.014366611          |
| 120            | 0.001305365          | 120            | 0.006938377          | 121            | 0.00086575           | 120            | 0.014332279          |
| 121            | 0.001259908          | 121            | 0.006789152          | 122            | 0.00082829           | 121            | 0.014298193          |
| 122            | 0.001215851          | 122            | 0.006642685          | 123            | 0.00079281           | 122            | 0.014264332          |
| 123            | 0.001173528          | 123            | 0.0065012            | 124            | 0.00075892           | 123            | 0.014230972          |
| 124            | 0.00113284           | 124            | 0.006363506          | 125            | 0.0007268            | 124            | 0.014197277          |
| 125            | 0.001093965          | 125            | 0.006228483          | 126            | 0.00069609           | 125            | 0.014163769          |

ANEXO 6. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA FRACCIÓN MASA CON RESPECTO AL TIEMPO PARA LOS CASOS EN QUE LA GEOMETRÍA EMPLEADA FUE CON RESPECTO AL DIFUSOR 2.

| Caso: 2/16"-2A |                      | Caso: 1/16"-2B |                      | Caso: 3/16"-2C |                      | Caso: 1/32"-2D |                      |
|----------------|----------------------|----------------|----------------------|----------------|----------------------|----------------|----------------------|
| Tiempo [min]   | Concentración [gr/l] |
| 126            | 0.001056585          | 126            | 0.006096726          | 127            | 0.0006668            | 126            | 0.014130547          |
| 127            | 0.001020483          | 127            | 0.005968879          | 128            | 0.00063879           | 127            | 0.014097586          |
| 128            | 0.000985987          | 128            | 0.005843876          | 129            | 0.00061194           | 128            | 0.014064847          |
| 129            | 0.00095276           | 129            | 0.005722046          | 130            | 0.00058641           | 129            | 0.014032337          |
| 130            | 0.000920579          | 130            | 0.005603531          | 131            | 0.00056201           | 130            | 0.014000108          |
| 131            | 0.000890096          | 131            | 0.005487799          | 132            | 0.00053873           | 131            | 0.013968316          |
| 132            | 0.000860389          | 132            | 0.005374939          | 133            | 0.0005164            | 132            | 0.013936105          |
| 133            | 0.000831755          | 133            | 0.005264458          | 134            | 0.00049511           | 133            | 0.013904132          |
| 134            | 0.000804137          | 134            | 0.005156869          | 135            | 0.00047478           | 134            | 0.013872448          |
| 135            | 0.000777553          | 135            | 0.005051906          | 136            | 0.00045532           | 135            | 0.013841006          |
| 136            | 0.000751922          | 136            | 0.004949813          | 137            | 0.00043672           | 136            | 0.01380976           |
| 137            | 0.000727259          | 137            | 0.004850313          | 138            | 0.00041892           | 137            | 0.013778696          |
| 138            | 0.000703473          | 138            | 0.00475309           | 139            | 0.00040191           | 138            | 0.013747831          |
| 139            | 0.000680584          | 139            | 0.004658253          | 140            | 0.00038555           | 139            | 0.013717153          |
| 140            | 0.000658506          | 140            | 0.004566057          | 141            | 0.00036995           | 140            | 0.013687039          |
| 141            | 0.000637246          | 141            | 0.004475949          | 142            | 0.000355             | 141            | 0.013656431          |
| 142            | 0.000616764          | 142            | 0.004388183          | 143            | 0.0003407            | 142            | 0.013626235          |
