

**EVALUACION Y FORMULACION TEORICA SOBRE LA EXPANSION DEL  
LECHO FILTRANTE EN UN FILTRO RAPIDO DE ARENA**

**SANDRA MILENA ANAYA LEAL  
CESAR AUGUSTO VELASCO MARTINEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CÍVIL  
BUCARAMANGA  
2006.**

**EVALUACION Y FORMULACION TEORICA SOBRE LA EXPANSION DEL  
LECHO FILTRANTE EN UN FILTRO RAPIDO DE ARENA**

**SANDRA MILENA ANAYA LEAL  
CESAR AUGUSTO VELASCO MARTINEZ**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL.**

**DIRECTOR  
JORGE GÓMEZ SANCHEZ  
INGENIERO SANITARIO, MSC.**

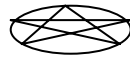
**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2006.**

## DEDICATORIA

A mis padres Celina y Vicente, a mis hermanos Hemzzerth Manuel y Dennis Javier, y por último pero no menos importante a mía tiocha Blanca.

A la diosa y al dios.

Gracias totales.



**Samy...**

A mi esposa Sandra, a mi hijo Juan Angel, a mis padres Cosme y Tina, a mi hermano Ing. Luis Fernando, al resto de la familia, y a mi compañera de proyecto Samy.

**Cesar...**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a todas y cada una de las personas que nos acompañaron durante nuestra vida universitaria, profesores, directivos y compañeros de estudio; sin ellos este largo proceso no se hubiese podido llevar a feliz término.

Enaltecemos la colaboración de nuestro amigo y director del Proyecto Ingeniero Jorge Gómez Sánchez, porque sin él y su curiosidad, no se habría forjado la idea de desarrollar esta investigación.

No olvidamos mencionar a Jairo “la mechuda” Hernández Salazar por su paciencia, colaboración y sentido de humor, junto con él a “El Club del Tinto”, que para nombrarlos son muchos pero no los queremos dejar por fuera.

Al Todopoderoso quien nos iluminó en este largo caminar, para que siempre nos acompañe durante nuestra vida profesional y siga siendo el MAESTRO más especial que la vida nos brinda.

Samy & Cesar....

## CONTENIDO

INTRODUCCION .....	18
1. MARCO TEORICO.....	22
1.1 METODOS DE PREDICCION.....	22
1.1.1 Hidráulica del lavado.....	26
2. ENSAYOS PARA AGREGADOS FINOS .....	34
2.1 GRANULOMETRÍA LECHO FILTRANTE .....	35
2.1.1 Norma ICONTEC 237.....	35
2.1.1.1 Objeto.....	35
2.1.1.2 Definiciones.....	35
2.1.1.2.1 Peso específico .....	35
2.1.1.2.2 Peso específico aparente seco .....	35
2.1.1.2.3 Peso específico aparente saturado .....	36
2.1.1.2.4 Absorción .....	36
2.1.1.3 Ensayos.....	36
2.1.1.3.1 Aparatos .....	36
2.1.1.3.2 Preparación de la muestra .....	36
2.1.1.3.3 Procedimiento .....	37
2.1.1.3.4 Cálculos.....	37
2.1.1.3.4.1 Peso específico .....	38
2.1.1.3.4.2 Peso unitario seco .....	38
2.1.1.3.4.3 Peso unitario y de superficie seca .....	38
2.1.1.3.4.4 Absorción .....	38
2.1.1.3.5 Resultados .....	39
2.1.1.3.5.1 Gravedades específicas .....	39
2.1.1.3.5.2 Peso unitario .....	39
2.1.2 Norma ICONTEC 92 (1ª revisión).....	40
2.1.2.1 Objeto.....	40

2.1.2.2 Ensayos.....	40
2.1.2.2.1 Aparatos .....	40
2.1.2.2.1.1 Balanza .....	40
2.1.2.2.1.3 Recipientes de medida .....	40
2.1.2.2.2 Masa unitaria del agregado compactado.....	41
2.1.2.2.2.1 Método de apisonado .....	41
2.1.2.2.2.2 Método de vibrado.....	41
2.1.2.2.3 Masa unitaria del agregado suelto .....	42
2.1.2.3 Resultados .....	42
3. MODELO EXPERIMENTAL .....	46
3.1 PARTES Y FUNCIONAMIENTO .....	46
3.1.1 Sistema de aducción .....	48
3.1.2 Válvula de regulación de flujo.....	48
3.1.3 Filtro a escala .....	49
3.1.3.1 Rejilla de distribución.....	51
3.1.3.2 Base granular .....	51
3.1.3.3 Material filtrante .....	51
3.1.3.4 Embudo de desagüe .....	52
3.1.3.5 Flauta de distribución .....	52
3.1.4 Tanque de medición.....	52
3.1.4.1 Vertedero.....	53
3.1.5 Desagüe de limpieza.....	53
4. VERIFICACION POR VELOCIDADES.....	54
4.1 RECOLECCION DE DATOS.....	54
4.2 ANALISIS DE DATOS .....	71
4.2.1 Veloidades de Sedimentación .....	71
4.2.2 Evaluación de la Constante n.....	90
5. VERIFICACIÓN POR PRESIONES .....	96
5.1 RECOLECCION DE DATOS.....	99
5.2 ANALISIS DE DATOS .....	107
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	123

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características de la arena para filtros rápidos .....	34
Tabla 2. Dimensiones de los recipientes .....	41
Tabla 3. Granulometría de lecho filtrante de arena .....	43
Tabla 4. Velocidad de sedimentación.....	45
Tabla 5. Medición N°1 .....	56
Tabla 6. Medición N° 2 .....	57
Tabla 7. Medición N° 3 .....	58
Tabla 8. Medición N° 4 .....	59
Tabla 9. Medición N° 5 .....	60
Tabla 10. Medición N° 6 .....	61
Tabla 11. Medición N° 7 .....	62
Tabla 12. Medición N° 8 .....	63
Tabla 13. Medición N° 9 .....	64
Tabla 14. Medición N° 10 .....	65
Tabla 15. Medición N° 11 .....	66
Tabla 16. Medición N° 12 .....	67
Tabla 17. Medición N° 13 .....	68
Tabla 18. Medición N° 14 .....	69
Tabla 19. Medición N° 15 .....	70
Tabla 20. Determinación del porcentaje de error respecto a las velocidades de sedimentación reales vs calculadas .....	71
Tabla 21. Caudales y velocidades de lavado definitivas. ....	88
Tabla 22. n para velocidades de sedimentación medidas.....	91
Tabla 23. n para velocidades de sedimentación calculadas por fórmula .....	93
Tabla 24. Valores promedios de la constante n .....	94

Tabla 25. Toma 1 .....	100
Tabla 26. Toma 2 .....	101
Tabla 27. Toma 3 .....	102
Tabla 28. Toma 4 .....	103
Tabla 29. Toma 5 .....	104
Tabla 30. Toma 6 .....	105
Tabla 31. Toma7 .....	106
Tabla 32. Masa total del VC para cada expansión. ....	119
Tabla 33. Cálculo de la altura piezométrica $h_1$ .....	120
Tabla 34. Porcentaje de error de $h_1$ .....	121
Tabla 35. Presiones en el punto 1.....	121

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de cuerpo libre de una partícula .....	23
Figura 2. Porosidad del lecho vs. Velocidad Ascensional de Flujo.....	27
Figura 3. Curva granulométrica del lecho filtrante de arena.....	43
Figura 4. Plano del sistema .....	46
Figura 5. Modelo de filtro en acrílico .....	49
Figura 6. Serie de tiempo. Medición N° 1.....	73
Figura 7. Correlograma. Medición N° 1.....	73
Figura 8. Ajuste a una función normal. Medición N° 1.....	73
Figura 9. Serie de tiempo. Medición N° 2.....	74
Figura 10. Correlograma. Medición N° 2.....	74
Figura 11. Ajuste a una función normal Medición N° 2.....	74
Figura 13. Correlograma. Medición N° 3.....	75
Figura 14. Ajuste a una función normal Medición N° 3.....	75
Figura 15. Serie de tiempo. Medición N° 4.....	76
Figura 16. Correlograma. Medición N° 4.....	76
Figura 17. Ajuste a una función normal Medición N° 4.....	76
Figura 18. Serie de tiempo. Medición N° 5.....	77
Figura 19. Correlograma. Medición N° 5.....	77
Figura 20. Ajuste a una función normal Medición N° 5.....	77
Figura 21. Serie de tiempo. Medición N° 6.....	78
Figura 22. Correlograma. Medición N° 6.....	78
Figura 23. Ajuste a una función normal Medición N° 6.....	78
Figura 24. Serie de tiempo. Medición N° 7.....	79
Figura 25. Correlograma. Medición N° 7.....	79
Figura 26. Ajuste a una función normal. Medición N° 7.....	79
Figura 27. Serie de tiempo. Medición N° 8.....	80
Figura 28. Correlograma. Medición N° 8.....	80

Figura 29. Ajuste a una función normal. Medición N° 8.....	80
Figura 30. Serie de tiempo. Medición N° 9 .....	81
Figura 31. Correlograma. Medición N° 9 .....	81
Figura 32. Ajuste a una función normal. Medición N° 9.....	81
Figura 33. Serie de tiempo. Medición N° 10 .....	82
Figura 34. Correlograma. Medición N° 10 .....	82
Figura 35. Ajuste a una función normal. Medición N° 10.....	82
Figura 36. Serie de tiempo. Medición N° 11 .....	83
Figura 37. Correlograma. Medición N° 11. ....	83
Figura 38. Ajuste a una función normal. Medición N° 11.....	83
Figura 39. Serie de tiempo. Medición N° .12.....	84
Figura 40. Correlograma. Medición N° 12. ....	84
Figura 41. Ajuste a una función normal. Medición N° 12.....	84
Figura 42. Serie de tiempo. Medición N° 13 .....	85
Figura 43. Correlograma. Medición N° 13. ....	85
Figura 44. Ajuste a una función normal. Medición N° 13.....	85
Figura 45. Serie de tiempo. Medición N° 14 .....	86
Figura 46. Correlograma. Medición N° 14. ....	86
Figura 47. Ajuste a una función normal. Medición N° 14.....	86
Figura 48. Serie de tiempo. Medición N° 15.....	87
Figura 49. Correlograma. Medición N° 15 .....	87
Figura 50. Ajuste a una función normal. Medición N° 15.....	87
Figura 51. Caudal vs Expansión del lecho .....	89
Figura 52. Velocidad ascensional vs Expansión del lecho .....	89

## LISTA DE FOTOGRAFIAS

Foto 1. Sistema hidráulico del filtro .....	47
Foto 2. Válvula de regulación .....	48
Foto 3. Filtro .....	49
Foto 4. Distribución de piezómetros .....	97
Foto 5. Volúmenes de control.....	115
Foto 6. Volumen de control 1 .....	117

## GLOSARIO

$F_f$  = Fuerza de Flotación.

$F_g$  = Fuerza Gravitacional.

$\rho$  = Densidad del Líquido.

$g$  = Fuerza de la gravedad.

$V$  = Volumen de la partícula.

$V_{\text{tanque}}$  = Volumen del tanque de aforo.

$\rho_s$  = Densidad del sólido.

$F_i$  = Fuerza que impulsa la partícula hacia abajo.

$F_R$  = Fuerza de rozamiento.

$C_D$  = Coeficiente de fricción.

$A$  = Área transversal de la partícula.

$v_s$  = Velocidad de sedimentación de la partícula.

$v_{s \text{ Experimental}}$  = Velocidad experimental de sedimentación de la partícula

$S_S$  = Peso específico de la partícula.

$\nu$  = Viscosidad cinemática.

$v_a$  = Velocidad ascensional del flujo.

$h_i$  = Pérdida de carga.

$h_L$  = Pérdida de carga del lecho.

$\Delta h$  = Diferencial de profundidades o alturas del tanque aforado.

$L$  = Profundidad o altura inicial del lecho

$L_e$  = Profundidad o altura del lecho expandido.

$p_o$  = Porosidad inicial.

$p_e$  = Porosidad del lecho expandido.

$Q_a$  = Flujo de lavado.

$A_{\text{tubo}}$  = Área del filtro.

$V_T$  = Volumen total de arena.

$V_V$  = Volumen de vacíos.

$d_e$  = Diámetro efectivo de la partícula.

$d_i$  = Diámetro del tamiz que pasa la partícula.

$d_{i+1}$  = Diámetro del tamiz en que se retiene la partícula.

$a$  = Ancho del tanque de aforo.

$l$  = Longitud del tanque de aforo.

$\varepsilon$  = Expansión del lecho.

$X_i$  = Porcentaje de material retenido en los tamices.

$t/t_m$  = Tiempo entre los diferentes  $\Delta h$ .

$n$  = Constante de porosidad.

$n_{LAB}$  = Constante de porosidad obtenido en laboratorio.

$n_{FORM}$  = Constante de porosidad obtenido por fórmula.

$F_n$  = Fuerza aplicada en el punto  $n$ .

$W$  = Masa de filtro en el volumen de control.

$V_1$  y  $V_2$  = Velocidad media del líquido.

$\gamma$  = Peso específico del agua.

$h_1$  y  $h_2$  = Altura de la columna de agua en el piezómetro.

$m_a$  = Masa de la arena.

$d_a$  = Densidad de la arena.

$m_w$  = Masa del agua.

$d_w$  = Densidad del agua.

$V$  = Volumen del filtro.

$M_t$  = Masa total para el volumen de control.

$m_w^*$  = Masa de agua adicional para el volumen de control.

$P$  = Presión.

$H_L$  = Altura libre entre la superficie del material y el embudo de desagüe.

## RESUMEN

TITULO: Evaluación y formulación teórica sobre la expansión del lecho filtrante en un filtro rápido de arena \*

AUTOR: Sandra Milena Anaya Leal  
Cesar Augusto Velasco Martinez \*\*

PALABRAS CLAVES: Expansión, Lecho, Filtro, Rápido, Arena

El lavado se hace invirtiendo el sentido de flujo en el filtro, inyectando agua por la parte inferior y recolectándola en la parte superior. Este retrolavado hace que el medio se expanda dentro de un lapso de tiempo, de tal forma que el material retenido sea arrastrado y así lograr una limpieza. Esta expansión depende fundamentalmente de la velocidad de lavado, granulometría del lecho, forma y densidad de los granos y de la temperatura del agua. Las expresiones que relacionan los procesos hidrodinámicos de lavado de los medios filtrantes están gobernados por la naturaleza de las condiciones de flujo, sin embargo el poco entendimiento de los procesos hidrodinámicos (principalmente la determinación del régimen de flujo) durante la fluidización de medios filtrantes es una de las causas más frecuentes en las fallas durante la operación de filtros y éstos pueden presentar errores, por lo cual las plantas de tratamiento de agua potable construidas bajo dichas apreciaciones teóricas pudieran presentar problemas tales como: malgasto de agua durante el proceso de lavado lo cual acarrea desperdicio del líquido vital tan necesario en esta época y últimamente escaso; o el sobre diseño de los tanques de filtración y por ende costos posiblemente innecesarios.

---

\* Proyecto de Grado.

\*\* Facultad de Ciencias Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil.  
Director: Ingeniero Jorge Gómez Sánchez.

## ABSTRACT

TITLE: Evaluation and theoretical formulation on the expansion of the filter bed in a fast sand filter. \*

AUTHOR: Sandra Milena Anaya Leal

Cesar Augusto Velasco Martinez \*\*

KEY WORDS: Expansion, bed, Filter, Express, Sand

The wash is made investing the sense of flow in the filter, injecting water for the inferior part and gathering it in the superior part. This retrowash makes that the sand-bed expands inside a lapse of time, in such a way that the retained material is dragged and this way to achieve a cleaning. This expansion depends fundamentally on the wash speed, grain of the channel, forms and density of the grains and of the temperature of the water. The expressions that relate the hydrodynamic processes of laundry of the means filtrantes are governed by the nature of the conditions of flow, however the little understanding of the hydrodynamic processes (mainly the determination of the régime of flow) during the fluidization processes of means filtrantes it is one of the causes but you frequent in the flaws during the operation of filters and these can present errors, reason why the plants of treatment of water drinkable built first floor this theoretical appreciations could present such problems as: waste of water during the laundry process that which carries, waste of the liquid so necessary in this time lately scarce; or the envelope design of the filtration tanks and for possibly unnecessary costs.

---

\* Degree Project.

\*\* Faculty of fisico-mecanicas sciences. School of Civil Engineering  
Director: Engineer Jorge Gómez Sánchez.

## INTRODUCCION

El uso de filtros de flujo ascendente data de 1685, pero hasta 1889 se obtuvo su patente. En ciudades como Greenock en Escocia y Richmond en Estados Unidos los emplearon a principios del siglo XIX, bajo patente; los cuales fueron llamados filtros mecánicos o americanos, en contraposición a los filtros ingleses.

Smith Hyatt en 1855 fabricó en Somerville el primer filtro rápido. La gran idea fue la forma de limpiar el lecho filtrante, pues en lugar de hacerse frotando la capa superior del mismo, el cual era un sistema largo y costoso; se hacía invirtiendo el sentido del flujo, donde en el proceso de filtrado era de arriba hacia abajo y en el lavado de abajo hacia arriba.

Este sistema pasó a Bélgica, Alemania y Francia y pronto surgieron varias compañías que obtuvieron patentes para sus respectivos diseños. En los últimos sesenta años, tanto la teoría como la práctica de la filtración se han venido desarrollando notablemente, pero sin que se les hayan hecho modificaciones sustanciales al proceso inicial.

Las plantas de tratamiento de agua permanecieron casi inmodificables desde la época de Louisville y Little Fall (1898) hasta principios de la década del 50, durante los cuales Hazen, Miller, Baylis, Langelier, Camp, Iwasaki, y otros hicieron importantes estudios de los cuales todavía tienen vigencia, el desconocimiento de las causas de los fenómenos llevó a los proyectistas a diseñar plantas apoyándose principalmente en especificaciones simples, basadas en la experiencia de autoridades reconocidas en la materia.

En la década del 50 al 60 se amplió mucho más la teoría y las formulaciones matemáticas además se obtuvieron alcances significativos en la tecnología del agua. Los mecanismos que operan los procesos de coagulación, sedimentación y filtración se estudiaron exhaustivamente. Esto condujo a la introducción de modificaciones tales como los medios filtrantes múltiples, los sedimentadores tubulares, el uso de ratas declinantes, la generalización de los polielectrolitos como ayudantes en la filtración, etc.

La filtración es la operación final realizada en una Planta de Tratamiento de Agua y, por consiguiente, es la responsable principal de producir agua de calidad compatible con los patrones de potabilidad. Este proceso consiste básicamente en la remoción y separación de las partículas y microorganismos que no han quedado retenidos en los procesos previos a la purificación (coagulación y sedimentación); por tanto el trabajo que los filtros desempeñan, depende directamente de la mayor o menor eficiencia de los procesos preparatorios. Fundamentalmente el almacenamiento de los filtros consiste en un apropiado lavado del medio, pues en este proceso los granos se recubren de material depositado en ellos, obstruyendo paulatinamente el paso del flujo y así aumentando el grado de colmatación.