| 143            | 0.000596853          | 143            | 0.004302276          | 144            | 0.00032701           | 143            | 0.013596141          |
| 144            | 0.000577813          | 144            | 0.004218109          | 145            | 0.00031393           | 144            | 0.013566213          |
| 145            | 0.000559444          | 145            | 0.004136127          | 146            | 0.00030144           | 145            | 0.013536532          |
| 146            | 0.000541752          | 146            | 0.004056146          | 147            | 0.00028944           | 146            | 0.01350705           |
| 147            | 0.000524671          | 147            | 0.003977899          | 148            | 0.00027804           | 147            | 0.013477742          |
| 148            | 0.000508217          | 148            | 0.003901524          | 149            | 0.0002671            | 148            | 0.013448844          |
| 149            | 0.000492328          | 149            | 0.003826893          | 150            | 0.00025662           | 149            | 0.013419619          |
| 150            | 0.00047702           | 150            | 0.003754026          | 151            | 0.0002466            | 150            | 0.013390665          |
| 151            | 0.00046224           | 151            | 0.003682739          | 152            | 0.00023698           | 151            | 0.013361847          |
| 152            | 0.000447972          | 152            | 0.003612967          | 153            | 0.00022778           | 152            | 0.013333324          |
| 153            | 0.000434216          | 153            | 0.00354482           | 154            | 0.00021894           | 153            | 0.013304822          |
| 154            | 0.000420939          | 154            | 0.003478679          | 155            | 0.00021048           | 154            | 0.013276586          |
| 155            | 0.000408116          | 155            | 0.003414028          | 156            | 0.00020238           | 155            | 0.013248711          |
| 156            | 0.000395734          | 156            | 0.003350773          | 157            | 0.00019463           | 156            | 0.013221201          |
| 157            | 0.000383775          | 157            | 0.003288928          | 158            | 0.0001872            | 157            | 0.013193103          |
| 158            | 0.000372225          | 158            | 0.003228551          | 159            | 0.00018007           | 158            | 0.013165159          |
| 159            | 0.000361072          | 159            | 0.003169262          | 160            | 0.00017324           | 159            | 0.013137494          |
| 160            | 0.000350199          | 160            | 0.003111366          | 161            | 0.00016672           | 160            | 0.013110033          |
| 161            | 0.000339696          | 161            | 0.003054871          | 162            | 0.00016044           | 161            | 0.01308277           |
| 162            | 0.000329539          | 162            | 0.002999767          | 163            | 0.00015441           | 162            | 0.013055623          |
| 163            | 0.000319717          | 163            | 0.002945931          | 164            | 0.00014863           | 163            | 0.013028658          |
| 164            | 0.000310219          | 164            | 0.002893299          | 165            | 0.00014308           | 164            | 0.013001834          |
| 165            | 0.000301254          | 165            | 0.002841726          | 166            | 0.00013776           | 165            | 0.012975159          |
| 166            | 0.000292605          | 166            | 0.00279114           | 167            | 0.00013266           | 166            | 0.012948628          |
| 167            | 0.000284266          | 167            | 0.002741849          | 168            | 0.00012775           | 167            | 0.012922165          |
| 168            | 0.00027622           | 168            | 0.002693555          | 169            | 0.00012304           | 168            | 0.012895929          |
| 169            | 0.000268464          | 169            | 0.002646134          | 170            | 0.00011851           | 169            | 0.012869825          |

ANEXO 6. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA FRACCIÓN MASA CON RESPECTO AL TIEMPO PARA LOS CASOS EN QUE LA GEOMETRÍA EMPLEADA FUE CON RESPECTO AL DIFUSOR 2.

| Caso: 2/16"-2A |                      | Caso: 1/16"-2B |                      | Caso: 3/16"-2C |                      | Caso: 1/32"-2D |                      |
|----------------|----------------------|----------------|----------------------|----------------|----------------------|----------------|----------------------|
| Tiempo [min]   | Concentración [gr/l] |
| 170            | 0.000260965          | 170            | 0.002599849          | 171            | 0.00011415           | 170            | 0.012843826          |
| 171            | 0.000253524          | 171            | 0.002554572          | 172            | 0.00010998           | 171            | 0.012817998          |
| 172            | 0.000246485          | 172            | 0.002510257          | 173            | 0.00010596           | 172            | 0.012792287          |
| 173            | 0.000239677          | 173            | 0.002466861          | 174            | 0.00010209           | 173            | 0.012766708          |
| 174            | 0.000233092          | 174            | 0.002424408          | 175            | 9.8388E-05           | 174            | 0.012741269          |
| 175            | 0.000226717          | 175            | 0.002382866          | 176            | 9.4819E-05           | 175            | 0.012715956          |
| 176            | 0.000220552          | 176            | 0.002342208          | 177            | 9.1387E-05           | 176            | 0.012690754          |
| 177            | 0.000214592          | 177            | 0.00230242           | 178            | 8.809E-05            | 177            | 0.012665682          |
| 178            | 0.000208797          | 178            | 0.002263432          | 179            | 8.4922E-05           | 178            | 0.012640752          |
| 179            | 0.000203178          | 179            | 0.002225235          | 180            | 8.1863E-05           | 179            | 0.012615911          |
| 180            | 0.000197743          | 180            | 0.002187855          | 181            | 7.8922E-05           | 180            | 0.012591193          |
| 181            | 0.000192437          | 181            | 0.002151243          | 182            | 7.6107E-05           | 181            | 0.012566541          |
| 182            | 0.000187309          | 182            | 0.002115393          | 183            | 7.3397E-05           | 182            | 0.012542074          |
| 183            | 0.000182274          | 183            | 0.002080274          | 184            | 7.078E-05            | 183            | 0.012517684          |
| 184            | 0.000177327          | 184            | 0.002045885          | 185            | 6.8278E-05           | 184            | 0.012493438          |
| 185            | 0.000172528          | 185            | 0.002012224          | 186            | 6.5871E-05           | 185            | 0.012469297          |
| 186            | 0.000167864          | 186            | 0.001979248          | 187            | 6.3567E-05           | 186            | 0.012445278          |
| 187            | 0.000163335          | 187            | 0.001946946          | 188            | 6.1342E-05           | 187            | 0.012421315          |
| 188            | 0.000159048          | 188            | 0.001915065          | 189            | 5.9204E-05           | 188            | 0.012397528          |
| 189            | 0.000154898          | 189            | 0.001883854          | 190            | 5.7146E-05           | 189            | 0.012373832          |
| 190            | 0.000150886          | 190            | 0.00185329           | 191            | 5.5168E-05           | 190            | 0.012350252          |
| 191            | 0.000146988          | 191            | 0.001823331          | 192            | 5.3254E-05           | 191            | 0.012326784          |
| 192            | 0.000143221          | 192            | 0.001793982          | 193            | 5.1421E-05           | 192            | 0.012303438          |
| 193            | 0.000139563          | 193            | 0.001765072          | 194            | 4.9658E-05           | 193            | 0.01228067           |
| 194            | 0.000135967          | 194            | 0.001736756          | 195            | 4.7961E-05           | 194            | 0.012257272          |
| 195            | 0.000132465          | 195            | 0.00170916           | 196            | 4.6324E-05           | 195            | 0.012233967          |
| 196            | 0.000129055          | 196            | 0.001682106          | 197            | 4.4746E-05           | 196            | 0.012210861          |
| 197            | 0.000125744          | 197            | 0.001655419          | 198            | 4.3232E-05           | 197            | 0.01218787           |
| 198            | 0.000122524          | 198            | 0.001629472          | 199            | 4.1768E-05           | 198            | 0.012165384          |
| 199            | 0.00011939           | 199            | 0.001604004          | 200            | 4.0356E-05           | 199            | 0.012142448          |
| 200            | 0.000116347          | 200            | 0.001579086          | 201            | 3.8995E-05           | 200            | 0.012119609          |
| 201            | 0.000113361          | 201            | 0.001554476          | 202            | 3.7679E-05           | 201            | 0.012096921          |
| 202            | 0.000110465          | 202            | 0.001530482          | 203            | 3.6415E-05           | 202            | 0.012074389          |
| 203            | 0.000107654          | 203            | 0.001506986          | 204            | 3.5194E-05           | 203            | 0.012052016          |
| 204            | 0.000104924          | 204            | 0.001483931          | 205            | 3.4019E-05           | 204            | 0.012029779          |
| 205            | 0.000102274          | 205            | 0.001461332          | 206            | 3.2884E-05           | 205            | 0.012007664          |

# ANEXO 7 TABLAS

Experimental values of model stress intensity resistance for rocks at room temperature.