Este proceso es muy complejo ya que envuelve a una serie de mecanismos desde la simple acción de tamizado hasta fenómenos de impacto inercial, sedimentación, intercepción, potencial eléctrico, difusión, floculación, puente químico y en algunos casos actividad biológica. Aún no se ha definido cual es el mecanismo más importante, pero no hay duda sobre la acción simultánea de todos ellos, con mayor o menor intensidad a lo largo de la filtración. Las características del agua aplicada a los filtros determinan la calidad del efluente, principalmente a través de la concentración, naturaleza, tamaño y propiedades de adherencia de las partículas.

Las expresiones que se refieren a los procesos hidrodinámicos del lavado de medios filtrantes, están gobernadas por la naturaleza de las condiciones de flujo,

sin embargo existe muy poco entendimiento de estos procesos (principalmente la determinaron del régimen de flujo) durante la operación de filtros.

Los métodos de predicción mas usados son, en su mayoría empíricos o semi-empíricos, como por ejemplo los propuestos por Cleasby y Wood, 1974, Fair y Geyer, 1973 y correcciones realizadas por otros investigadores entre los que se cuentan Ritcher (en Pérez, 1997 y Pérez, J.A., 1977 y Munera y Quinceno, 1978). En la actualidad se cuenta con nuevos modelos de predicción que se basan en suposiciones físicas mucho mas acertadas, desarrolladas por autores tales como Cleasby y Dharmarajah, 1986 y Sholji, 1987, que presentan resultados mucho mejores que los obtenidos con los métodos clásicos.

La expansión del lecho es una medida básica que debe observarse cuidadosamente durante el lavado. Teóricamente, el lecho filtrante tenderá a expandirse, según la velocidad con la cual se inyecte el agua de lavado y el diámetro del medio granular. Como se hizo mención, el lavado se hace invirtiendo el sentido del flujo inyectando agua por la parte inferior y recolectándola en la parte superior. Este retrolavado hace que el medio se expanda durante un lapso, de tal forma que el material atascado sea impulsado y así lograr la limpieza. Esta expansión depende fundamentalmente de la velocidad de lavado, la granulometría del lecho, la forma y densidad de los granos y de la temperatura del agua.

Para estimar la expansión del lecho se han desarrollado en los últimos treinta años diversos métodos de predicción de comportamiento del medio bajo flujo ascendente, destacándose el trabajo de Fair y Geyer, 1973, Cleasby J.L, y Wood en 1974 y modificaciones propuestas por otros autores, por ejemplo las hechas por Ritcher (en Perez, 1997), Munera y Quinceno, 1978, Carmona e Hincapié, 1980.

La mayoría de las plantas de tratamiento en nuestro país son copias modificadas de las que se usan en los países industrializados ya que por su gran desarrollo

comercial, impulsa el uso de equipos producidos por ellos mismos, los cuales son exportados conjuntamente con la tecnología que los origina.

En el desarrollo de este trabajo se usó el método clásico, ya que la mayoría, por no decir todas las plantas de tratamiento de nuestro medio están calibradas con esta técnica. Sin embargo, el procedimiento tiene ciertas desventajas, entre las que se puede mencionar que no tiene en cuenta para nada la forma de los granos que influye, como se ha dicho, en la expansión del lecho; por tal motivo, se ha observado unas expansiones exageradas respecto a la profundidad del lecho.

Con este trabajo no se pretende encontrar nuevos modelos que predigan la expansión de medios filtrantes, simplemente se quiere hacer una revisión del método de predicción de expansión de medios filtrantes sencillos durante el retrolavado el cual es usado comúnmente en el diseño de filtros para plantas de tratamientos de aguas, basado fundamentalmente en criterios empíricos y semi-empíricos, y que han sido evaluados en proyectos de grado anteriores. Este estudio permitirá verificar la formulación teórica para la evaluación de la expansión del lecho filtrante y además se hará un estudio de las fuerzas de presión a lo largo del lecho, lo cual nos puede dar un nuevo enfoque sobre la hidráulica de lavado en filtros.

## 1. MARCO TEORICO

### 1.1 METODOS DE PREDICCIÓN

A continuación expondrá las teorías usadas para la evaluación de la velocidad de sedimentación de la partícula y la expansión del lecho filtrante.<sup>1</sup>

Cuando el agua es floculada es necesario separar estas partículas sólidas suspendidas del agua. Para ello se deja sedimentar el líquido, es decir, separa los sólidos más densos que el agua los que se precipitan al fondo del tanque con una velocidad de sedimentación calculable por medio del análisis de fuerzas actuantes en el cuerpo libre de la partícula suponiendo esta esférica; luego se filtra el líquido, es decir, separa los sólidos que tienen una densidad cercana a la del agua o que han sido suspendidos por cualquier causa en el flujo y no quedan removidos en el proceso de sedimentación.

Para el análisis de la sedimentación de partículas discretas en un líquido estático, en el grano actúan directamente dos fuerzas: la Fuerza de Flotación  $F_F$ , que es igual al peso del volumen del líquido que desplaza la partícula; y la Fuerza Gravitacional  $F_G$ .

---

<sup>1</sup> Teoría Diseño y Control de los Procesos de Clarificación del Agua. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Capítulos V y VIII

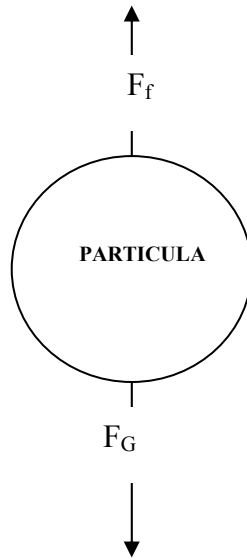


Figura 1. Diagrama de cuerpo libre de una partícula

Sabiendo que:

$$F_F = \rho * g * V \quad (1-1) \quad \text{Y} \quad F_G = \rho_s * g * V \quad (1-2)$$

La diferencia será igual al la fuerza que induce hacia abajo la partícula:

$$F_I = g * V(\rho_s - \rho) \quad (1-3)$$

Gracias a esta fuerza, la partícula cae con velocidad creciente, pero a lo largo de su recorrido el líquido genera fricción en ella creando una fuerza de rozamiento que se puede expresar de la siguiente manera:

$$F_R = C_D * A * \rho * \frac{V_s^2}{2} \quad (1-4)$$

Cuando  $F_R = F_G$ , la partícula alcanza la velocidad de sedimentación o velocidad límite, la cual conserva durante lo que le queda de su descenso:

$$g * V * (\rho_s - \rho) = C_D * A * \rho \frac{V_s^2}{2} \quad (1-5)$$

Despejando  $v_s$  de la ecuación se obtiene:

$$v_s = \sqrt{\frac{2g * \rho_s - \rho * V}{C_D * \rho * A}} \quad (1-6)$$

$V$  = volumen de la partícula

$A$  = área transversal de la partícula

$C_D$  = coeficiente de fricción

$\rho$  = densidad del líquido

$\rho_s$  = densidad del sólido

$g$  = fuerza de gravedad

Si se supone sólidos esféricos:

$$A = \frac{\Pi * d^2}{4} \quad (1-7)$$

Y

$$V = \frac{\Pi * d^3}{6} \quad (1-8)$$

Relacionando las anteriores ecuaciones tenemos:

$$\frac{V}{A} = \frac{\Pi/6 * d^3}{\Pi/4 * d^2} = \frac{2}{3} * d \quad (1-9)$$

Donde  $d$  = diámetro de la partícula.

Reemplazando en la ecuación de velocidad de sedimentaron, se obtiene:

$$v_s = \sqrt{\frac{4}{3} * \frac{g}{C_D} * \frac{\rho_s - \rho}{\rho} * d} \quad (1-10)$$

Para transformar a un valor en cm/seg:

$$v_s = 36 * \sqrt{(S_s - 1) \frac{d}{C_D}} \quad (1-11) \quad \text{Con} \quad S_s = \frac{\rho_s}{\rho} \quad (1-12)$$

$S_s$  es la densidad relativa de la partícula.

La anterior describe la caída de una partícula esférica en un fluido y es la más usada en los textos.

El coeficiente de fricción de Newton varía con el Número de Reynolds  $N_R$  así:

$$C_D = \frac{24}{N_R} + \frac{3}{\sqrt{N_R}} + 0.34 \quad (1-13) \quad \text{Con} \quad N_R = \frac{v_s * d}{\nu} \quad (1-14)$$

Donde  $\nu$  es la velocidad cinemática.

Como el Número de Reynolds varia con las condiciones de flujo, se puede considerarse tres regiones en la ecuación anterior:

1. Región de Flujo Laminar; en la cual  $N_R < 0.5$  y  $C_D \approx 24/N_R$ . Ley de Stokes.  
Entonces la ecuación queda:

$$v_s = \frac{g}{18} (S_s - 1) \frac{d^2}{\nu} \quad (1-15) \quad \text{Ecuación de Stokes.}$$

2. Región de Flujo Viscoso,  $N_R > 2000$  y  $C_D \approx 0.4$ :

$$v_s \sqrt{3.3 * g * (S_s - 1)d} \quad (1-16)$$

3. La región de Transición o intermedia entre los dos extremos. En este caso  $C_D$  hay que calcularlo con la ecuación 1.13 y conociendo con anterioridad  $N_R$  y  $C_D$ .

### 1.1.1 Hidráulica del lavado.

La velocidad de filtración o velocidad ascensional de lavado está directamente relacionada con la expansión del lecho filtrante. La expansión exagerada, no beneficia al lavado, pues impide el roce o frotamiento de unos granos con otros, evitando el desprendimiento de la película adherida a ellos durante el proceso de filtración.

Al introducir agua ascendentemente en un medio granular, puede ocurrir:

1. Si  $v_a < v_s$ , el lecho no se expande, pero la velocidad entre los granos aumenta hasta que la fuerza de arrastre del flujo sea mayor que el peso de la partícula.
2. Si se sigue aumentando la rata de flujo hasta que  $v_a > v_s$ , el lecho se expande más y más y su porosidad  $p$  aumenta proporcionalmente. En ese momento el grano queda suspendido en la corriente ascendente. La componente vertical de la velocidad del flujo entre las partículas, es mayor que la que existe encima del lecho.
3. Y si  $v_a > v_s$  crítico, el lecho se “fluidiza”, la rata de lavado sigue aumentando, la separación entre partículas se incrementa y se rompe el equilibrio es decir, los granos quedan flotando libremente en el medio, no hay roce entre ellos y estos son arrastrados por el agua.

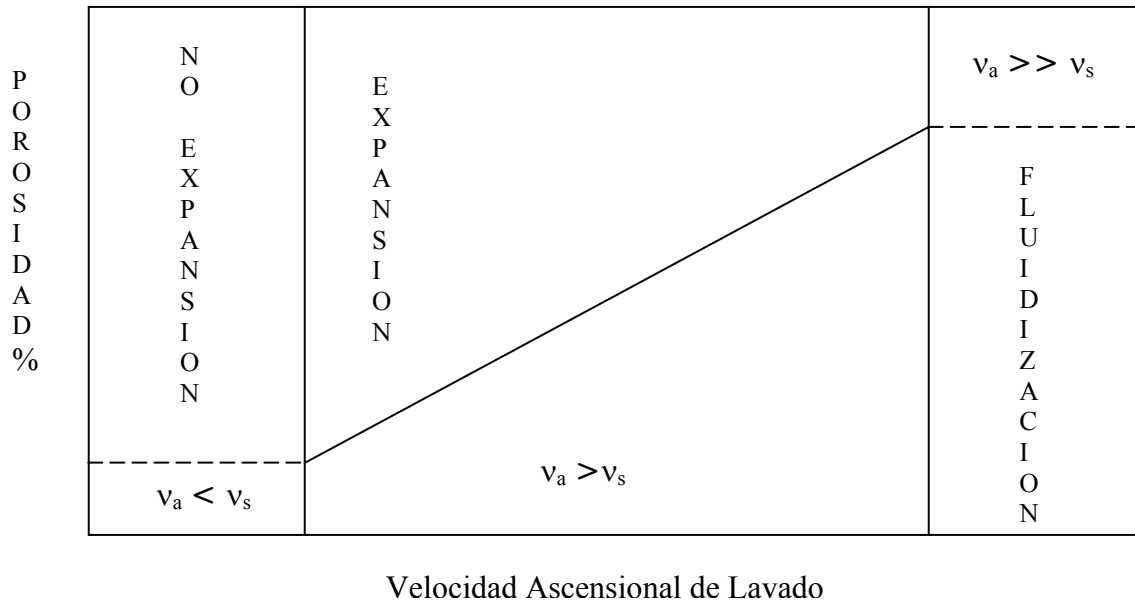


Figura 2. Porosidad del lecho vs. Velocidad Ascensional de Flujo.

Reconociendo que la fricción producida por el flujo en los granos para que haya expansión debe ser igual al peso de ellos en el agua, Hatch y Fair basándose en el área unitaria de una columna de arena establecieron:

$$h_i * \rho * g = L_e * (\rho_s - \rho) * g * (1 - p_e) \quad (1-17)$$

$h_i$ : Pérdida de carga para producir una determinada expansión.

$\rho$ : Densidad del líquido

$\rho_s$ : Densidad del sólido

$p_e$ : Porosidad del lecho expandido

$L_e$ : Profundidad o altura del lecho expandido

Haciendo:

$$i = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} (1 - p_e) = (S_s - 1) * (1 - p_e) \quad (1-18)$$

Queda:

$$\frac{h_l}{L_e} = i \quad (1-19)$$

Para la situación de equilibrio la velocidad de sedimentación debe ser igual a la velocidad de ascenso del flujo o velocidad de lavado:

$$v_i = v_a = Q_a \quad (1-20)$$

$Q_a$ : Caudal de lavado ( $m^3/seg$ )

$A$ : Area del filtro ( $m^2/seg$ )

Se ha encontrado que  $v_a = v_s$  multiplicada por la porosidad elevada a la potencia  $n$ .

Richardson y Kaki (1954) definen la porosidad del lecho expandido como:

$$P_e = \left( \frac{v_a}{v_s} \right)^n \quad (1-21)$$

La porosidad es otra característica del medio filtrante que influye en la eficiencia de los filtros. En los parámetros de diseño no hacen mención a éste parámetro, sin embargo el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), contempla un valor de  $n$  en arenas entre 0.22 y 0.20,  $v_s$  es la velocidad individual de sedimentación de cada grano en caída no autointerferida la cual se calcula por la formula anteriormente desarrollada:

$$v_s = 36 * \sqrt{(S_s - 1) \frac{d}{C_D}} \quad (\text{cm/sg}) \quad (1-22)$$

El coeficiente de Fricción,  $C_D$  es función del Número de Reynolds,  $N_R$  y este a su vez de la Viscosidad Cinemática  $\nu$ , la velocidad de sedimentación es directamente proporcional a al temperatura y por tanto para que se guarde la relación de porosidad,  $v_a$  debiera aumentar con ella.

La expansión del lecho “ $\varepsilon$ ” producida por un flujo  $Q_a$  es igual a:

$$\varepsilon = \frac{L_e}{L} - 1 \quad (1-23)$$

Ordenando:  $L_e = (\varepsilon + 1) L \quad (1-24)$

Si el volumen  $V$  de arena es igual a:

$$V = (1 - p_o) L \quad \text{ó} \quad V = (1 - p_e) L_e \quad (1-25)$$

Los espesores del lecho para cada porosidad (inicial y final) serán:

$$L_o = \frac{V}{(1 - p_o)} \quad (1-26)$$

$$L_e = \frac{V}{(1 - p_e)} \quad (1-27)$$

Reemplazando en la expresión de la expansión:

$$\varepsilon = \frac{\frac{V}{1 - p_e} - p_e}{\frac{V}{1 - p_o} - p_o} - 1 = \frac{1 - p_o}{1 - p_e} - 1 = \frac{p_e - p_o}{1 - p_e} \quad (1-28)$$

Donde  $p_o$  es la porosidad inicial del lecho antes de expandirlo. Si se reemplaza  $p_e$  por su valor, obtenemos:

$$\varepsilon = \frac{\left(\frac{v_a}{v_s}\right)^{0.22} - p_o}{1 - \left(\frac{v_a}{v_s}\right)^{0.22}} \quad (1-29)$$

Si se sabe la porosidad inicial del lecho  $p_o$ , la velocidad del lavado  $v_a$ , el diámetro y el coeficiente de fricción de los granos, se puede hallar la expansión del lecho.

Los granos durante el lavado se estratifican según su grosor, los más finos arriba y los más gruesos abajo. Si se subdivide el lecho en secciones horizontales las cuales contienen partículas de tamaño uniforme, se suman las expansiones de cada capa para encontrar el porcentaje de expansión de todo el lecho completo:

$$E = \sum \Delta \varepsilon X_i = \sum_{L=L}^{L=L_e} \frac{\left(\frac{v_a}{v_s}\right)^{0.22} - p_o}{1 - \left(\frac{v_a}{v_s}\right)^{0.22}} X_i \quad (1-30)$$

La pérdida de carga se calcula de forma análoga:

$$h_l = \sum \Delta h_l X_i = \sum \Delta L_e (S_s - 1) (1 - p_e) \quad (1-31)$$

Donde:  $\Delta L_e = (\sum \varepsilon + 1) L X_i \quad (1-32)$

Y por tanto:  $h_l = \sum (\Delta \varepsilon + 1) L X_i (S_s - 1) (1 - p_e) \quad (1-33)$

La inquietud para el desarrollo de este proceso investigativo, surgió del análisis del ejemplo propuesto en el texto referenciado<sup>2</sup>, el cual citamos textualmente:

Un lecho filtrante de 60 cm de espesor constituido por una arena que tiene la distribución por tamaños que aparece en la tabla adjunta, va a ser lavado con una velocidad 61 cm/min. Encontrar cuál será la expansión del lecho filtrante si  $\nu = 0.0131$  Stokes ( $T = 10^\circ\text{C}$ ),  $p_0 = 0.414$ ,  $S_s = 2.65$ .

Las tres primeras columnas son el resultado del análisis de arena hecho en el laboratorio. La cuarta se calcula de acuerdo a lo analizado en la velocidad de sedimentación:

$$\frac{v_s}{(g(S_s - 1) * \nu)^{1/3}} = \frac{v_s}{(981(2.65 - 1)1.31E - 2)^{1/3}} = \frac{v_s}{2.77}$$

$$\left[ \frac{g(S_s - 1)}{\nu^2} \right]^{1/3} * d = \left[ \frac{981(2.65 - 1)}{1.31E - 2} \right]^{1/3} * d = 212d$$

Entrando a los gráfico 5.1 (del texto referenciado. Páginas 210 y 211); con los valores de la columna 4 se hallan los  $v_s$  de la columna 5, así:

$$\frac{v_a}{v_s} = \frac{1.016}{v_s}$$

La columna 6 es la columna 5 elevada a la potencia 0.22 y la columna 7 es la columna 6 menos 0.414. La ocho es 1.00 menos la columna 6.

La columna 9 es la división de las columnas 7/8 y viene a dar la expansión de cada capa de lecho individualmente. La 10 es la 9 X 3. Obsérvese que el medio granular se expande como un resorte blando, los granos mas finos de la parte superior hasta 119.5 % y los mas gruesos de la parte inferior solo 11.2%. las porosidades igualmente varían desde 0.47 hasta 0.73 en la

---

<sup>2</sup> Teoría Diseño y Control de los Procesos de Clarificación del Agua. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Pág. 372, 373 y 374.