| Material                 | Stress intensity resistance<br>Mpa m <sup>1/2</sup> | Comment | Method  | Reference                   |
|--------------------------|---|---------|---------|-----------------------------|
| Quartz Rock              |   |         |         |                             |
| Arkansas novaculite      | 1.34  | c       | DT      | Atkinson (1980)             |
|                          | 1.60  | c       | DT      | Meredith et al. (1984)      |
|                          | 1.77  | CN      | SR      | Meredith et al. (1984)      |
| Arkose                   | 0.62  | a       | SENB(3) | Dibb et al. (1983)          |
| Berea sandstone          | 0.28  | BT      | HF      | Zoback (1978)               |
| Coarse grain porous sst. |   |         |         |                             |
| 6.8% porosity            | 1.46  | BT      | IPTWC   | Clifton et al. (1976)       |
| 7.9% porosity            | 0.57  | BT      | IPTWC   | Clifton et al. (1976)       |
| 8.0% porosity            | 0.65  | BT      | IPTWC   | Clifton et al. (1976)       |
| 13.0% porosity           | 0.81  | BT      | IPTWC   | Clifton et al. (1976)       |
| Grimsby sandstone        | 1.47  | CN      | SR      | Gunsallus & Kulhawy (1984)  |
| Hohensyburg sandstone    | 1.17-1.33   | a       | SENRBB  | Bergkvist & Fornerod (1979) |
| Mojave quartzite         | 2.10  | c       | DT      | Atkinson (1984)             |
| Nugget sandstone         | 0.22-0.34   | a       | CNRBT   | Brown et al. (1972)         |
| Oughtbridge sanstone     | 1.31  | c       | DT      | Meredith et al. (1984)      |
|                          | 1.39  | CN      | SR      | Meredith et al. (1984)      |
| Pennant sandstone        | 2.66  | c       | DT      | Meredith et al. (1984)      |
|                          | 2.56  | CN      | SR(C)   | Meredith et al. (1984)      |
| Ruhr sandstone           | 1.39  | BT      | HF      | Rummel & Winter (1983)      |
|                          | 1.09  |         | SENB(3) | Muller (1984)               |
|                          | 1.03  |         | SENRBB  | Muller (1984)               |
|                          | 1.02  | CN      | CENRBB  | Muller (1984)               |
| borehole Baldehaar Bh6   | 0.50  |         | SENB(3) | Rummel et al. (1980)        |
| borehole Werne W7        | 1.27  |         | SENB(3) | Winter (1983)               |
| borehole Fehndorf 3Z     | 0.35-1.15   | CN      | CENRBB  | Rummel et al. (1985)        |
| borehole Fehndorf 2T     | 0.04-1.37   | CN      | CENRBB  | Rummel et al. (1985)        |
| borehole Mamburger Sand  | 0.11-0.60   | CN      | CENRBB  | Rummel et al. (1985)        |
| “sandstone”              | 0.31-0.35   |         | SENB(3) | Sukuzi et al. (1978)        |
| “sandstone”              | 0.69-2.40   | CN      | SR(C)   | Senseny & Pfeifle (1984)    |
| Shetland sandstone       | 0.34  | c       | DT      | Meredith et al. (1984)      |
|                          | 0.35  | CN      | SR      | Meredith et al. (1984)      |
| Tennessee sandstone      | 0.45  | c       | DT      | Atkinson (1979a)            |
|                          | 0.79  | c       | DT      | Meredith et al. (1984)      |
| Yellow River Sandstone   | 0.92  |         | DT      | Atkinson et al. (1985)      |
| Carbonate rocks          |   |         |         |                             |
| Balmholtz limestone      | 1.77  | a       | SENRBB  | Bergkvist & Fornerod (1979) |
| Carboniferous limestone  | 1.25  | a       | SENB(3) | Dibb et al. (1983)          |
| Carrara marble           | 0.64  | c       | DT      | Atkinson et al. (1979a)     |
|                          | 1.07  | a       | SENRBB  | Bergkvist & Fornerod (1979) |
|                          | 0.87  | c       | DT      | Meredith et al. (1984)      |
|                          | 0.82  | CN      | SR      | Meredith et al. (1984)      |
|                          | 1.16  |         | SENB(3) | Muller (1984)               |
|                          | 1.24  |         | SENRBB  | Muller (1984)               |
|                          | 1.26  | CN      | CENRBB  | Muller (1984)               |
| Chalk                    | 0.17  | a       | SENB(3) | Dibb et al. (1983)          |
| Ekeberg marble           | 1.53  | a       | SENB    | Ouchterlony (1978)          |
| X direction              | 1.31  | a       | SENRBB  | Ouchterlony (1978)          |
| Y direction              | 1.66  | a       | SENRBB  | Ouchterlony (1978)          |
| Z direction              | 1.54  | a       | SENRBB  | Ouchterlony (1978)          |
|                          | 1.36  | a       | SENRBB  | Swan (1980a)                |
|                          | 0.96  | a       | SENRBT  | Swan (1980a)                |
| sample 1                 | 1.42  | a       | SENRBB  | Ouchterlony & Sun (1983)    |
|                          | 2.05  | a       | SENRBB  | Ouchterlony & Sun (1983)    |
|                          | 1.90  | J       | SENRBB  | Ouchterlony & Sun (1983)    |
|                          | 2.10-2.30   | Jc      | SENRBB  | Ouchterlony & Sun (1983)    |
|                          | 1.87  | CN      | SR      | Ouchterlony & Sun (1983)    |
| sample 2                 | 1.62  | a       | SENRBB  | Ouchterlony & Sun (1983)    |
|                          | 2.22  | a       | SENRBB  | Ouchterlony & Sun (1983)    |
|                          | 2.12  | J       | SENRBB  | Ouchterlony & Sun (1983)    |
|                          | 2.09  | CN      | CENRBB  | Ouchterlony & Sun (1983)    |

ANEXO 7 TABLAS

Experimental values of model stress intensity resistance and fracture energy for rocks as a function of pressure.

| Confining pressure<br>Mpa | Comment    | Stress intensity resistance<br>Mpa m <sup>1/2</sup> | Fracture surface energy<br>J m <sup>1/2</sup> | Method  | Reference               |
|---------------------------|------------|---|---|---------|-------------------------|
| Indiana Limestone         |            |   |   |         |                         |
| 0                         | jacketed   | 0.93  |   | SENT    | Schmidt & Huddle (1977) |
| 6.9                       | jacketed   | 1.00  |   | SENT    | Schmidt & Huddle (1977) |
| 20.7                      | jacketed   | 1.55  |   | SENT    | Schmidt & Huddle (1977) |
| 34.5                      | jacketed   | 2.10  |   | SENT    | Schmidt & Huddle (1977) |
| 48.3                      | jacketed   | 3.05  |   | SENT    | Schmidt & Huddle (1977) |
| 62.1                      | jacketed   | 4.20  |   | SENT    | Schmidt & Huddle (1977) |
| 0                         | jacketed   | 0.66-1.01   |   | IPTWC   | Abou-Sayed (1977)       |
| 6.0                       | jacketed   | 1.37  |   | IPTWC   | Abou-Sayed (1977)       |
| 6.3                       | jacketed   | 1.42  |   | IPTWC   | Abou-Sayed (1977)       |
| 6.9                       | jacketed   | 1.53  |   | IPTWC   | Abou-Sayed (1977)       |
| Ruhr sandstone            |            |   |   |         |                         |
| 20                        | jacketed   | 1.81  |   | SENB(3) | Winter (1983)           |
| 40                        | jacketed   | 2.77  |   | SENB(3) | Winter (1983)           |
| 60                        | jacketed   | 3.37  |   | SENB(3) | Winter (1983)           |
| 60                        | jacketed   | 3.04  |   | SENB(3) | Winter (1983)           |
| 80                        | jacketed   | 4.56  |   | SENB(3) | Winter (1983)           |
| 100                       | jacketed   | 5.29  |   | SENB(3) | Winter (1983)           |
| 0                         | unjacketed | 1.30  |   | SENB(3) | Winter (1983)           |
| 20                        | unjacketed | 2.83  |   | SENB(3) | Winter (1983)           |
| 40                        | unjacketed | 3.25  |   | SENB(3) | Winter (1983)           |
| 60                        | unjacketed | 3.88  |   | SENB(3) | Winter (1983)           |
| 60                        | unjacketed | 3.88  |   | SENB(3) | Winter (1983)           |
| 80                        | unjacketed | 3.67  |   | SENB(3) | Winter (1983)           |
| 100                       | see Note 1 | 1.58  |   | SENB(3) | Winter (1983)           |
| 100                       | see Note 1 | 1.23  |   | SENB(3) | Winter (1983)           |
| 0                         | see Note 2 | 1.08  |   | CENRBB  | Muller (1984)           |
| 5                         | see Note 2 | 1.13  |   | CENRBB  | Muller (1984)           |
| 10                        | see Note 2 | 1.45  |   | CENRBB  | Muller (1984)           |
| 20                        | see Note 2 | 2.07  |   | CENRBB  | Muller (1984)           |
| 20                        | see Note 2 | 1.92  |   | CENRBB  | Muller (1984)           |
| 31                        | see Note 2 | 2.22  |   | CENRBB  | Muller (1984)           |
| 40                        | see Note 2 | 2.34  |   | CENRBB  | Muller (1984)           |
| 40                        | see Note 2 | 2.11  |   | CENRBB  | Muller (1984)           |