**EXPANSION DE UN LECHO DE ARENA**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Cedazos No.	d cm	$x_i$ $10^{-2}$	$v_s$ cm/seg	$v_a/v_s$	$(v_a/v_s)^{0.22}$	$(v_a/v_s)^{0.22} - p_o$	$1 - (v_a/v_s)^{0.22}$	$\Delta \varepsilon$	$\Delta \varepsilon x_i$	$(S_s - 1) * (1 - p_e)$	$L * x_i$	$\Delta \varepsilon + 1$	$\Delta h_L$
8-10	0.218	0.5	37.2	0.0273	0.4529	0.0389	0.5471	0.0711	0.0355	0.8814	0.3000	1.0711	0.2832
10-14	0.154	2.3	31.27	0.0325	0.4705	0.0565	0.5295	0.1068	0.2456	0.8530	1.3800	1.1068	1.3028
14-20	0.100	9.3	16.43	0.0618	0.5421	0.1281	0.4579	0.2797	2.6016	0.7377	5.5800	1.2797	5.2677
20-28	0.070	24.8	11.7	0.0868	0.5841	0.1701	0.4159	0.4091	10.1462	0.6699	14.8800	1.4091	14.0473
28-32	0.054	20.6	8.82	0.1152	0.6216	0.2076	0.3784	0.5486	11.3020	0.6096	12.3600	1.5486	11.6683
32-35	0.046	16.4	7.28	0.1396	0.6484	0.2344	0.3516	0.6667	10.9339	0.5664	9.8400	1.6667	9.2893
35-42	0.038	12.1	5.69	0.1786	0.6845	0.2705	0.3155	0.8575	10.3762	0.5082	7.2600	1.8575	6.8537
42-48	0.032	14.0	4.48	0.2268	0.7215	0.3075	0.2785	1.1041	15.4577	0.4487	8.4000	2.1041	7.9299
								$\Sigma \Delta \varepsilon x_i =$	<b>61.0988</b>			$h_L =$	<b>56.6423</b>

superficie del lecho. Con velocidades bajas, los granos grandes pueden a veces no expandirse en absoluto. Este hecho tiene gran importancia cuando se usan medios mixtos (arena y antracita) de dos densidades distintas, como lo veremos mas tarde.

Al multiplicar la expansión de cada capa por el porcentaje de granos de cada tamaño y sumar los resultados parciales, se obtiene la expansión total del lecho, que en el caso del ejemplo propuesto es de 65% aproximadamente.

Para esta expansión la altura final del lecho expandido será:

$$L_e = (\varepsilon + 1) * L = 1.65 * 60 = 99cm$$

Para calcular la perdida de carga, la columna 11 es la columna 8 multiplicada por  $(S_a - 1) = 1.65$ . La columna 12 es la 3 multiplicada por  $L = 60$  cm, dividida por 100. La 13 es la 10 mas la unidad, y la 14 es la 13 X 12 X 11. La suma de la columna 14 da  $h_L = 57.72$  cm.

Según presenta la teoría de la hidráulica del lavado expuesta anteriormente: “para que exista expansión del lecho, la velocidad ascensional o de lavado  $v_a$ , debe ser mayor que la velocidad de sedimentación de las partículas  $v_s$ ”. Como se puede observar en el ejemplo, con velocidades de lavado menores que las de sedimentación existe expansión, lo cual difiere con la formulación teórica mencionada al inicio de este capítulo.

Al observar tal incongruencia se decidió hacer pruebas de laboratorio las cuales llevarían a certificar o corroborar dicha apreciación, lo cual es el objetivo principal de este proceso investigativo.

## 2. ENSAYOS PARA AGREGADOS FINOS

Este trabajo analiza el comportamiento de lechos fluidizados, utilizando los medios granulares más usados en las plantas de tratamiento de nuestro medio (arena-antracita) y evaluar la expansión de estos lechos filtrantes. Para ellos se realizó un procedimiento experimental que consistió en la reproducción de un filtro piloto con las condiciones existentes en una planta de tratamiento de agua cuando se realiza el lavado de los filtros. El material del lecho se escogió de manera tal que cumpliera con las especificaciones dadas por el RAS-2000, que establece y regula criterios y requisitos mínimos para el diseño, construcción y supervisión técnica de todo lo relacionado con la potabilización del agua.

Tabla 1. Características de la arena para filtros rápidos

Tipo de material	Tamaño efectivo		Coeficiente de uniformidad	
	Mínimo (mm)	Máximo (mm)	Mínimo	Máximo
<b>Arena fina</b>	0.35	0.45	1.35	1.7
<b>Arena estándar</b>	0.45	0.55	1.35	1.7
<b>Arena gruesa</b>	0.55	0.65	1.35	1.7

La arena utilizada fue suministrada por SISHA Ltda., y sus especificaciones se ajustan a las proporcionadas por el RAS-2000. La tabla anterior muestra las características de las arenas recomendadas.

La profundidad del lecho se eligió de acuerdo a las especificaciones de la norma (0.6 m y 0.9 m) además el peso específico de la arena debe ser mayor que 2.0.

## **2.1 GRANULOMETRÍA LECHO FILTRANTE**

Los resultados de la prueba se compararon con los parámetros de diseño, lo cual establece lo siguiente:

Tamaño efectivo: 0.55 – 0.65 mm

Espesor de arena: 60 mm

Coefficiente de uniformidad: < 1.7

### **2.1.1 Norma ICONTEC 237. Método para determinar el peso específico y la absorción de agregados finos.**

#### **2.1.1.1 Objeto**

Esta norma tiene por objeto establecer el método para determinar el peso específico y la absorción del agregado fino.

#### **2.1.1.2 Definiciones**

**2.1.1.2.1 Peso específico** es el peso de la unidad de volumen del agregado.

**2.1.1.2.2 Peso específico aparente seco** es la relación entre el peso en el aire del agregado seco y el volumen de las partículas incluyendo sus poros naturales.

**2.1.1.2.3 Peso específico aparente saturado (S.S.S)** es la relación entre el peso en el aire del agregado saturado y seco superficialmente y el volumen de las partículas incluyendo sus poros.

**2.1.1.2.4 Absorción** es la cantidad de agua absorbida por el agregado después de ser sumergido 24 horas en ésta, expresada como un porcentaje del peso seco.

### **2.1.1.3 Ensayos**

#### **2.1.1.3.1 Aparatos**

**2.1.1.3.1.1 Balanza** debe tener una capacidad de 1Kg o más y sensibilidad de 0.1 gr.

**2.1.1.3.1.2 Probeta** debe tener una marca a  $500\text{cm}^3$  con una aproximación de 0.03 % a 20°C.

**2.1.1.3.1.3 Molde metálico** debe ser de forma troncocónica, con las medidas siguientes: 40 mm de diámetro en la base superior, 90 mm de diámetro en la inferior y 75 mm de altura.

**2.1.1.3.1.4 Pisón metálico** debe tener un peso de 340gr y una sección plana de 25 mm de diámetro.

**2.1.1.3.2 Preparación de la muestra** se toman aproximadamente 1000g del agregado por el método de cuarteo.

### **2.1.1.3.3 Procedimiento**

La muestra obtenida por cuarteo se sumerge totalmente en un recipiente con agua durante 24 horas; se extiende la muestra sobre una superficie no absorbente, se expone a una corriente suave de aire caliente y se agita con frecuencia para conseguir un secado uniforme. La operación se da por terminada, cuando estén sueltos los agregados finos. Se coloca la muestra en el molde cónico, se deja caer libremente el pisón sobre la superficie de ésta desde una altura de aproximadamente 1 cm. durante 25 veces, se alisa la superficie de la muestra y se alza el molde verticalmente sin girarlo. Si existe humedad libre, el cono conserva su forma. Se repite el ensayo a intervalos frecuentes hasta que el cono formado por la muestra se derrumbe parcialmente al separar el molde. Esto indica que se ha alcanzado una condición de saturado con superficie seca (S.S.S).

Se introducen 500 g de la muestra preparada según lo indicado anteriormente en la probeta, y se llena ésta con agua a 20 ° C hasta cerca de 500 cm<sup>3</sup>, luego se hace girar la probeta hasta eliminar las burbujas de aire. Se coloca la probeta en baño María a 20°C y se mantiene en él aproximadamente una hora; luego se llena con agua a la misma temperatura hasta 500 cm<sup>3</sup>. Se pesa el conjunto (probeta, arena y agua) y se determina por diferencias el peso del agua añadida, con aproximación de 0.19 g. La cantidad de agua para llenar la probeta se puede determinar volumétricamente por medio de una bureta que permita apreciar hasta 0.1 cm<sup>3</sup>.

Se retira la muestra de la probeta y se deseca a 100°C – 110 °C hasta que su peso sea constante; se enfría a temperatura ambiente en un desecador y se pesa.

**2.1.1.3.4 Cálculos** se deben utilizar las siguientes convenciones:

G = peso de la muestra seca, en gramos.

$G_a$  = peso o volumen de agua añadida a la muestra para completar el volumen de la probeta, expresado en g o según el caso.

V = volumen de la probeta en  $\text{cm}^3$ .

**2.1.1.3.4.1 Peso específico** se determina por la siguiente ecuación:

$$P_e = \frac{G}{(V - G_a - (500 - G))} \quad (2-1)$$

**2.1.1.3.4.2 Peso unitario seco** se determina por la siguiente ecuación:

$$P_m = \frac{G}{V - G_a} \quad (2-2)$$

**2.1.1.3.4.3 Peso unitario y de superficie seca** se determina por la siguiente ecuación:

$$P_s = \frac{500}{(V - G_a)} \quad (2-3)$$

**2.1.1.3.4.4 Absorción** se determina por la siguiente ecuación:

$$\% \text{absorción} = \frac{500 - G}{G} * 100 \quad (2-4)$$

### 2.1.1.3.5 Resultados

#### 2.1.1.3.5.1 Gravedades específicas

Datos:

A = Peso del Frasco + Agua hasta la marca en el aire.....660.0 gramos

B = Peso de la muestra en condición S.S.S en el aire.....500.0 gramos

C=Peso de la muestra. Frasco y Agua agregada hasta la marca en el aire:  
968.9 gramos

D = Peso de la muestra secada al horno.....496.5 gramos

Cálculos

$$\text{Gravedad específica real} \dots\dots\dots \frac{D}{A - C + D} = 2.6465$$

$$\text{Gravedad específica aparente} \dots\dots\dots \frac{D}{A + B - C} = 2.5981$$

$$\text{Gravedad específica aparente S.S.S} \dots\dots\dots \frac{B}{A + B - C} = 2.61643$$

$$V = \text{Volumen del medidor} \dots\dots\dots 2.835 \text{ dcm}^3$$

#### 2.1.1.3.5.2 Peso unitario

Datos

Pm = peso del medidor vacío.....2546 gr

Pc = peso del medidor + material S.S.S compactado.....6925 gr

Ps = peso del medidor + material S.S.S suelto.....6584 gr

$$\text{Peso unitario del agregado S.S.S compactado} \frac{(Pc - Pm)}{V} \dots\dots\dots 1545 \text{ Kg/m}^3$$

Peso unitario del agregado S.S.S seco  $\frac{(P_s - P_m)}{V}$  .....1424.33 Kg/m<sup>3</sup>

% de absorción.....  $\frac{(B - D) * 100}{D} = 0.704\%$

% de vacíos.....  $\frac{(E * 1000 - F)}{(E * 100)} = 40.89\%$

**2.1.2 Norma ICONTEC 92 (1ª revisión). Método para determinar la masa unitaria de los agregados.**

**2.1.2.1 Objeto** Esta norma tiene por objeto establecer el método para determinar la masa unitaria de los agregados.

**2.1.2.2 Ensayos**

**2.1.2.2.1 Aparatos**

**2.1.2.2.1.1 Balanza** debe pesar con una exactitud de 0.1% respecto al material usado.

**2.1.2.2.1.2 Varilla compactadora** debe ser de acero, cilíndrica de 16 mm de diámetro con una longitud aproximada de 600 mm. Un extremo debe ser semiesférico y de 8 mm de radio.

**2.1.2.2.1.3 Recipientes de medida** deben ser metálicos, cilíndricos, preferiblemente provistos de agarraderas impermeables, con el fondo y bordes superiores pulidos y planos y suficientemente rígidos para no deformarse bajo duras condiciones de trabajo. Los recipientes de 15 dm<sup>3</sup> y 30 dm<sup>3</sup> deben ir reforzados en su boca con una banda de acero de 40 mm de ancho. La capacidad

del recipiente utilizado en el ensayo depende del tamaño máximo de las partículas del agregado que se va a medir.

### 2.1.2.2.2 Masa unitaria del agregado compactado

**2.1.2.2.2.1 Método de apisonado** para agregados de tamaño nominal menor o igual a 38 mm, el agregado debe colocarse en el recipiente, en tres capas de igual volumen aproximadamente, hasta colmarlo.

Cada una de las capas se empareja con la mano y se apisona con 25 golpes de varilla distribuidos uniformemente en cada capa, utilizando el extremo semiesférico de la varilla. Al apisonar la primera debe evitarse que la varilla golpee el fondo del recipiente; al apisonar las capas superiores se aplican la fuerza necesaria para que la varilla solamente la respectiva capa.

Una vez colmado el recipiente se enrasa la superficie con la varilla usándola como regla y se determina la masa del recipiente lleno en Kg.

**2.1.2.2.2.2 Método de vibrado** para agregados de tamaño nominal comprendido entre 38 y 100 mm, las dimensiones de los recipientes deben cumplir con la siguiente tabla:

Volumen dm <sup>3</sup>	Diámetro interior		Altura mm	Tamaño max partículas mm	Calibre mm	
	mm	pulg			Fondo	Pared
3	155	6	160	12.5	5.0	3.0
10	205	8	305	25	5.0	3.0
15	255	10	295	40	5.0	3.0
30	355	14	305	100	5.0	3.0

Tabla 2. Dimensiones de los recipientes

El agregado debe colocarse en el recipiente, en tres capas de igual volumen aproximadamente, hasta colmarlo.

Cada una de las capas se compacta del siguiente modo: se coloca el recipiente sobre una base firme y se inclina hasta que el borde opuesto al punto de apoyo diste unos 5cm de la base. Luego se suelta, con lo que se produce un golpe seco y se repite la operación inclinando el recipiente por el borde opuesto. Estos golpes alternados se ejecutan 25 veces de cada lado, de modo que el número total sea 50 para cada capa y 150 para todo el conjunto.

Una vez compactada la última capa se enrasa la superficie del agregado con una regla o con la mano de modo que las partes salientes se compensen con las depresiones en relación con el plano de enrase y se determina la masa en Kg. del recipiente lleno.

**2.1.2.2.3 Masa unitaria del agregado suelto** Para agregados de tamaño nominal hasta 100mm, se llena el recipiente por medio de una pala o cuchara de modo que el agregado se descargue de una altura no mayor de 50 mm por encima del borde, hasta colmarlo. Se debe tener cuidado de que no se segreguen las partículas de las cuales se compone la muestra.

Se enrasa la superficie del agregado con una regla o con la mano, de modo que las partes salientes se compensen con las depresiones en relación con el plano de enrase y se determina la masa en Kg. del recipiente lleno.

**2.1.2.3 Resultados** El diámetro efectivo ( $d_e$ ) y el Coeficiente de Uniformidad (C.U), se obtienen de la curva granulométrica, determinándose los tamaños correspondientes al 10% y 60%.

El diámetro efectivo ( $d_e$ ) corresponde al 10% que pasa. El Coeficiente de Uniformidad (C.U), se obtiene dividiendo el porcentaje que pasa en un 60% por el diámetro efectivo.

Tabla 3. Granulometría de lecho filtrante de arena



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
 ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS  
 ENSAYO DE GRANULOMETRIA INV E- 123

MALLA No	ABERTURA	PESO SUELO RETENIDO	PORCIENTO RETENIDO PARCIAL	% QUE PASA LA MALLA
****	mm	gr	%	%
30	50.8	865.50	86.55	13.45
50	36.1	131.30	13.13	0.32
100	25.4	1.30	0.13	0.19
140	19.05	0.70	0.07	0.12
SUMA	*****	998.80	99.88	

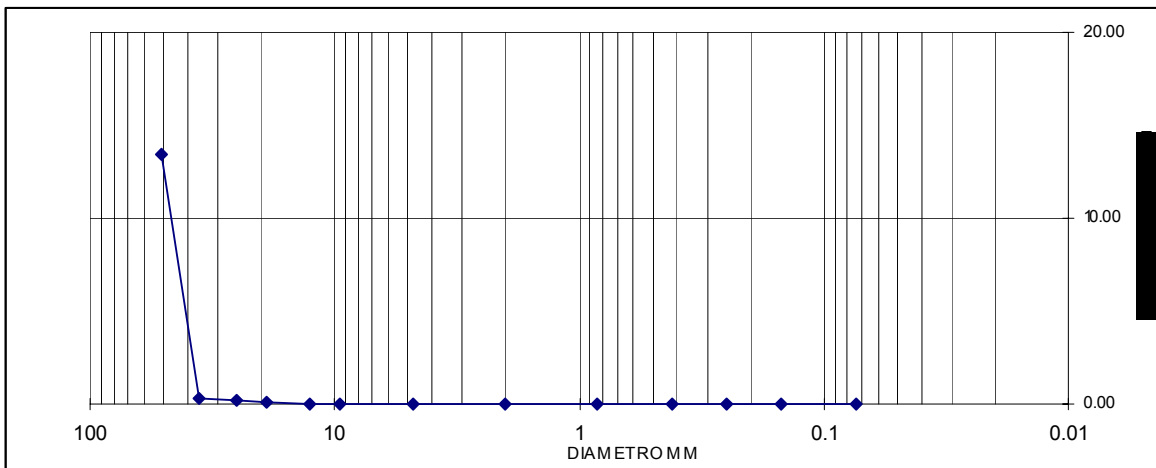


Figura 3. Curva granulométrica del lecho filtrante de arena.

TAMAÑO EFECTIVO: 0.48mm

COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD: 1.875

El tamaño ó diámetro efectivo ( $d_e$ ) del lecho filtrante resultó ser menor al rango propuesto en el parámetro de diseño (0.55 mm-0.65 mm), lo que quiere decir que la arena es muy fina. Al tener una arena de menor tamaño, el lecho tiende a expandirse mayormente provocando fuga de material en las canaletas de lavado. También provoca que el lecho se colmate rápidamente debido al menor porcentaje de vacíos entre los granos de arena, impidiendo que el agua a ser filtrada, descienda y aumente la pérdida de carga en el filtro.

Luego de tener la granulometría del lecho, se procedió a tomar mediciones de velocidad de sedimentación, las cuales se realizaron en el modelo a una temperatura constante de 26°C. Se tomaron granos separados de arena y se dejaron caer libremente 50 cm en el agua contenida en el modelo y se tomó el tiempo que estos gastaron en precipitarse bajo esas condiciones.

En la tabla 4, se presentan los datos tomados. En los resultados el tiempo promedio es la sumatoria de los tiempos dividido entre el número de tomas y dividiéndolo entre la altura de caída (50 cm), se obtuvo la velocidad promedio de sedimentación. El diámetro efectivo es igual al promedio geométrico de los tamices consecutivos en donde pasa y se retiene la partícula así:

$$d_e = \sqrt{d_i * d_{i+1}} \quad (2-5)$$

Donde  $d_i$  es el diámetro del tamiz que pasa y  $d_{i+1}$  es e diámetro del tamiz donde se retiene la partícula

Tabla 4. Velocidad de sedimentación

Nº	TAMIZ 20 (0.841 mm)	TAMIZ 30 (0.589 mm)	TAMIZ 40 (0.419 mm)	TAMIZ 50 (0.297 mm)
1	2.95	5.00	6.42	8.07
2	4.03	4.35	6.76	8.31
3	4.28	4.42	6.24	8.43
4	3.63	3.55	6.19	8.73
5	4.28	4.71	6.10	7.98
6	4.52	4.23	7.03	8.29
7	3.79	4.75	6.02	8.23
8	4.61	4.35	5.34	8.06
9	4.27	4.51	5.52	8.24
10	3.89	4.91	6.71	7.48
11	4.16	6.01	5.85	8.16
12	4.25	5.11	6.44	6.51
13	3.95	4.92	6.79	7.50
14	4.09	5.78	5.90	7.27
15	4.70	5.29	5.47	8.33
16	3.99	4.48	6.16	7.10
17	3.99	4.64	5.83	8.11
18	3.73	4.95	5.96	8.38
19	4.10	4.27	5.48	7.71
20	3.71	4.76	6.70	8.44
21	4.25	5.07	5.81	7.75
22	3.77	4.17	5.22	8.43
23	3.84	4.05	5.40	10.14
24	4.00	4.13	5.69	7.93
25	3.33	4.19	5.64	7.59
26	3.68	4.45	5.91	7.66
27	4.49	4.46	6.40	9.58
28	4.35	4.49	6.09	8.41
29	3.91	3.79	5.66	8.45
30	4.24	4.77	6.11	7.46
31	3.99	4.50	5.87	7.74
32	3.62	4.29	5.63	9.00
33	4.22	5.53	6.07	7.40
34	3.45	5.83	5.78	7.87
35	4.28	4.63	6.23	9.03
36	3.93	4.82	5.79	8.02
37	4.87	4.52	6.20	8.33
38	3.77	4.55	6.02	8.03
<b>Tiempo promedio (seg)</b>	4.02	4.66	6.01	8.11
<b>Velocidad promedio (cm/seg)</b>	12.43	10.72	8.32	6.17
<b>de (mm)</b>	1.00	0.70	0.50	0.35

### 3. MODELO EXPERIMENTAL

#### 3.1 PARTES Y FUNCIONAMIENTO

Figura 4. Plano del sistema

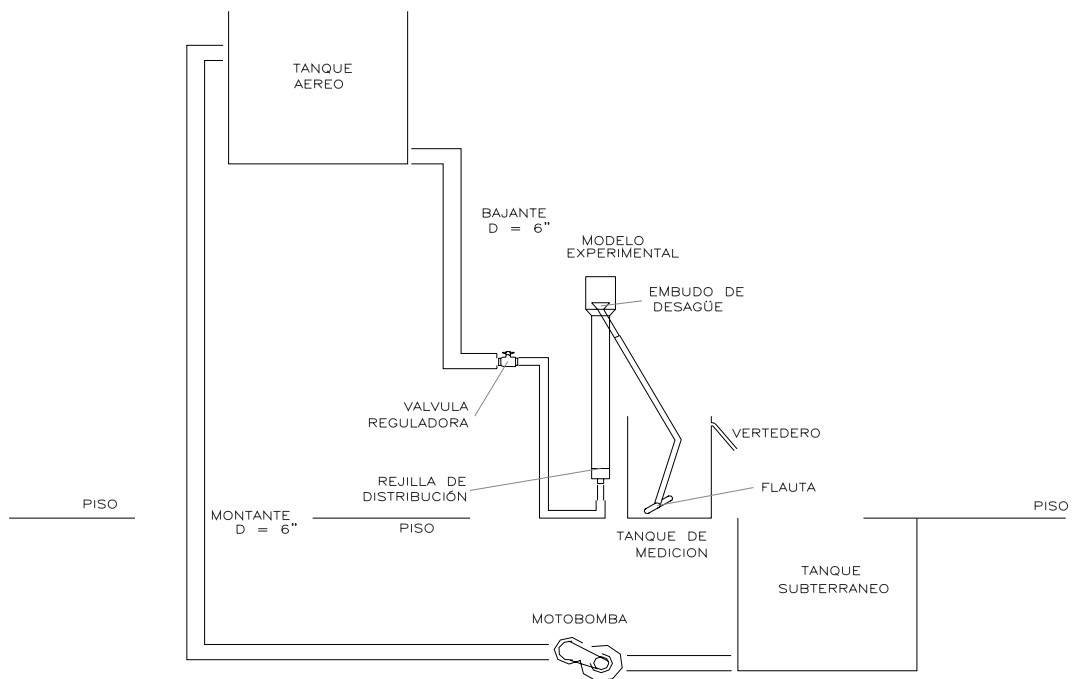


Foto 1. Sistema hidráulico del filtro



**3.1.1 Sistema de aducción** La entrada de agua al filtro se realiza por una tubería de 6" que desciende desde el tanque aéreo y posteriormente se reduce a tubería de 3", por medio de una válvula de compuerta, la cual regula el caudal que finalmente llega a la parte inferior del modelo experimental de filtro en una tubería de 2" cuya función es la de conducir el fluido hasta la entrada del modelo y proveerlo de un flujo continuo y de condiciones estables, para poder así realizar mediciones teniendo mínimas posibilidades de cambios en las condiciones hidráulicas que podrían dar en un momento dado, datos incoherentes o por fuera de los márgenes de confianza establecidos estadísticamente.

**3.1.2 Válvula de regulación de flujo** Válvula de 3" situada antes de la entrada al modelo experimental y cuya función es la de regular la cantidad de fluido que finalmente atraviesa el filtro. Variando la apertura de esta válvula se controla la cantidad de flujo que entra al filtro y cambia las condiciones hidráulicas en el modelo; es aquí donde realmente se proporciona las diferentes condiciones de cantidad de agua circulante permitiendo hacer mediciones en la cantidad de fases de expansión que se necesitan.

Foto 2. Válvula de regulación.



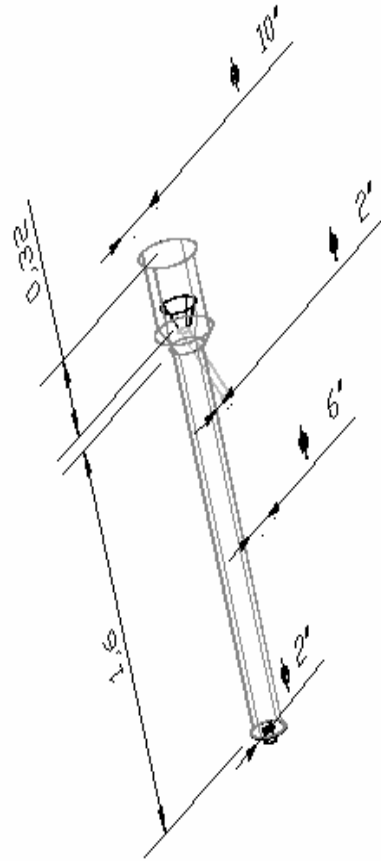
**3.1.3 Filtro a escala** Sistema tubular de 6" (15 cm) construido en acrílico transparente que permite visualizar fácilmente los cambios de las condiciones hidráulicas, la velocidad con que las partículas del lecho filtrante chocan unas con otras, el comienzo del proceso de fluidización que a la postre será el comienzo del lavado real del material filtrante y la expansión del lecho filtrante (motivo de estudio de este proyecto), también permitirá elegir el momento en el cual se empezará la toma mediciones para poder determinar el caudal a trabajar.

El filtro en altura conserva las dimensiones de uno real pero en área superficial es donde recurrimos a la magia del modelo experimental puesto que allí si encontramos la construcción a escala.

Foto 3. Filtro



Figura 5. Modelo de filtro en acrílico



**3.1.3.1 Rejilla de distribución** El agua que entra al filtro ingresa por una tubería de 2" (5 cm) y el cuerpo del modelo experimental es de 6" (15 cm) se podría presentar el fenómeno llamado "camino preferenciales" los cuales se localizarían justo encima de la entrada de tubería de 2"; el fenómeno consiste en que el agua abre caminos formando un embudo de columna de agua eliminando al máximo la presencia de material filtrante y la gran mayoría de agua pasaría por este canal de menor resistencia y mayor porosidad. Para evitar tal situación, se hizo necesario la implementación de un sistema que redistribuya el fluido para que el filtro maneje la misma cantidad de agua para lavado a lo largo y ancho del área superficial del modelo experimental; además ayuda a sostener la base granular para que no llegue hasta el fondo del filtro y nos permita crear una cámara donde se almacene el fluido y se logre así una mejor distribución de este.

**3.1.3.2 Base granular** Constituida básicamente por gravas de tamaños entre los tamices de  $\frac{3}{4}$ ",  $\frac{1}{2}$ ",  $\frac{3}{8}$ ",  $\frac{1}{4}$ ", N° 4 y N° 8. Se encuentra localizada sobre la rejilla de distribución. Este lecho de grava crea diversos caminos por los cuales se continúa el proceso de distribución del fluido a través de la sección transversal del filtro. Su función principal es la proveer una base que soporte el material filtrante, impidiendo que este se pase a la rejilla de distribución y por ella llegar hasta el parte final de la tubería de aducción, perdiendo así las dimensiones con las cuales fue construido el lecho filtrante para este proyecto, ya que es imperante conservar las mismas condiciones durante las mediciones y por ende las mismas condiciones hidráulicas, además por que se podría presentar la posibilidad de que el material filtrante llegase hasta el desagüe de limpieza y eliminarlo cada vez que esta entre en funcionamiento.

**3.1.3.3 Material filtrante** Es la parte principal del filtro y del proceso de filtración pues es aquí en donde se retiene todo el floc, además es el objeto principal de estudio; ya que éste es el material que se expande durante el proceso de lavado y al cual se le va realizar las mediciones para el desarrollo de este proyecto de

investigación. Durante el proceso de limpieza, el material se expande y esto se logra observar y medir fácilmente gracias a la transparencia del filtro.

**3.1.3.4 Embudo de desagüe** Se localiza en la parte superior del modelo y permite recoger el agua que ya pasó por el proceso de lavado del filtro. Gracias a su capacidad para recoger el fluido evita el efecto sifón que ocasionaría mayores turbulencias y absorción de aire el cual tendría que ser eliminado en el tanque de medición produciendo turbulencia e inestabilidad del líquido que se encuentra en el tanque, haciendo las mediciones mas imprecisas. Se comunica con el tanque de medición por medio de una tubería de PVC de 2" que se convierte en su extremo inferior en una flauta.

**3.1.3.5 Flauta de distribución** No estaba en el diseño inicial, pero la necesidad de disipar la energía potencial del agua debida a la diferencia de altura entre el embudo y el tanque de medición con la cual el fluido es descargado en el tanque hizo pensar en la forma de disiparla y se hizo distribuyéndola por medio de una flauta en diferentes puntos del tanque. Esta consistente en una tubo perforado de aproximadamente 1 metro de longitud que dispersa la descarga del fluido y de aire hacia diferentes direcciones en diversos puntos del tanque, además como se encuentra localizado en la parte inferior del tanque esto elimina de mejor forma la turbulencia y permite una mejor medición ya que se hace visualmente.

**3.1.4 Tanque de medición** Es un tanque rectangular aforado cuyas dimensiones almacenan un volumen de  $0.7 \text{ m}^3$ . Este depósito permite realizar cerca de 30 o 40 mediciones para la determinación del caudal utilizado. Construido en acrílico transparente para poder visualizar fácilmente el momento en que el agua alcanza todas y cada una de las alturas a las cuales se determinó su medición.

Es aquí donde descarga la tubería de desagüe que proviene del modelo experimental y dentro de este encontramos la flauta de distribución. Para lograr obtener las mediciones, se instaló una cinta métrica marcada cada centímetro

ubicada por el lado que se generaba menos movimiento producido por el oleaje del fluido que entraba al recipiente.

**3.1.4.1 Vertedero** Inicialmente fue tenido en cuenta y se pensó que en él se podría realizar las mediciones del caudal mediante el proceso de aforo y calculando el coeficiente de descarga del vertedero; sin embargo al avanzar la investigación se percibió que los caudales que se manejaban no eran suficientemente grandes como para medirlos en ese dispositivo. Realmente el vertedero no es una parte fundamental del proceso ni de lavado ni de medición, pero es utilizado para descargar el agua excedente del tanque de medición y devolver el agua al tanque subterráneo mediante un sistema de canales construido en el laboratorio y que permite empezar nuevamente el proceso de bombeo, logrando la recirculación del fluido y evitando el desperdicio de este durante el transcurso de la investigación.

**3.1.5 Desagüe de limpieza** Es la tubería ubicada en el nivel más bajo del sistema. Es utilizada para descargar, limpiar y reiniciar el proceso de lavado. No aporta ninguna clase de dato, ni es fundamental en ningún proceso pero se hace necesario este accesorio cuando el agua al quedar expuesta al aire cuando llega al tanque aéreo, se contamina de desechos y se empieza a notar turbiedades que impide trabajar cómodamente durante el proceso de medición.

Lo constituye una tubería de ½" de PVC que se mantiene sellada mediante un tapón y se encuentra ubicado en el nivel más bajo del sistema permitiendo el lavado total del circuito desaguando el tanque aéreo del laboratorio de trabajo

## **4. VERIFICACION POR VELOCIDADES**

### **4.1 RECOLECCION DE DATOS**

Para las mediciones de caudal se acondicionó el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Industrial de Santander con el fin de poder utilizar las bombas que en él se encuentran y así obtener un flujo ascensional constante dentro del filtro.

El laboratorio consta de un tanque subterráneo que mediante un sistema de bombeo mecánico eleva el agua hasta un tanque aéreo. Su funcionamiento simultáneo es lo que permite obtener un sistema estabilizado que garantiza caudales uniformes y permanentes durante las largas jornadas de medición; además estos dos tanques permiten recircular el agua evitando así el gasto permanente y economizar el líquido vital.

El modelo experimental que nos permite realizar todas las mediciones en laboratorio se desarrolló frente a la necesidad de obtener valores reales de la expansión del lecho durante el proceso de lavado para diferentes caudales de agua que pasarán por el medio filtrante en un área determinada.

Se trata de simular el funcionamiento de un filtro regular de una planta de tratamiento para la potabilización de agua mediante un sistema tubular y cuyo funcionamiento se explicará siguiendo el recorrido del agua.

La entrada de flujo de agua al filtro se realiza por la parte inferior del mismo donde se encuentra la rejilla de distribución, posteriormente en la medida que el agua asciende encuentra la capa de base granular para finalmente pasar a través del material filtrante; cuando el fluido termina de pasar por la capa de 60 cm de material filtrante se recoge en el embudo de desagüe y por medio de la flauta se entrega definitivamente al tanque de medición, éste descarga en los cárcamos de conducción del laboratorio que desemboca en el tanque subterráneo. Utilizando un sistema de bombeo mecánico convencional conduce el agua hasta el tanque aéreo, donde por gravedad se suministra agua nuevamente en la entrada del filtro donde se inició el recorrido.

Una vez montado y ensamblado el prototipo de filtro, se empezaron las mediciones de expansiones del lecho, las cuales eran controladas por medio de la válvula de compuerta; a dichas expansiones les corresponde unos tiempos y unos tirantes de agua medidos en el tanque de medición. Con los datos obtenidos se calculó los caudales y sus respectivas velocidades de ascenso o de lavado. Los resultados compilaron en las tablas 5 a 19.

$$\text{Volumen del tanque: } h * l * a \quad (4-1)$$

Donde

$$\Delta h = 0.01 \text{ m} \quad l = 0.70 \text{ m} \quad a = 1.0 \text{ m.}$$

Para el cálculo de las columnas de cada tabla se tomo como:

$$V_{\text{tanque}} = 0.07 \text{ m}^3 \quad A_{\text{tubo}} = 0.0189 \text{ m}^2$$

Las columnas 1, 2 y 3 corresponden al tiempo acumulado expresado en horas, minutos y segundos para todos los  $\Delta h$  de una misma medición. La columna son los mismos tiempos expresados en segundos. La columna 5 es tiempo comprendido entre los diferentes  $\Delta h$  para las diferentes tomas. Las columnas 6 y 7 son los caudales de ascenso en  $\text{m}^3/\text{seg}$  y lps y se calcula dividiendo  $V_{\text{tanque}}$  entre la columna 5. Las columnas 8 y 9 son las velocidades de ascenso y se obtienen dividiendo los caudales anteriores entre el  $A_{\text{tubo}}$ .