| 50                        | see Note 2 | 2.28  |   | CENRBB  | Muller (1984)           |
| 50                        | see Note 2 | 2.52  |   | CENRBB  | Muller (1984)           |
| 60                        | see Note 2 | 2.77  |   | CENRBB  | Muller (1984)           |
| 80                        | see Note 2 | 2.54  |   | CENRBB  | Muller (1984)           |
| 87                        | see Note 2 | 2.03  |   | CENRBB  | Muller (1984)           |
| 100                       | see Note 2 | 3.01  |   | CENRBB  | Muller (1984)           |
| 100                       | see Note 2 | 2.50  |   | CENRBB  | Muller (1984)           |
| Tennessee sandstone       |            |   |   |         |                         |
| 0                         |            | (1.58)  | 88  | DCB     | Perkins & Krech (1966)  |
| 6.9                       |            | 2.10  | 119   | DCB     | Perkins & Krech (1966)  |
| 13.8                      |            | 2.77  | 168   | DCB     | Perkins & Krech (1966)  |
| 20.7                      |            | 3.33  | 205   | DCB     | Perkins & Krech (1966)  |
| Carthage limestone        |            |   |   |         |                         |
| 0                         |            | 1.11  | 35  | DCB     | Perkins & Krech (1966)  |
| 6.9                       |            | 1.66-2.03   | 60-89   | DCB     | Perkins & Krech (1966)  |
| 10.3                      |            | 2.19  | 93  | DCB     | Perkins & Krech (1966)  |
| 13.8                      |            | 2.80  | 137   | DCB     | Perkins & Krech (1966)  |
| 20.7                      |            | 3.13-3.52   | 144-182                                       | DCB     | Perkins & Krech (1966)  |

## Referencias bibliográficas

1. Archie, G. E., "The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics," Trans., AIME, 1942, 146, 54-62.
2. Barrón Meza Miguel Angel. Tesis de Doctorado, SEPI-ESIQIE-DIM, 1997
3. Biot, M. A. and Willis, "Elastic Coefficients of the Theory of Consolidation," J. Appl. Mech., 1957, 57, 594-601.
4. Carman P.C., Fluid Flow through Granular Beds Trans. Inst. Chem. Eng. London, 1937, 15, 150-156.
5. Darcy, Henry, Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, Victor Dalmont, Paris, 1856.
6. Dipak Mazumdar and Roderick I. L. Guthrie: ISIJ International, Vol. 39, No. 6, 1999. pp 524-547.
7. E. T. Turkdogan: Trans. Met. Soc. AIME, Vol 233, 1968, pp. 2100-2112.
8. FLUENT User's Guide, Fluent Inc., Lebanon, NH. Vols 1-4, 1999.
9. Himmelblau M. David, "Process analysis and simulation". Deterministic Systems. John Wiley & Sons, Inc., New York London Sydney, 1968.
10. Hoffmann A. Klaus and Chiang T. Steve, Computational Fluid Dynamics for Engineers. A publication on Engineering Education System, Austin, Texas, USA. 1989.
11. ISO 5725 Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results (parte 1 a 6).
12. Johnstone, R. E., and Thring, M. W., "Pilot Plants, Models, and Scale-Up Methods in Chemical Engineering", McGraw-Hill, New York, 1957.
13. Jones and Launder: Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 15, 1972, pp. 301-303.
14. Katz, A. J. and Thompson, A. H., "Quantitative Prediction of Permeability in Porous Rock," Phys. Rev. B, 1986, 34, 8179-81.
15. Kozeny J., Uber Kapillare Leitung des Wassers im Boden, Sitzungber, Akad. Wiss. Wien, Math Naturw Klasse, Abt. II A, 1927, 136, 271 - 306.
16. Launder and Spalding: Comp. Meth. Appl. Mech. Eng., Vol. 3, 1974, pp. 269-289.