Tabla 5. Medición N°1

t			t	t/tm	Qa		V <sub>tubo</sub>	
horas	min	seg	seg	seg	m <sup>3</sup> /seg	lps	(m/seg)	(cm/seg)
0	5	24	324	324	2.16E-05	2.16E-02	1.14E-03	0.114
0	10	17	617	293	2.39E-05	2.39E-02	1.27E-03	0.127
0	15	53	953	336	2.08E-05	2.08E-02	1.10E-03	0.110
0	21	53	1313	360	1.94E-05	1.94E-02	1.03E-03	0.103
0	27	13	1633	320	2.19E-05	2.19E-02	1.16E-03	0.116
0	33	40	2020	387	1.81E-05	1.81E-02	9.59E-04	0.096
0	39	30	2370	350	2.00E-05	2.00E-02	1.06E-03	0.106
0	46	32	2792	422	1.66E-05	1.66E-02	8.79E-04	0.088
0	52	17	3137	345	2.03E-05	2.03E-02	1.08E-03	0.108
0	59	6	3546	409	1.71E-05	1.71E-02	9.07E-04	0.091
1	5	39	3939	393	1.78E-05	1.78E-02	9.44E-04	0.094
1	11	23	4283	344	2.03E-05	2.03E-02	1.08E-03	0.108
1	17	30	4650	367	1.91E-05	1.91E-02	1.01E-03	0.101
1	24	30	5070	420	1.67E-05	1.67E-02	8.83E-04	0.088
1	30	25	5425	355	1.97E-05	1.97E-02	1.04E-03	0.104
1	37	44	5864	439	1.59E-05	1.59E-02	8.45E-04	0.085
1	44	25	6265	401	1.75E-05	1.75E-02	9.25E-04	0.093
1	51	8	6668	403	1.74E-05	1.74E-02	9.21E-04	0.092
1	57	18	7038	370	1.89E-05	1.89E-02	1.00E-03	0.100
2	4	5	7445	407	1.72E-05	1.72E-02	9.11E-04	0.091
2	11	29	7889	444	1.58E-05	1.58E-02	8.36E-04	0.084
2	17	55	8275	386	1.81E-05	1.81E-02	9.61E-04	0.096
2	24	45	8685	410	1.71E-05	1.71E-02	9.05E-04	0.090
2	31	46	9106	421	1.66E-05	1.66E-02	8.81E-04	0.088
2	38	34	9514	408	1.72E-05	1.72E-02	9.09E-04	0.091
2	46	23	9983	469	1.49E-05	1.49E-02	7.91E-04	0.079
2	52	20	10340	357	1.96E-05	1.96E-02	1.04E-03	0.104
2	58	27	10707	367	1.91E-05	1.91E-02	1.01E-03	0.101
3	3	52	11032	325	2.15E-05	2.15E-02	1.14E-03	0.114
3	10	55	11455	423	1.65E-05	1.65E-02	8.77E-04	0.088
3	17	38	11858	403	1.74E-05	1.74E-02	9.21E-04	0.092
3	23	23	12203	345	2.03E-05	2.03E-02	1.08E-03	0.108
3	29	23	12563	360	1.94E-05	1.94E-02	1.03E-03	0.103
3	34	45	12885	322	2.17E-05	2.17E-02	1.15E-03	0.115
3	41	47	13307	422	1.66E-05	1.66E-02	8.79E-04	0.088
3	46	40	13600	293	2.39E-05	2.39E-02	1.27E-03	0.127
3	52	30	13950	350	2.00E-05	2.00E-02	1.06E-03	0.106
3	59	2	14342	392	1.79E-05	1.79E-02	9.46E-04	0.095
4	4	46	14686	344	2.03E-05	2.03E-02	1.08E-03	0.108
4	12	31	15151	465	1.51E-05	1.51E-02	7.98E-04	0.080
4	20	1	15601	450	1.56E-05	1.56E-02	8.24E-04	0.082
4	27	39	16059	458	1.53E-05	1.53E-02	8.10E-04	0.081

Tabla 6. Medición N° 2

t			t	t/tm	Q		V <sub>tubo</sub>	
horas	min	seg	seg	seg	m <sup>3</sup> /seg	lps	(m/seg)	(cm/seg)
0	3	10	190	190	3.68E-05	3.68E-02	1.95E-03	0.195
0	6	32	392	202	3.47E-05	3.47E-02	1.84E-03	0.184
0	9	45	585	193	3.63E-05	3.63E-02	1.92E-03	0.192
0	12	55	775	190	3.68E-05	3.68E-02	1.95E-03	0.195
0	16	5	965	190	3.68E-05	3.68E-02	1.95E-03	0.195
0	19	32	1172	207	3.38E-05	3.38E-02	1.79E-03	0.179
0	22	55	1375	203	3.45E-05	3.45E-02	1.83E-03	0.183
0	26	49	1609	234	2.99E-05	2.99E-02	1.59E-03	0.159
0	30	1	1801	192	3.65E-05	3.65E-02	1.93E-03	0.193
0	33	4	1984	183	3.83E-05	3.83E-02	2.03E-03	0.203
0	37	11	2231	247	2.83E-05	2.83E-02	1.50E-03	0.150
0	40	22	2422	191	3.66E-05	3.66E-02	1.94E-03	0.194
0	44	10	2650	228	3.07E-05	3.07E-02	1.63E-03	0.163
0	48	0	2880	230	3.04E-05	3.04E-02	1.61E-03	0.161
0	51	8	3068	188	3.72E-05	3.72E-02	1.97E-03	0.197
0	55	2	3302	234	2.99E-05	2.99E-02	1.59E-03	0.159
0	58	30	3510	208	3.37E-05	3.37E-02	1.78E-03	0.178
1	2	4	3724	214	3.27E-05	3.27E-02	1.73E-03	0.173
1	6	1	3961	237	2.95E-05	2.95E-02	1.57E-03	0.157
1	9	42	4182	221	3.17E-05	3.17E-02	1.68E-03	0.168
1	13	36	4416	234	2.99E-05	2.99E-02	1.59E-03	0.159
1	17	30	4650	234	2.99E-05	2.99E-02	1.59E-03	0.159
1	21	2	4862	212	3.30E-05	3.30E-02	1.75E-03	0.175
1	24	23	5063	201	3.48E-05	3.48E-02	1.85E-03	0.185
1	28	37	5317	254	2.76E-05	2.76E-02	1.46E-03	0.146
1	32	11	5531	214	3.27E-05	3.27E-02	1.73E-03	0.173
1	35	52	5752	221	3.17E-05	3.17E-02	1.68E-03	0.168
1	39	19	5959	207	3.38E-05	3.38E-02	1.79E-03	0.179
1	42	22	6142	183	3.83E-05	3.83E-02	2.03E-03	0.203
1	46	12	6372	230	3.04E-05	3.04E-02	1.61E-03	0.161
1	50	9	6609	237	2.95E-05	2.95E-02	1.57E-03	0.157
1	53	20	6800	191	3.66E-05	3.66E-02	1.94E-03	0.194
1	56	54	7014	214	3.27E-05	3.27E-02	1.73E-03	0.173
2	0	16	7216	202	3.47E-05	3.47E-02	1.84E-03	0.184
2	3	41	7421	205	3.41E-05	3.41E-02	1.81E-03	0.181
2	6	44	7604	183	3.83E-05	3.83E-02	2.03E-03	0.203
2	10	38	7838	234	2.99E-05	2.99E-02	1.59E-03	0.159
2	13	48	8028	190	3.68E-05	3.68E-02	1.95E-03	0.195
2	16	56	8216	188	3.72E-05	3.72E-02	1.97E-03	0.197
2	20	38	8438	222	3.15E-05	3.15E-02	1.67E-03	0.167
2	24	10	8650	212	3.30E-05	3.30E-02	1.75E-03	0.175
2	27	22	8842	192	3.65E-05	3.65E-02	1.93E-03	0.193

Tabla 7. Medición N° 3

t			t	t/tm	Qa		V <sub>tubo</sub>	
horas	min	seg	seg	seg	horas	min	seg	seg
0	3	57	237	237	2.95E-05	2.95E-02	1.57E-03	0.157
0	7	36	456	219	3.20E-05	3.20E-02	1.69E-03	0.169
0	11	45	705	249	2.81E-05	2.81E-02	1.49E-03	0.149
0	15	47	947	242	2.89E-05	2.89E-02	1.53E-03	0.153
0	19	33	1173	226	3.10E-05	3.10E-02	1.64E-03	0.164
0	23	50	1430	257	2.72E-05	2.72E-02	1.44E-03	0.144
0	27	47	1667	237	2.95E-05	2.95E-02	1.57E-03	0.157
0	31	50	1910	243	2.88E-05	2.88E-02	1.53E-03	0.153
0	35	53	2153	243	2.88E-05	2.88E-02	1.53E-03	0.153
0	39	54	2394	241	2.90E-05	2.90E-02	1.54E-03	0.154
0	44	3	2643	249	2.81E-05	2.81E-02	1.49E-03	0.149
0	48	13	2893	250	2.80E-05	2.80E-02	1.48E-03	0.148
0	53	1	3181	288	2.43E-05	2.43E-02	1.29E-03	0.129
0	56	5	3365	184	3.80E-05	3.80E-02	2.02E-03	0.202
1	0	3	3603	238	2.94E-05	2.94E-02	1.56E-03	0.156
1	4	16	3856	253	2.77E-05	2.77E-02	1.47E-03	0.147
1	8	45	4125	269	2.60E-05	2.60E-02	1.38E-03	0.138
1	12	56	4376	251	2.79E-05	2.79E-02	1.48E-03	0.148
1	16	47	4607	231	3.03E-05	3.03E-02	1.61E-03	0.161
1	21	0	4860	253	2.77E-05	2.77E-02	1.47E-03	0.147
1	25	16	5116	256	2.73E-05	2.73E-02	1.45E-03	0.145
1	29	40	5380	264	2.65E-05	2.65E-02	1.41E-03	0.141
1	33	56	5636	256	2.73E-05	2.73E-02	1.45E-03	0.145
1	37	51	5871	235	2.98E-05	2.98E-02	1.58E-03	0.158
1	41	40	6100	229	3.06E-05	3.06E-02	1.62E-03	0.162
1	46	14	6374	274	2.55E-05	2.55E-02	1.35E-03	0.135
1	50	28	6628	254	2.76E-05	2.76E-02	1.46E-03	0.146
1	54	43	6883	255	2.75E-05	2.75E-02	1.45E-03	0.145
1	58	56	7136	253	2.77E-05	2.77E-02	1.47E-03	0.147
2	3	5	7385	249	2.81E-05	2.81E-02	1.49E-03	0.149
2	7	2	7622	237	2.95E-05	2.95E-02	1.57E-03	0.157
2	10	59	7859	237	2.95E-05	2.95E-02	1.57E-03	0.157
2	15	38	8138	279	2.51E-05	2.51E-02	1.33E-03	0.133
2	20	14	8414	276	2.54E-05	2.54E-02	1.34E-03	0.134
2	23	52	8632	218	3.21E-05	3.21E-02	1.70E-03	0.170
2	28	18	8898	266	2.63E-05	2.63E-02	1.39E-03	0.139
2	32	39	9159	261	2.68E-05	2.68E-02	1.42E-03	0.142
2	36	49	9409	250	2.80E-05	2.80E-02	1.48E-03	0.148
2	40	21	9621	212	3.30E-05	3.30E-02	1.75E-03	0.175
2	45	37	9937	316	2.22E-05	2.22E-02	1.17E-03	0.117
2	49	50	10190	253	2.77E-05	2.77E-02	1.47E-03	0.147
2	54	14	10454	264	2.65E-05	2.65E-02	1.41E-03	0.141

Tabla 8. Medición N° 4

t			t	t/tm	Qa		V <sub>tubo</sub>	
horas	min	seg	seg	seg	m <sup>3</sup> /seg	lps	(m/seg)	(cm/seg)
0	2	12	132	132	5.30E-05	5.30E-02	2.81E-03	0.281
0	4	14	254	122	5.74E-05	5.74E-02	3.04E-03	0.304
0	6	21	381	127	5.51E-05	5.51E-02	2.92E-03	0.292
0	8	37	517	136	5.15E-05	5.15E-02	2.73E-03	0.273
0	10	37	637	120	5.83E-05	5.83E-02	3.09E-03	0.309
0	12	43	763	126	5.56E-05	5.56E-02	2.94E-03	0.294
0	14	48	888	125	5.60E-05	5.60E-02	2.97E-03	0.297
0	16	57	1017	129	5.43E-05	5.43E-02	2.88E-03	0.288
0	19	2	1142	125	5.60E-05	5.60E-02	2.97E-03	0.297
0	21	6	1266	124	5.65E-05	5.65E-02	2.99E-03	0.299
0	23	8	1388	122	5.74E-05	5.74E-02	3.04E-03	0.304
0	25	21	1521	133	5.26E-05	5.26E-02	2.79E-03	0.279
0	27	32	1652	131	5.34E-05	5.34E-02	2.83E-03	0.283
0	29	35	1775	123	5.69E-05	5.69E-02	3.02E-03	0.302
0	32	0	1920	145	4.83E-05	4.83E-02	2.56E-03	0.256
0	33	55	2035	115	6.09E-05	6.09E-02	3.23E-03	0.323
0	35	20	2120	85	8.24E-05	8.24E-02	4.36E-03	0.436
0	38	14	2294	174	4.02E-05	4.02E-02	2.13E-03	0.213
0	40	27	2427	133	5.26E-05	5.26E-02	2.79E-03	0.279
0	42	37	2557	130	5.38E-05	5.38E-02	2.85E-03	0.285
0	44	50	2690	133	5.26E-05	5.26E-02	2.79E-03	0.279
0	46	55	2815	125	5.60E-05	5.60E-02	2.97E-03	0.297
0	49	11	2951	136	5.15E-05	5.15E-02	2.73E-03	0.273
0	51	51	3111	160	4.38E-05	4.38E-02	2.32E-03	0.232
0	53	42	3222	111	6.31E-05	6.31E-02	3.34E-03	0.334
0	55	50	3350	128	5.47E-05	5.47E-02	2.90E-03	0.290
0	57	46	3466	116	6.03E-05	6.03E-02	3.20E-03	0.320
0	59	46	3586	120	5.83E-05	5.83E-02	3.09E-03	0.309
1	1	56	3716	130	5.38E-05	5.38E-02	2.85E-03	0.285
1	3	51	3831	115	6.09E-05	6.09E-02	3.23E-03	0.323
1	5	56	3956	125	5.60E-05	5.60E-02	2.97E-03	0.297
1	8	12	4092	136	5.15E-05	5.15E-02	2.73E-03	0.273
1	10	12	4212	120	5.83E-05	5.83E-02	3.09E-03	0.309
1	12	23	4343	131	5.34E-05	5.34E-02	2.83E-03	0.283
1	14	26	4466	123	5.69E-05	5.69E-02	3.02E-03	0.302
1	16	32	4592	126	5.56E-05	5.56E-02	2.94E-03	0.294
1	18	37	4717	125	5.60E-05	5.60E-02	2.97E-03	0.297
1	20	50	4850	133	5.26E-05	5.26E-02	2.79E-03	0.279
1	22	58	4978	128	5.47E-05	5.47E-02	2.90E-03	0.290
1	25	3	5103	125	5.60E-05	5.60E-02	2.97E-03	0.297
1	27	57	5277	174	4.02E-05	4.02E-02	2.13E-03	0.213
1	30	13	5413	136	5.15E-05	5.15E-02	2.73E-03	0.273

Tabla 9. Medición N° 5

t				t	t/tm	Qa		V <sub>tubo</sub>	
horas	min	seg	seg	seg	horas	min	seg	seg	seg
0	2	4	17	124.17	124.17	5.64E-05	5.64E-02	2.99E-03	0.299
0	4	0	59	240.59	116.42	6.01E-05	6.01E-02	3.19E-03	0.319
0	6	2	71	362.71	122.12	5.73E-05	5.73E-02	3.04E-03	0.304
0	8	3	27	483.27	120.56	5.81E-05	5.81E-02	3.08E-03	0.308
0	10	11	15	611.15	127.88	5.47E-05	5.47E-02	2.90E-03	0.290
0	12	11	24	731.24	120.09	5.83E-05	5.83E-02	3.09E-03	0.309
0	14	19	97	859.97	128.73	5.44E-05	5.44E-02	2.88E-03	0.288
0	16	24	71	984.71	124.74	5.61E-05	5.61E-02	2.97E-03	0.297
0	18	29	15	1109.15	124.44	5.63E-05	5.63E-02	2.98E-03	0.298
0	20	21	1	1221.01	111.86	6.26E-05	6.26E-02	3.32E-03	0.332
0	22	12	87	1332.87	111.86	6.26E-05	6.26E-02	3.32E-03	0.332
0	24	4	74	1444.74	111.87	6.26E-05	6.26E-02	3.32E-03	0.332
0	26	45	43	1605.43	160.69	4.36E-05	4.36E-02	2.31E-03	0.231
0	28	56	12	1736.12	130.69	5.36E-05	5.36E-02	2.84E-03	0.284
0	30	59	59	1859.59	123.47	5.67E-05	5.67E-02	3.00E-03	0.300
0	33	8	21	1988.21	128.62	5.44E-05	5.44E-02	2.88E-03	0.288
0	34	58	30	2098.3	110.09	6.36E-05	6.36E-02	3.37E-03	0.337
0	37	13	37	2233.37	135.07	5.18E-05	5.18E-02	2.75E-03	0.275
0	39	19	21	2359.21	125.84	5.56E-05	5.56E-02	2.95E-03	0.295
0	41	28		2488	128.79	5.44E-05	5.44E-02	2.88E-03	0.288
0	43	37		2617	129	5.43E-05	5.43E-02	2.88E-03	0.288
0	45	51	19	2751.19	134.19	5.22E-05	5.22E-02	2.76E-03	0.276
0	47	52	58	2872.58	121.39	5.77E-05	5.77E-02	3.06E-03	0.306
0	50	1	32	3001.32	128.74	5.44E-05	5.44E-02	2.88E-03	0.288
0	52	11	77	3131.77	130.45	5.37E-05	5.37E-02	2.84E-03	0.284
0	54	19	78	3259.78	128.01	5.47E-05	5.47E-02	2.90E-03	0.290
0	56	10	23	3370.23	110.45	6.34E-05	6.34E-02	3.36E-03	0.336
0	58	19	53	3499.53	129.3	5.41E-05	5.41E-02	2.87E-03	0.287
1	0	25	88	3625.88	126.35	5.54E-05	5.54E-02	2.94E-03	0.294
1	2	22	76	3742.76	116.88	5.99E-05	5.99E-02	3.17E-03	0.317
1	4	28	14	3868.14	125.38	5.58E-05	5.58E-02	2.96E-03	0.296
1	6	30	82	3990.82	122.68	5.71E-05	5.71E-02	3.02E-03	0.302
1	8	34	20	4114.2	123.38	5.67E-05	5.67E-02	3.01E-03	0.301
1	10	42	3	4242.03	127.83	5.48E-05	5.48E-02	2.90E-03	0.290
1	12	34	83	4354.83	112.8	6.21E-05	6.21E-02	3.29E-03	0.329
1	14	38	98	4478.98	124.15	5.64E-05	5.64E-02	2.99E-03	0.299
1	16	30	55	4590.55	111.57	6.27E-05	6.27E-02	3.33E-03	0.333
1	18	30	81	4710.81	120.26	5.82E-05	5.82E-02	3.08E-03	0.308
1	20	39	67	4839.67	128.86	5.43E-05	5.43E-02	2.88E-03	0.288
1	22	43	52	4963.52	123.85	5.65E-05	5.65E-02	3.00E-03	0.300
1	24	35	45	5075.45	111.93	6.25E-05	6.25E-02	3.31E-03	0.331
1	27	16	43	5236.43	160.98	4.35E-05	4.35E-02	2.30E-03	0.230

Tabla 10. Medición N° 6

t				t	t/tm	Qa		V <sub>tubo</sub>	
horas	min	seg	seg	seg	horas	min	seg	seg	seg
0	1	29	56	89.56	89.56	7.82E-05	7.82E-02	4.14E-03	0.414
0	3	3	9	183.09	93.53	7.48E-05	7.48E-02	3.97E-03	0.397
0	4	39	12	279.12	96.03	7.29E-05	7.29E-02	3.86E-03	0.386
0	6	8	53	368.53	89.41	7.83E-05	7.83E-02	4.15E-03	0.415
0	7	36	81	456.81	88.28	7.93E-05	7.93E-02	4.20E-03	0.420
0	9	15	81	555.81	99	7.07E-05	7.07E-02	3.75E-03	0.375
0	10	46	9	646.09	90.28	7.75E-05	7.75E-02	4.11E-03	0.411
0	12	20	21	740.21	94.12	7.44E-05	7.44E-02	3.94E-03	0.394
0	13	52	98	832.98	92.77	7.55E-05	7.55E-02	4.00E-03	0.400
0	15	24	4	924.04	91.06	7.69E-05	7.69E-02	4.07E-03	0.407
0	17	0	30	1020.3	96.26	7.27E-05	7.27E-02	3.85E-03	0.385
0	18	32	27	1112.27	91.97	7.61E-05	7.61E-02	4.03E-03	0.403
0	20	3	27	1203.27	91	7.69E-05	7.69E-02	4.08E-03	0.408
0	21	34	45	1294.45	91.18	7.68E-05	7.68E-02	4.07E-03	0.407
0	23	8	17	1388.17	93.72	7.47E-05	7.47E-02	3.96E-03	0.396
0	24	21	64	1461.64	73.47	9.53E-05	9.53E-02	5.05E-03	0.505
0	25	35	11	1535.11	73.47	9.53E-05	9.53E-02	5.05E-03	0.505
0	27	44	92	1664.92	129.81	5.39E-05	5.39E-02	2.86E-03	0.286
0	29	17	30	1757.3	92.38	7.58E-05	7.58E-02	4.02E-03	0.402
0	29	34	16	1774.16	16.86	4.15E-04	4.15E-01	2.20E-02	2.200
0	31	7	89	1867.89	93.73	7.47E-05	7.47E-02	3.96E-03	0.396
0	32	42	25	1962.25	94.36	7.42E-05	7.42E-02	3.93E-03	0.393
0	33	55	27	2035.27	73.02	9.59E-05	9.59E-02	5.08E-03	0.508
0	35	29	62	2129.62	94.35	7.42E-05	7.42E-02	3.93E-03	0.393
0	37	1	76	2221.76	92.14	7.60E-05	7.60E-02	4.03E-03	0.403
0	38	30	13	2310.13	88.37	7.92E-05	7.92E-02	4.20E-03	0.420
0	40	6	64	2406.64	96.51	7.25E-05	7.25E-02	3.84E-03	0.384
0	41	19	59	2479.59	72.95	9.60E-05	9.60E-02	5.09E-03	0.509
0	42	49	90	2569.9	90.31	7.75E-05	7.75E-02	4.11E-03	0.411
0	44	22	79	2662.79	92.89	7.54E-05	7.54E-02	3.99E-03	0.399
0	45	54	75	2754.75	91.96	7.61E-05	7.61E-02	4.03E-03	0.403
0	47	26	88	2846.88	92.13	7.60E-05	7.60E-02	4.03E-03	0.403
0	48	41	11	2921.11	74.23	9.43E-05	9.43E-02	5.00E-03	0.500
0	48	57	62	2937.62	16.51	4.24E-04	4.24E-01	2.25E-02	2.247
0	50	36	79	3036.79	99.17	7.06E-05	7.06E-02	3.74E-03	0.374
0	52	7	35	3127.35	90.56	7.73E-05	7.73E-02	4.10E-03	0.410
0	53	38	1	3218.01	90.66	7.72E-05	7.72E-02	4.09E-03	0.409
0	54	52	46	3292.46	74.45	9.40E-05	9.40E-02	4.98E-03	0.498
0	57	1	92	3421.92	129.46	5.41E-05	5.41E-02	2.87E-03	0.287
0	58	34	77	3514.77	92.85	7.54E-05	7.54E-02	4.00E-03	0.400
1	0	4	14	3604.14	89.37	7.83E-05	7.83E-02	4.15E-03	0.415
1	1	36	46	3696.46	92.32	7.58E-05	7.58E-02	4.02E-03	0.402

Tabla 11. Medición N° 7

t				t	t/tm	Qa		V <sub>tubo</sub>	
horas	min	seg	seg	seg	horas	min	seg	seg	seg
0	0	36	59	36.59	36.59	1.91E-04	1.91E-01	1.01E-02	1.014
0	1	19	49	79.49	42.9	1.63E-04	1.63E-01	8.65E-03	0.865
0	2	0	37	120.37	40.88	1.71E-04	1.71E-01	9.07E-03	0.907
0	2	42	14	162.14	41.77	1.68E-04	1.68E-01	8.88E-03	0.888
0	3	18	78	198.78	36.64	1.91E-04	1.91E-01	1.01E-02	1.012
0	4	1	16	241.16	42.38	1.65E-04	1.65E-01	8.75E-03	0.875
0	4	41	52	281.52	40.36	1.73E-04	1.73E-01	9.19E-03	0.919
0	5	21	2	321.02	39.5	1.77E-04	1.77E-01	9.39E-03	0.939
0	6	1	88	361.88	40.86	1.71E-04	1.71E-01	9.08E-03	0.908
0	6	43	73	403.73	41.85	1.67E-04	1.67E-01	8.86E-03	0.886
0	7	26	22	446.22	42.49	1.65E-04	1.65E-01	8.73E-03	0.873
0	8	4	34	484.34	38.12	1.84E-04	1.84E-01	9.73E-03	0.973
0	8	43	57	523.57	39.23	1.78E-04	1.78E-01	9.46E-03	0.946
0	9	25	42	565.42	41.85	1.67E-04	1.67E-01	8.86E-03	0.886
0	10	7	50	607.5	42.08	1.66E-04	1.66E-01	8.82E-03	0.882
0	10	48	95	648.95	41.45	1.69E-04	1.69E-01	8.95E-03	0.895
0	11	29	23	689.23	40.28	1.74E-04	1.74E-01	9.21E-03	0.921
0	12	10	44	730.44	41.21	1.70E-04	1.70E-01	9.00E-03	0.900
0	12	52	50	772.5	42.06	1.66E-04	1.66E-01	8.82E-03	0.882
0	13	33	88	813.88	41.38	1.69E-04	1.69E-01	8.97E-03	0.897
0	14	16	72	856.72	42.84	1.63E-04	1.63E-01	8.66E-03	0.866
0	14	58	8	898.08	41.36	1.69E-04	1.69E-01	8.97E-03	0.897
0	15	40	26	940.26	42.18	1.66E-04	1.66E-01	8.80E-03	0.880
0	16	16	90	976.9	36.64	1.91E-04	1.91E-01	1.01E-02	1.012
0	17	0	65	1020.65	43.75	1.60E-04	1.60E-01	8.48E-03	0.848
0	17	42	50	1062.5	41.85	1.67E-04	1.67E-01	8.86E-03	0.886
0	18	24	90	1104.9	42.4	1.65E-04	1.65E-01	8.75E-03	0.875
0	19	3	74	1143.74	38.84	1.80E-04	1.80E-01	9.55E-03	0.955
0	19	43	89	1183.89	40.15	1.74E-04	1.74E-01	9.24E-03	0.924
0	20	25	77	1225.77	41.88	1.67E-04	1.67E-01	8.86E-03	0.886
0	21	6	5	1266.05	40.28	1.74E-04	1.74E-01	9.21E-03	0.921
0	21	44	54	1304.54	38.49	1.82E-04	1.82E-01	9.64E-03	0.964
0	22	24	78	1344.78	40.24	1.74E-04	1.74E-01	9.22E-03	0.922
0	23	5	24	1385.24	40.46	1.73E-04	1.73E-01	9.17E-03	0.917
0	23	41	7	1421.07	35.83	1.95E-04	1.95E-01	1.04E-02	1.035
0	24	18	26	1458.26	37.19	1.88E-04	1.88E-01	9.98E-03	0.998
0	25	1	16	1501.16	42.9	1.63E-04	1.63E-01	8.65E-03	0.865
0	25	42	89	1542.89	41.73	1.68E-04	1.68E-01	8.89E-03	0.889
0	26	24	29	1584.29	41.4	1.69E-04	1.69E-01	8.96E-03	0.896
0	27	4	91	1624.91	40.62	1.72E-04	1.72E-01	9.13E-03	0.913
0	27	46	75	1666.75	41.84	1.67E-04	1.67E-01	8.87E-03	0.887
0	28	25	1	1705.01	38.26	1.83E-04	1.83E-01	9.70E-03	0.970

Tabla 12. Medición N° 8

t				t	t/tm	Qa		V <sub>tubo</sub>	
horas	min	seg	seg	seg	horas	min	seg	seg	seg
0	0	31	22	31.22	31.22	2.24E-04	2.24E-01	1.19E-02	1.188
0	1	3	14	63.14	31.92	2.19E-04	2.19E-01	1.16E-02	1.162
0	1	37	32	97.32	34.18	2.05E-04	2.05E-01	1.09E-02	1.085
0	2	12	81	132.81	35.49	1.97E-04	1.97E-01	1.05E-02	1.045
0	2	47	44	167.44	34.63	2.02E-04	2.02E-01	1.07E-02	1.071
0	3	21	53	201.53	34.09	2.05E-04	2.05E-01	1.09E-02	1.088
0	3	55	50	235.5	33.97	2.06E-04	2.06E-01	1.09E-02	1.092
0	4	28	75	268.75	33.25	2.11E-04	2.11E-01	1.12E-02	1.116
0	5	4	11	304.11	35.36	1.98E-04	1.98E-01	1.05E-02	1.049
0	5	39	87	339.87	35.76	1.96E-04	1.96E-01	1.04E-02	1.037
0	6	10	78	370.78	30.91	2.26E-04	2.26E-01	1.20E-02	1.200
0	6	48	18	408.18	37.4	1.87E-04	1.87E-01	9.92E-03	0.992
0	7	17	90	437.9	29.72	2.36E-04	2.36E-01	1.25E-02	1.248
0	7	51	28	471.28	33.38	2.10E-04	2.10E-01	1.11E-02	1.111
0	8	26	58	506.58	35.3	1.98E-04	1.98E-01	1.05E-02	1.051
0	9	0	12	540.12	33.54	2.09E-04	2.09E-01	1.11E-02	1.106
0	9	37	70	577.7	37.58	1.86E-04	1.86E-01	9.87E-03	0.987
0	10	9	9	609.09	31.39	2.23E-04	2.23E-01	1.18E-02	1.182
0	10	44	41	644.41	35.32	1.98E-04	1.98E-01	1.05E-02	1.050
0	11	18	72	678.72	34.31	2.04E-04	2.04E-01	1.08E-02	1.081
0	11	54	15	714.15	35.43	1.98E-04	1.98E-01	1.05E-02	1.047
0	12	28	93	748.93	34.78	2.01E-04	2.01E-01	1.07E-02	1.067
0	13	7	33	787.33	38.4	1.82E-04	1.82E-01	9.66E-03	0.966
0	13	40	66	820.66	33.33	2.10E-04	2.10E-01	1.11E-02	1.113
0	14	11	57	851.57	30.91	2.26E-04	2.26E-01	1.20E-02	1.200
0	14	47	48	887.48	35.91	1.95E-04	1.95E-01	1.03E-02	1.033
0	15	18	18	918.18	30.7	2.28E-04	2.28E-01	1.21E-02	1.208
0	15	52	43	952.43	34.25	2.04E-04	2.04E-01	1.08E-02	1.083
0	16	24	32	984.32	31.89	2.20E-04	2.20E-01	1.16E-02	1.163
0	17	2	18	1022.18	37.86	1.85E-04	1.85E-01	9.80E-03	0.980
0	17	38	54	1058.54	36.36	1.93E-04	1.93E-01	1.02E-02	1.020
0	18	14	83	1094.83	36.29	1.93E-04	1.93E-01	1.02E-02	1.022
0	18	44	37	1124.37	29.54	2.37E-04	2.37E-01	1.26E-02	1.256
0	19	18	20	1158.2	33.83	2.07E-04	2.07E-01	1.10E-02	1.097
0	19	52	78	1192.78	34.58	2.02E-04	2.02E-01	1.07E-02	1.073
0	20	26	7	1226.07	33.29	2.10E-04	2.10E-01	1.11E-02	1.114
0	21	1	95	1261.95	35.88	1.95E-04	1.95E-01	1.03E-02	1.034
0	21	33	20	1293.2	31.25	2.24E-04	2.24E-01	1.19E-02	1.187
0	22	8	47	1328.47	35.27	1.98E-04	1.98E-01	1.05E-02	1.052
0	22	40	9	1360.09	31.62	2.21E-04	2.21E-01	1.17E-02	1.173
0	23	11	43	1391.43	31.34	2.23E-04	2.23E-01	1.18E-02	1.184
0	23	42	65	1422.65	31.22	2.24E-04	2.24E-01	1.19E-02	1.188

Tabla 13. Medición N° 9

t				t	t/tm	Qa		V <sub>tubo</sub>	
horas	min	seg	seg	seg	horas	min	seg	seg	seg
0	0	28	75	28.75	28.75	2.43E-04	2.43E-01	1.29E-02	1.290
0	1	1	72	61.72	32.97	2.12E-04	2.12E-01	1.13E-02	1.125
0	1	29	20	89.2	27.48	2.55E-04	2.55E-01	1.35E-02	1.350
0	1	59	64	119.64	30.44	2.30E-04	2.30E-01	1.22E-02	1.219
0	2	34	58	154.58	34.94	2.00E-04	2.00E-01	1.06E-02	1.062
0	3	5	96	185.96	31.38	2.23E-04	2.23E-01	1.18E-02	1.182
0	3	35	13	215.13	29.17	2.40E-04	2.40E-01	1.27E-02	1.272
0	4	5	87	245.87	30.74	2.28E-04	2.28E-01	1.21E-02	1.207
0	4	40	38	280.38	34.51	2.03E-04	2.03E-01	1.07E-02	1.075
0	5	9	89	309.89	29.51	2.37E-04	2.37E-01	1.26E-02	1.257
0	5	39	39	339.39	29.5	2.37E-04	2.37E-01	1.26E-02	1.258
0	6	10	25	370.25	30.86	2.27E-04	2.27E-01	1.20E-02	1.202
0	6	40	37	400.37	30.12	2.32E-04	2.32E-01	1.23E-02	1.232
0	7	13	19	433.19	32.82	2.13E-04	2.13E-01	1.13E-02	1.130
0	7	43	88	463.88	30.69	2.28E-04	2.28E-01	1.21E-02	1.209
0	8	13	51	493.51	29.63	2.36E-04	2.36E-01	1.25E-02	1.252
0	8	42	77	522.77	29.26	2.39E-04	2.39E-01	1.27E-02	1.268
0	9	18	3	558.03	35.26	1.99E-04	1.99E-01	1.05E-02	1.052
0	9	52	85	592.85	34.82	2.01E-04	2.01E-01	1.07E-02	1.065
0	10	24	88	624.88	32.03	2.19E-04	2.19E-01	1.16E-02	1.158
0	10	59	26	659.26	34.38	2.04E-04	2.04E-01	1.08E-02	1.079
0	11	29	58	689.58	30.32	2.31E-04	2.31E-01	1.22E-02	1.224
0	12	0	9	720.09	30.51	2.29E-04	2.29E-01	1.22E-02	1.216
0	12	29	21	749.21	29.12	2.40E-04	2.40E-01	1.27E-02	1.274
0	12	58	33	778.33	29.12	2.40E-04	2.40E-01	1.27E-02	1.274
0	13	25	80	805.8	27.47	2.55E-04	2.55E-01	1.35E-02	1.350
0	13	53	99	833.99	28.19	2.48E-04	2.48E-01	1.32E-02	1.316
0	14	24	26	864.26	30.27	2.31E-04	2.31E-01	1.23E-02	1.226
0	14	53	78	893.78	29.52	2.37E-04	2.37E-01	1.26E-02	1.257
0	15	25	63	925.63	31.85	2.20E-04	2.20E-01	1.16E-02	1.165
0	15	55	69	955.69	30.06	2.33E-04	2.33E-01	1.23E-02	1.234
0	16	26	86	986.86	31.17	2.25E-04	2.25E-01	1.19E-02	1.190
0	16	58	36	1018.36	31.5	2.22E-04	2.22E-01	1.18E-02	1.178
0	17	28	79	1048.79	30.43	2.30E-04	2.30E-01	1.22E-02	1.219
0	17	56	91	1076.91	28.12	2.49E-04	2.49E-01	1.32E-02	1.319
0	18	26	56	1106.56	29.65	2.36E-04	2.36E-01	1.25E-02	1.251
0	18	56	37	1136.37	29.81	2.35E-04	2.35E-01	1.24E-02	1.244
0	19	25	56	1165.56	29.19	2.40E-04	2.40E-01	1.27E-02	1.271
0	19	55	68	1195.68	30.12	2.32E-04	2.32E-01	1.23E-02	1.232
0	20	29	23	1229.23	33.55	2.09E-04	2.09E-01	1.11E-02	1.106
0	20	58	9	1258.09	28.86	2.43E-04	2.43E-01	1.29E-02	1.285
0	21	33	75	1293.75	35.66	1.96E-04	1.96E-01	1.04E-02	1.040

Tabla 14. Medición N° 10

t				t	t/tm	Qa		V <sub>tubo</sub>	
horas	min	seg	seg	seg	horas	min	seg	seg	seg
0	0	26	62	26.62	26.62	2.63E-04	2.63E-01	1.39E-02	1.394
0	0	52	47	52.47	25.85	2.71E-04	2.71E-01	1.44E-02	1.435
0	1	18	20	78.2	25.73	2.72E-04	2.72E-01	1.44E-02	1.442
0	1	44	20	104.2	26	2.69E-04	2.69E-01	1.43E-02	1.427
0	2	10	97	130.97	26.77	2.61E-04	2.61E-01	1.39E-02	1.386
0	2	35	24	155.24	24.27	2.88E-04	2.88E-01	1.53E-02	1.529
0	3	1	88	181.88	26.64	2.63E-04	2.63E-01	1.39E-02	1.393
0	3	26	78	206.78	24.9	2.81E-04	2.81E-01	1.49E-02	1.490
0	3	53	7	233.07	26.29	2.66E-04	2.66E-01	1.41E-02	1.411
0	4	18	6	258.06	24.99	2.80E-04	2.80E-01	1.48E-02	1.484
0	4	45	51	285.51	27.45	2.55E-04	2.55E-01	1.35E-02	1.351
0	5	10	33	310.33	24.82	2.82E-04	2.82E-01	1.49E-02	1.495
0	5	36	9	336.09	25.76	2.72E-04	2.72E-01	1.44E-02	1.440
0	6	2	25	362.25	26.16	2.68E-04	2.68E-01	1.42E-02	1.418
0	6	30	51	390.51	28.26	2.48E-04	2.48E-01	1.31E-02	1.313
0	6	55	62	415.62	25.11	2.79E-04	2.79E-01	1.48E-02	1.477
0	7	21	30	441.3	25.68	2.73E-04	2.73E-01	1.44E-02	1.445
0	7	48	33	468.33	27.03	2.59E-04	2.59E-01	1.37E-02	1.372
0	8	14	16	494.16	25.83	2.71E-04	2.71E-01	1.44E-02	1.436
0	8	40	52	520.52	26.36	2.66E-04	2.66E-01	1.41E-02	1.407
0	9	5	60	545.6	25.08	2.79E-04	2.79E-01	1.48E-02	1.479
0	9	30	30	570.3	24.7	2.83E-04	2.83E-01	1.50E-02	1.502
0	9	57	64	597.64	27.34	2.56E-04	2.56E-01	1.36E-02	1.357
0	10	24	72	624.72	27.08	2.58E-04	2.58E-01	1.37E-02	1.370
0	10	50	83	650.83	26.11	2.68E-04	2.68E-01	1.42E-02	1.421
0	11	14	37	674.37	23.54	2.97E-04	2.97E-01	1.58E-02	1.576
0	11	41	2	701.02	26.65	2.63E-04	2.63E-01	1.39E-02	1.392
0	12	7	54	727.54	26.52	2.64E-04	2.64E-01	1.40E-02	1.399
0	12	32	53	752.53	24.99	2.80E-04	2.80E-01	1.48E-02	1.484
0	12	59	66	779.66	27.13	2.58E-04	2.58E-01	1.37E-02	1.367
0	13	24	37	804.37	24.71	2.83E-04	2.83E-01	1.50E-02	1.501
0	13	51	55	831.55	27.18	2.58E-04	2.58E-01	1.36E-02	1.365
0	14	17	37	857.37	25.82	2.71E-04	2.71E-01	1.44E-02	1.437
0	14	43	63	883.63	26.26	2.67E-04	2.67E-01	1.41E-02	1.413
0	15	10	10	910.1	26.47	2.64E-04	2.64E-01	1.40E-02	1.401
0	15	34	14	934.14	24.04	2.91E-04	2.91E-01	1.54E-02	1.543
0	16	2	4	962.04	27.9	2.51E-04	2.51E-01	1.33E-02	1.330
0	16	27	14	987.14	25.1	2.79E-04	2.79E-01	1.48E-02	1.478
0	16	53	1	1013.01	25.87	2.71E-04	2.71E-01	1.43E-02	1.434
0	17	19	68	1039.68	26.67	2.62E-04	2.62E-01	1.39E-02	1.391
0	17	46	12	1066.12	26.44	2.65E-04	2.65E-01	1.40E-02	1.403
0	18	13	56	1093.56	27.44	2.55E-04	2.55E-01	1.35E-02	1.352