17. Michael L. Lowry and Yogeshwar Sahai. Steelmaking Conference Proceedings 1989.
18. Moran, J. H. and Papaconstantinou, C. M., "A Novel Dynamic Measurement of Permeability," SPEJ, December 1981, 670-8.
19. Octave Levenspiel, Ingeniería de las reacciones químicas. John Wiley & Sons Inc., New York, 1967.
20. Ondracek, G., "Effect of Microstructure on Conductivity of Composite Materials," Zeits. fuer Metallkunde, Sept. 1986, 77, NO. 9, 603-610.
21. Perkins, T. K. and Krech, W. W. (1966). J. Soc. Petrol. Eng. 6, 308-314.
22. Swanson, B. F., "A Simple Correlation Between Permeability and Mercury Capillary Pressures," J. Pet. Tech., 1981, 33, 2498-2504.
23. Y. Sahai: Mathematical Modelling of materials Processing Operations, Ed. by J. Szekely et al., TMS. Warrendale. PA. 1987.
24. Y. Sahai and R. Ahuja: Ironmaking Steelmaking. Vol 13, 1986, pp. 241-249.
25. Yogeshwar Sahai and Toshihiko EMI: ISIJ International, Vol. 36, No. 6, 1996, pp. 667-671.
26. Zoback, M.D. (1978) Proc. 19th U.S. Symp. Rock Mech., Reno, Nevada, 83-85.

## Bibliografía

1. American Petroleum Institute, Recommended Practice for core analysis procedures, API-RP-40.
2. B. K. Atkinson, Fracture Mechanics of rock, Academy Press Geology Series 1987.
3. BICKING A. C. Some uses of statistics en the Planning of Experiments. Industrial Quality Control, Vol. 10 No. 4, Enero 1954.
4. COX D. R. Planning of experiments. John Wiley and Sons, Inc. New York, 1978
5. Karl T. Ulrich, and Steven D. Eppinger, Product Design and Development, McGraw Hill, 1995.
6. KEMPTHORNE O. The design and analysis of experiments. John Wiley and Sons. , New York, 1952, p.10
7. Manual del Equipo de Desplazamiento de Fluidos.
8. MENDEZ I. Lineamientos Generales para la planeación de Experimentos. Monografía No. 15, Vol. 15 IIMAS. 1980.
9. OSTLE B. Estadística Aplicada, Limusa-Wiley, México, 1975, Cap. 10
10. Parkar, J., Boggs, J., and Blick, E., "Introduction to Fluid Mechanics and Heat Transfer", Addison-Wesely, New York 1969.
11. Royal Eugene Collins, Flow of fluids, Penn Well Books, 1961
12. S. López-Ramírez, J. Palafox-Ramos, R. D. Morales, M. A Barrón-Meza and M. V. Toledo: Steel Research. Vol. 69, No. 10+11, 1999, pp. 423-428.
13. S. López-Ramírez, R. D. Morales and J.A.R. Serrano: Numerical Heat Transfer. Part A: Applications, Vol. 37, 2000, pp. 68-86.
14. W. Shyy, S. S. Thakur, H. Ouyang, J. Liu and E. Bloesch: Computational Techniques for Complex Transport Phenomena, Cambridge University Press 1997, pp. 169-172.