Tabla 15. Medición N° 11

t				t	t/tm	Qa		V <sub>tubo</sub>	
horas	min	seg	seg	seg	horas	min	seg	seg	seg
0	0	20	61	20.6104	20.6104	3.40E-04	3.40E-01	1.80E-02	1.800
0	0	40	90	40.8972	20.2868	3.45E-04	3.45E-01	1.83E-02	1.829
0	1	1	95	61.9494	21.0522	3.33E-04	3.33E-01	1.76E-02	1.762
0	1	23	75	83.7528	21.8034	3.21E-04	3.21E-01	1.70E-02	1.701
0	1	48	43	108.434	24.6813	2.84E-04	2.84E-01	1.50E-02	1.503
0	2	12	1	132.011	23.577	2.97E-04	2.97E-01	1.57E-02	1.573
0	2	34	81	154.805	22.7941	3.07E-04	3.07E-01	1.63E-02	1.628
0	2	58	60	178.6	23.7952	2.94E-04	2.94E-01	1.56E-02	1.559
0	3	19	87	199.87	21.2695	3.29E-04	3.29E-01	1.74E-02	1.744
0	3	42	27	222.273	22.4029	3.12E-04	3.12E-01	1.66E-02	1.656
0	4	6	36	246.363	24.0897	2.91E-04	2.91E-01	1.54E-02	1.540
0	4	28	78	268.775	22.4125	3.12E-04	3.12E-01	1.66E-02	1.655
0	4	51	71	291.713	22.9378	3.05E-04	3.05E-01	1.62E-02	1.617
0	5	15	99	315.989	24.2762	2.88E-04	2.88E-01	1.53E-02	1.528
0	5	37	57	337.574	21.5853	3.24E-04	3.24E-01	1.72E-02	1.719
0	6	1	25	361.251	23.6762	2.96E-04	2.96E-01	1.57E-02	1.567
0	6	23	45	383.45	22.1998	3.15E-04	3.15E-01	1.67E-02	1.671
0	6	46	89	406.886	23.4359	2.99E-04	2.99E-01	1.58E-02	1.583
0	7	9	38	429.379	22.493	3.11E-04	3.11E-01	1.65E-02	1.649
0	7	30	83	450.828	21.4484	3.26E-04	3.26E-01	1.73E-02	1.730
0	7	53	47	473.465	22.6378	3.09E-04	3.09E-01	1.64E-02	1.639
0	8	16	63	496.634	23.1685	3.02E-04	3.02E-01	1.60E-02	1.601
0	8	38	84	518.842	22.2085	3.15E-04	3.15E-01	1.67E-02	1.670
0	9	1	26	541.263	22.421	3.12E-04	3.12E-01	1.65E-02	1.655
0	9	25	90	565.9	24.6365	2.84E-04	2.84E-01	1.51E-02	1.506
0	9	50	10	590.102	24.2021	2.89E-04	2.89E-01	1.53E-02	1.533
0	10	12	74	612.74	22.6376	3.09E-04	3.09E-01	1.64E-02	1.639
0	10	40	72	640.723	27.9832	2.50E-04	2.50E-01	1.33E-02	1.326
0	11	2	67	662.673	21.9496	3.19E-04	3.19E-01	1.69E-02	1.690
0	11	26	79	686.792	24.1198	2.90E-04	2.90E-01	1.54E-02	1.538
0	11	50	27	710.267	23.4751	2.98E-04	2.98E-01	1.58E-02	1.580
0	12	14	2	734.018	23.7509	2.95E-04	2.95E-01	1.56E-02	1.562
0	12	35	51	755.508	21.4896	3.26E-04	3.26E-01	1.73E-02	1.726
0	12	58	63	778.627	23.1189	3.03E-04	3.03E-01	1.60E-02	1.605
0	13	21	6	801.059	22.4326	3.12E-04	3.12E-01	1.65E-02	1.654
0	13	43	5	823.053	21.9938	3.18E-04	3.18E-01	1.69E-02	1.687
0	14	4	61	844.61	21.5566	3.25E-04	3.25E-01	1.72E-02	1.721
0	14	28	14	868.138	23.5277	2.98E-04	2.98E-01	1.58E-02	1.577
0	14	50	54	890.537	22.3992	3.13E-04	3.13E-01	1.66E-02	1.656
0	15	11	17	911.169	20.6319	3.39E-04	3.39E-01	1.80E-02	1.798
0	15	32	5	932.047	20.8782	3.35E-04	3.35E-01	1.78E-02	1.777
0	15	54	25	954.255	22.2078	3.15E-04	3.15E-01	1.67E-02	1.670

Tabla 16. Medición N° 12

t				t	t/tm	Qa		V <sub>tubo</sub>	
horas	min	seg	seg	seg	horas	min	seg	seg	seg
0	0	20	59	20.59	20.59	3.40E-04	3.40E-01	1.80E-02	1.801
0	0	40	23	40.23	19.64	3.56E-04	3.56E-01	1.89E-02	1.889
0	1	2	19	62.19	21.96	3.19E-04	3.19E-01	1.69E-02	1.689
0	1	23	47	83.47	21.28	3.29E-04	3.29E-01	1.74E-02	1.744
0	1	51	20	111.20	27.73	2.52E-04	2.52E-01	1.34E-02	1.338
0	2	14	68	134.68	23.47	2.98E-04	2.98E-01	1.58E-02	1.580
0	2	36	97	156.97	22.30	3.14E-04	3.14E-01	1.66E-02	1.664
0	3	0	61	180.61	23.63	2.96E-04	2.96E-01	1.57E-02	1.570
0	3	21	100	202.00	21.39	3.27E-04	3.27E-01	1.73E-02	1.734
0	3	44	5	224.05	22.05	3.17E-04	3.17E-01	1.68E-02	1.682
0	4	7	70	247.70	23.64	2.96E-04	2.96E-01	1.57E-02	1.569
0	4	29	78	269.78	22.08	3.17E-04	3.17E-01	1.68E-02	1.680
0	4	52	34	292.34	22.56	3.10E-04	3.10E-01	1.64E-02	1.645
0	5	16	35	316.35	24.01	2.92E-04	2.92E-01	1.55E-02	1.545
0	5	38	71	338.71	22.36	3.13E-04	3.13E-01	1.66E-02	1.659
0	6	2	18	362.18	23.47	2.98E-04	2.98E-01	1.58E-02	1.581
0	6	23	93	383.93	21.75	3.22E-04	3.22E-01	1.71E-02	1.706
0	6	46	89	406.89	22.97	3.05E-04	3.05E-01	1.62E-02	1.615
0	7	8	95	428.95	22.05	3.17E-04	3.17E-01	1.68E-02	1.682
0	7	31	26	451.26	22.31	3.14E-04	3.14E-01	1.66E-02	1.663
0	7	53	56	473.56	22.30	3.14E-04	3.14E-01	1.66E-02	1.663
0	8	16	51	496.51	22.95	3.05E-04	3.05E-01	1.62E-02	1.616
0	8	38	9	518.09	21.59	3.24E-04	3.24E-01	1.72E-02	1.719
0	8	59	94	539.94	21.84	3.20E-04	3.20E-01	1.70E-02	1.698
0	9	24	36	564.36	24.42	2.87E-04	2.87E-01	1.52E-02	1.519
0	9	51	14	591.14	26.77	2.61E-04	2.61E-01	1.39E-02	1.386
0	10	13	26	613.26	22.13	3.16E-04	3.16E-01	1.68E-02	1.677
0	10	41	48	641.48	28.22	2.48E-04	2.48E-01	1.31E-02	1.314
0	11	3	3	663.03	21.55	3.25E-04	3.25E-01	1.72E-02	1.722
0	11	26	74	686.74	23.71	2.95E-04	2.95E-01	1.56E-02	1.564
0	11	50	4	710.04	23.30	3.00E-04	3.00E-01	1.59E-02	1.592
0	12	13	34	733.34	23.30	3.00E-04	3.00E-01	1.59E-02	1.592
0	12	32	38	752.38	19.04	3.68E-04	3.68E-01	1.95E-02	1.948
0	12	55	8	775.08	22.70	3.08E-04	3.08E-01	1.63E-02	1.634
0	13	17	0	797.00	21.92	3.19E-04	3.19E-01	1.69E-02	1.693
0	13	38	71	818.71	21.71	3.22E-04	3.22E-01	1.71E-02	1.709
0	14	0	83	840.83	22.12	3.16E-04	3.16E-01	1.68E-02	1.677
0	14	24	13	864.13	23.30	3.00E-04	3.00E-01	1.59E-02	1.592
0	14	45	46	885.46	21.33	3.28E-04	3.28E-01	1.74E-02	1.739
0	15	5	40	905.40	19.94	3.51E-04	3.51E-01	1.86E-02	1.861
0	15	27	79	927.79	22.39	3.13E-04	3.13E-01	1.66E-02	1.657
0	15	49	36	949.36	21.57	3.24E-04	3.24E-01	1.72E-02	1.719

Tabla 17. Medición N° 13

t				t	t/tm	Qa		V <sub>tubo</sub>	
horas	min	seg	seg	seg	horas	min	seg	seg	seg
0	0	20	25	20.248	20.248	3.46E-04	3.46E-01	1.83E-02	1.832
0	0	39	13	39.1282	18.8802	3.71E-04	3.71E-01	1.96E-02	1.965
0	1	0	57	60.5671	21.4389	3.27E-04	3.27E-01	1.73E-02	1.730
0	1	21	22	81.2168	20.6497	3.39E-04	3.39E-01	1.80E-02	1.797
0	1	46	39	106.389	25.1718	2.78E-04	2.78E-01	1.47E-02	1.474
0	2	9	73	129.735	23.3463	3.00E-04	3.00E-01	1.59E-02	1.589
0	2	32	28	152.283	22.5484	3.10E-04	3.10E-01	1.65E-02	1.645
0	2	55	72	175.719	23.4353	2.99E-04	2.99E-01	1.58E-02	1.583
0	3	16	47	196.465	20.7467	3.37E-04	3.37E-01	1.79E-02	1.788
0	3	38	9	218.093	21.6278	3.24E-04	3.24E-01	1.72E-02	1.715
0	4	1	20	241.203	23.1104	3.03E-04	3.03E-01	1.61E-02	1.605
0	4	22	69	262.688	21.4847	3.26E-04	3.26E-01	1.73E-02	1.727
0	4	44	79	284.788	22.0997	3.17E-04	3.17E-01	1.68E-02	1.679
0	5	8	47	308.474	23.6858	2.96E-04	2.96E-01	1.57E-02	1.566
0	5	30	9	330.086	21.6126	3.24E-04	3.24E-01	1.72E-02	1.716
0	5	53	30	353.304	23.2173	3.01E-04	3.01E-01	1.60E-02	1.598
0	6	14	51	374.509	21.2051	3.30E-04	3.30E-01	1.75E-02	1.749
0	6	36	91	396.913	22.4046	3.12E-04	3.12E-01	1.66E-02	1.656
0	6	58	44	418.443	21.5301	3.25E-04	3.25E-01	1.72E-02	1.723
0	7	20	19	440.194	21.7501	3.22E-04	3.22E-01	1.71E-02	1.706
0	7	41	64	461.64	21.4463	3.26E-04	3.26E-01	1.73E-02	1.730
0	8	4	32	484.322	22.6817	3.09E-04	3.09E-01	1.64E-02	1.636
0	8	25	18	505.175	20.8536	3.36E-04	3.36E-01	1.78E-02	1.779
0	8	46	34	526.336	21.1608	3.31E-04	3.31E-01	1.75E-02	1.753
0	9	10	50	550.501	24.1645	2.90E-04	2.90E-01	1.54E-02	1.535
0	9	33	42	573.417	22.9168	3.05E-04	3.05E-01	1.62E-02	1.619
0	9	54	93	594.934	21.5163	3.25E-04	3.25E-01	1.72E-02	1.724
0	10	23	46	623.462	28.528	2.45E-04	2.45E-01	1.30E-02	1.300
0	10	44	52	644.524	21.0625	3.32E-04	3.32E-01	1.76E-02	1.761
0	11	5	80	665.805	21.2807	3.29E-04	3.29E-01	1.74E-02	1.743
0	11	27	66	687.656	21.8514	3.20E-04	3.20E-01	1.70E-02	1.698
0	11	50	41	710.413	22.757	3.08E-04	3.08E-01	1.63E-02	1.630
0	12	8	66	728.657	18.244	3.84E-04	3.84E-01	2.03E-02	2.033
0	12	30	37	750.375	21.7176	3.22E-04	3.22E-01	1.71E-02	1.708
0	12	51	68	771.682	21.3076	3.29E-04	3.29E-01	1.74E-02	1.741
0	13	13	5	793.047	21.3644	3.28E-04	3.28E-01	1.74E-02	1.736
0	13	35	89	815.893	22.846	3.06E-04	3.06E-01	1.62E-02	1.624
0	13	56	98	836.979	21.086	3.32E-04	3.32E-01	1.76E-02	1.759
0	14	17	70	857.702	20.7227	3.38E-04	3.38E-01	1.79E-02	1.790
0	14	36	83	876.834	19.1325	3.66E-04	3.66E-01	1.94E-02	1.939
0	14	59	51	899.513	22.6792	3.09E-04	3.09E-01	1.64E-02	1.636
0	15	20	35	920.346	20.8328	3.36E-04	3.36E-01	1.78E-02	1.781

Tabla 18. Medición N° 14

t				t	t/tm	Qa		V <sub>tubo</sub>	
horas	min	seg	seg	seg	horas	min	seg	seg	seg
0	0	19	15	19.15	19.15	3.66E-04	3.66E-01	1.94E-02	1.937
0	0	37	33	37.33	18.18	3.85E-04	3.85E-01	2.04E-02	2.041
0	0	58	27	58.27	20.94	3.34E-04	3.34E-01	1.77E-02	1.772
0	1	18	33	78.33	20.06	3.49E-04	3.49E-01	1.85E-02	1.849
0	1	46	40	106.4	28.07	2.49E-04	2.49E-01	1.32E-02	1.322
0	2	9	62	129.62	23.22	3.01E-04	3.01E-01	1.60E-02	1.598
0	2	30	77	150.77	21.15	3.31E-04	3.31E-01	1.75E-02	1.754
0	2	54	1	174.01	23.24	3.01E-04	3.01E-01	1.60E-02	1.596
0	3	14	15	194.15	20.14	3.48E-04	3.48E-01	1.84E-02	1.842
0	3	35	37	215.37	21.22	3.30E-04	3.30E-01	1.75E-02	1.748
0	3	57	97	237.97	22.6	3.10E-04	3.10E-01	1.64E-02	1.641
0	4	19	27	259.27	21.3	3.29E-04	3.29E-01	1.74E-02	1.742
0	4	40	93	280.93	21.66	3.23E-04	3.23E-01	1.71E-02	1.713
0	5	4	30	304.3	23.37	3.00E-04	3.00E-01	1.59E-02	1.587
0	5	25	21	325.21	20.91	3.35E-04	3.35E-01	1.77E-02	1.774
0	5	48	18	348.18	22.97	3.05E-04	3.05E-01	1.62E-02	1.615
0	6	8	87	368.87	20.69	3.38E-04	3.38E-01	1.79E-02	1.793
0	6	30	74	390.74	21.87	3.20E-04	3.20E-01	1.70E-02	1.696
0	6	51	77	411.77	21.03	3.33E-04	3.33E-01	1.76E-02	1.764
0	7	12	99	432.99	21.22	3.30E-04	3.30E-01	1.75E-02	1.748
0	7	34	50	454.5	21.51	3.25E-04	3.25E-01	1.72E-02	1.725
0	7	56	92	476.92	22.42	3.12E-04	3.12E-01	1.65E-02	1.655
0	8	17	9	497.09	20.17	3.47E-04	3.47E-01	1.84E-02	1.839
0	8	37	61	517.61	20.52	3.41E-04	3.41E-01	1.81E-02	1.808
0	9	1	52	541.52	23.91	2.93E-04	2.93E-01	1.55E-02	1.552
0	9	29	58	569.58	28.06	2.49E-04	2.49E-01	1.32E-02	1.322
0	9	50	52	590.52	20.94	3.34E-04	3.34E-01	1.77E-02	1.772
0	10	19	36	619.36	28.84	2.43E-04	2.43E-01	1.29E-02	1.286
0	10	39	96	639.96	20.6	3.40E-04	3.40E-01	1.80E-02	1.801
0	11	2	72	662.72	22.76	3.08E-04	3.08E-01	1.63E-02	1.630
0	11	25	58	685.58	22.86	3.06E-04	3.06E-01	1.62E-02	1.623
0	11	47	82	707.82	22.24	3.15E-04	3.15E-01	1.67E-02	1.668
0	12	5	33	725.33	17.51	4.00E-04	4.00E-01	2.12E-02	2.119
0	12	27	5	747.05	21.72	3.22E-04	3.22E-01	1.71E-02	1.708
0	12	47	78	767.78	20.73	3.38E-04	3.38E-01	1.79E-02	1.790
0	13	8	81	788.81	21.03	3.33E-04	3.33E-01	1.76E-02	1.764
0	13	29	50	809.5	20.69	3.38E-04	3.38E-01	1.79E-02	1.793
0	13	52	26	832.26	22.76	3.08E-04	3.08E-01	1.63E-02	1.630
0	14	12	41	852.41	20.15	3.47E-04	3.47E-01	1.84E-02	1.841
0	14	30	80	870.8	18.39	3.81E-04	3.81E-01	2.02E-02	2.017
0	14	52	10	892.1	21.3	3.29E-04	3.29E-01	1.74E-02	1.742
0	15	12	24	912.24	20.14	3.48E-04	3.48E-01	1.84E-02	1.842

Tabla 19. Medición N° 15

t				t	t/tm	Qa		V <sub>tubo</sub>	
horas	min	seg	seg	seg	horas	min	seg	seg	seg
0	0	17	87	17.87	17.87	3.92E-04	3.92E-01	2.08E-02	2.076
0	0	37	6	37.06	19.19	3.65E-04	3.65E-01	1.93E-02	1.933
0	0	56	40	56.4	19.34	3.62E-04	3.62E-01	1.92E-02	1.918
0	1	16	27	76.27	19.87	3.52E-04	3.52E-01	1.87E-02	1.867
0	1	35	18	95.18	18.91	3.70E-04	3.70E-01	1.96E-02	1.962
0	1	54	37	114.37	19.19	3.65E-04	3.65E-01	1.93E-02	1.933
0	2	13	71	133.71	19.34	3.62E-04	3.62E-01	1.92E-02	1.918
0	2	33	3	153.03	19.32	3.62E-04	3.62E-01	1.92E-02	1.920
0	2	51	40	171.4	18.37	3.81E-04	3.81E-01	2.02E-02	2.019
0	3	12	12	192.12	20.72	3.38E-04	3.38E-01	1.79E-02	1.790
0	3	31	27	211.27	19.15	3.66E-04	3.66E-01	1.94E-02	1.937
0	3	49	97	229.97	18.7	3.74E-04	3.74E-01	1.98E-02	1.984
0	4	10	9	250.09	20.12	3.48E-04	3.48E-01	1.84E-02	1.844
0	4	28	43	268.43	18.34	3.82E-04	3.82E-01	2.02E-02	2.023
0	4	48	97	288.97	20.54	3.41E-04	3.41E-01	1.81E-02	1.806
0	5	8	3	308.03	19.06	3.67E-04	3.67E-01	1.95E-02	1.946
0	5	27	27	327.27	19.24	3.64E-04	3.64E-01	1.93E-02	1.928
0	5	46	87	346.87	19.6	3.57E-04	3.57E-01	1.89E-02	1.893
0	6	7	47	367.47	20.6	3.40E-04	3.40E-01	1.80E-02	1.801
0	6	26	85	386.85	19.38	3.61E-04	3.61E-01	1.91E-02	1.914
0	6	44	41	404.41	17.56	3.99E-04	3.99E-01	2.11E-02	2.113
0	7	3	28	423.28	18.87	3.71E-04	3.71E-01	1.97E-02	1.966
0	7	24	15	444.15	20.87	3.35E-04	3.35E-01	1.78E-02	1.778
0	7	43	47	463.47	19.32	3.62E-04	3.62E-01	1.92E-02	1.920
0	8	2	31	482.31	18.84	3.72E-04	3.72E-01	1.97E-02	1.969
0	8	23	84	503.84	21.53	3.25E-04	3.25E-01	1.72E-02	1.723
0	8	43	56	523.56	19.72	3.55E-04	3.55E-01	1.88E-02	1.881
0	9	3	26	543.26	19.7	3.55E-04	3.55E-01	1.88E-02	1.883
0	9	21	93	561.93	18.67	3.75E-04	3.75E-01	1.99E-02	1.987
0	9	41	27	581.27	19.34	3.62E-04	3.62E-01	1.92E-02	1.918
0	10	0	21	600.21	18.94	3.70E-04	3.70E-01	1.96E-02	1.959
0	10	20	10	620.1	19.89	3.52E-04	3.52E-01	1.87E-02	1.865
0	10	40	19	640.19	20.09	3.48E-04	3.48E-01	1.85E-02	1.847
0	11	0	3	660.03	19.84	3.53E-04	3.53E-01	1.87E-02	1.870
0	11	18	15	678.15	18.12	3.86E-04	3.86E-01	2.05E-02	2.047
0	11	38	18	698.18	20.03	3.49E-04	3.49E-01	1.85E-02	1.852
0	11	55	79	715.79	17.61	3.98E-04	3.98E-01	2.11E-02	2.107
0	12	16	12	736.12	20.33	3.44E-04	3.44E-01	1.82E-02	1.825
0	12	34	83	754.83	18.71	3.74E-04	3.74E-01	1.98E-02	1.983
0	12	54	85	774.85	20.02	3.50E-04	3.50E-01	1.85E-02	1.853
0	13	14	96	794.96	20.11	3.48E-04	3.48E-01	1.84E-02	1.845
0	13	34	25	814.25	19.29	3.63E-04	3.63E-01	1.92E-02	1.923

## 4.2 ANALISIS DE DATOS

El proceso de experimentación se realizó para diferentes caudales con el fin de obtener expansiones para diferentes velocidades de lavado para luego aplicar el modelo presentado.

### 4.2.1 VELOCIDADES DE SEDIMENTACION

En cuanto a la velocidad de sedimentación, se calculó matemáticamente mediante el Método Numérico iterativo usando las ecuaciones 1-11, 1-13 y 1-14.

Las cuales arrojaron los siguientes resultados, para una temperatura de 26 °C, el valor de la viscosidad cinemática del agua  $\nu=0.00877 \text{ cm}^2/\text{sg}$

Tabla 20. Determinación del porcentaje de error respecto a las velocidades de sedimentación reales vs calculadas

N° Tamiz	Diámetro mm	$X_i$ %	Vs calculado cm/sg	Vs experimental cm/sg	% Error
30	1.00	86.55	17.88	12.43	43.85
50	0.7	13.13	13.18	10.72	22.95
100	0.50	0.13	9.46	8.32	13.70
140	0.35	0.080	6.28	6.17	1.78

Como se puede observar, el mayor porcentaje de error (43.85%) se presenta en las partículas retenidas en el tamiz N° 30 (86.55% retenido). Teniendo en cuenta que no se uso tecnología de punta para las mediciones de estas velocidades; el porcentaje de error se puede considerar dentro de un rango aceptable, ya que éste disminuye con el diámetro nominal de las partículas.

Para garantizar la confianza en las mediciones realizadas, se analizaron los caudales calculados ajustándolos a una distribución normal con unos límites de

confianza del 95 %; para esto se hizo uso del programa para series de tiempo SPELL-stat v 1.7.5.46 Beta; el cual arrojó los resultados mostrados a continuación.

Figura 6. Serie de tiempo. Medición N° 1.

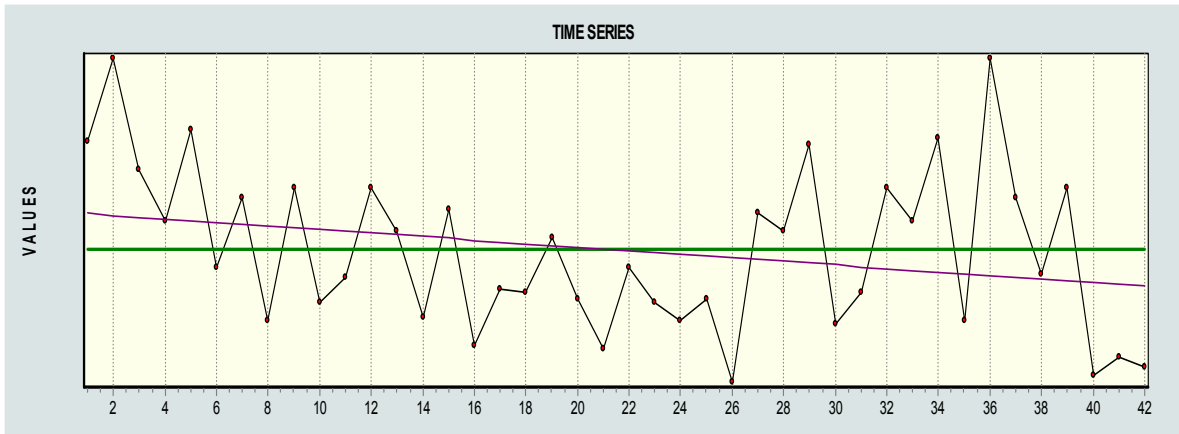


Figura 7. Correlograma. Medición N° 1.

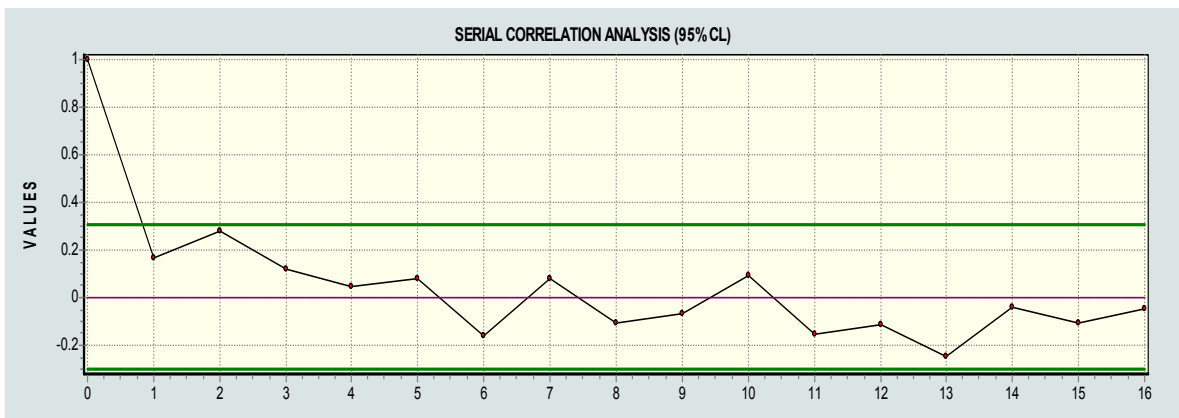


Figura 8. Ajuste a una función normal. Medición N° 1.

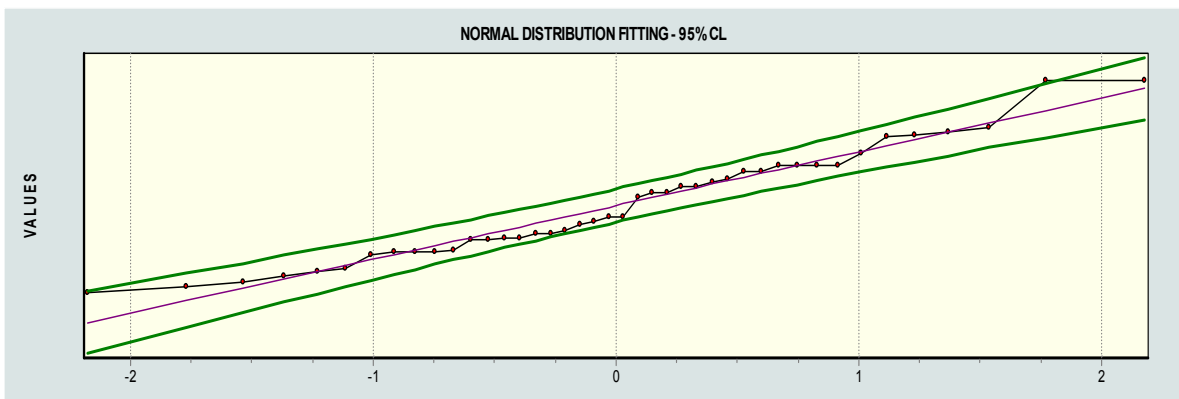


Figura 9. Serie de tiempo. Medición N° 2.

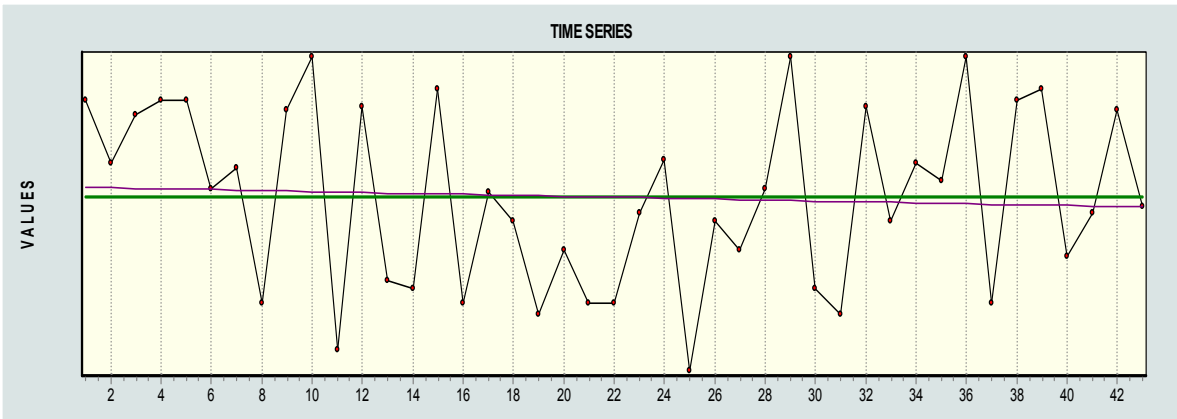


Figura 10. Correlograma. Medición N° 2.

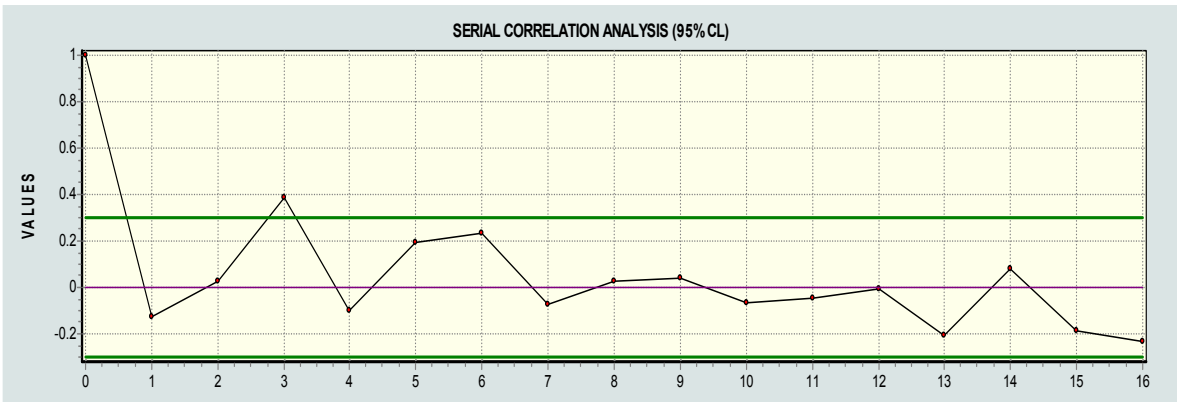


Figura 11. Ajuste a una función normal Medición N° 2.

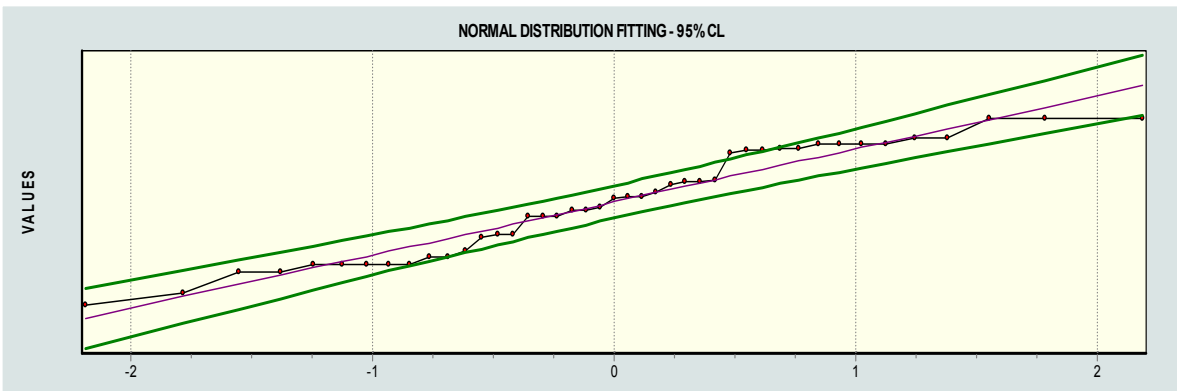


Figura 12. Serie de tiempo. Medición N° 3

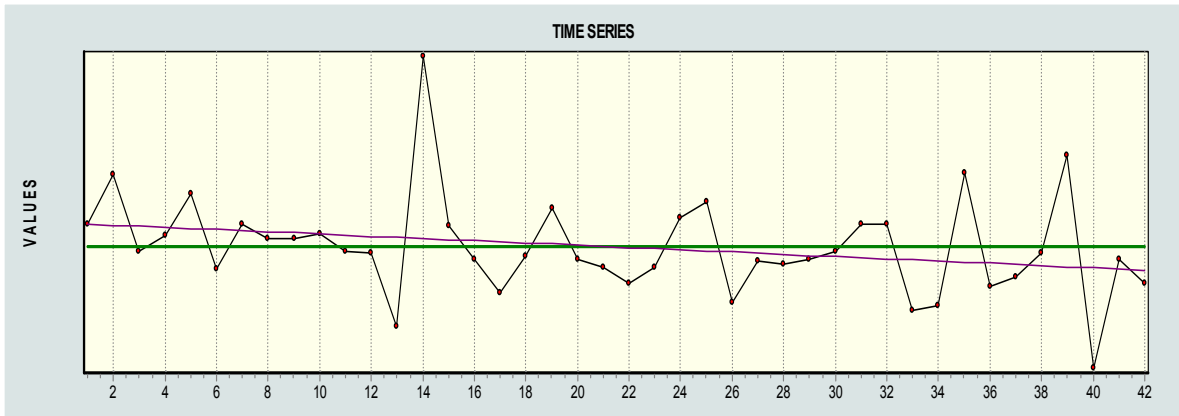


Figura 13. Correlograma. Medición N° 3.

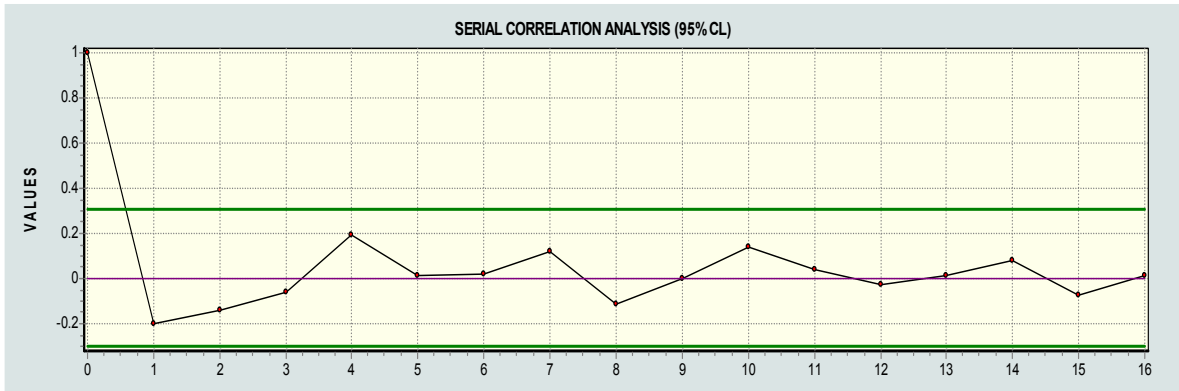


Figura 14. Ajuste a una función normal Medición N° 3.

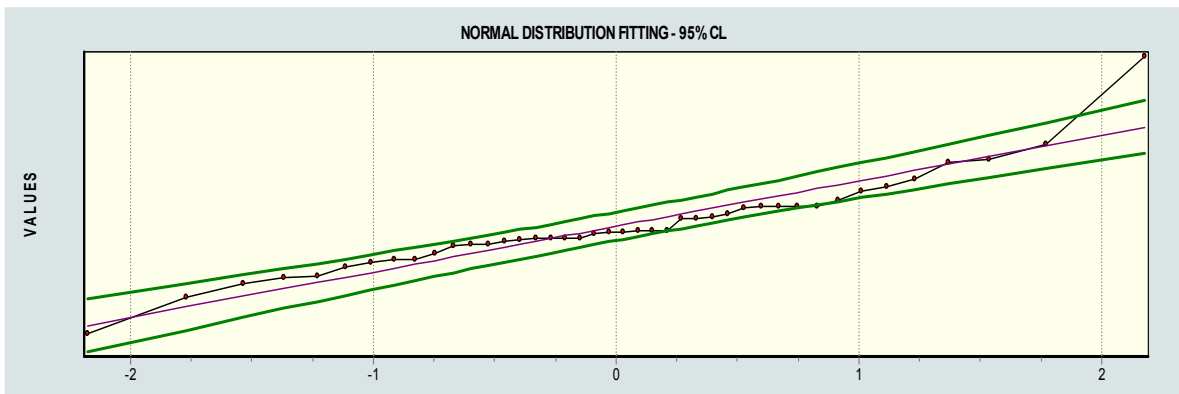


Figura 15. Serie de tiempo. Medición N° 4

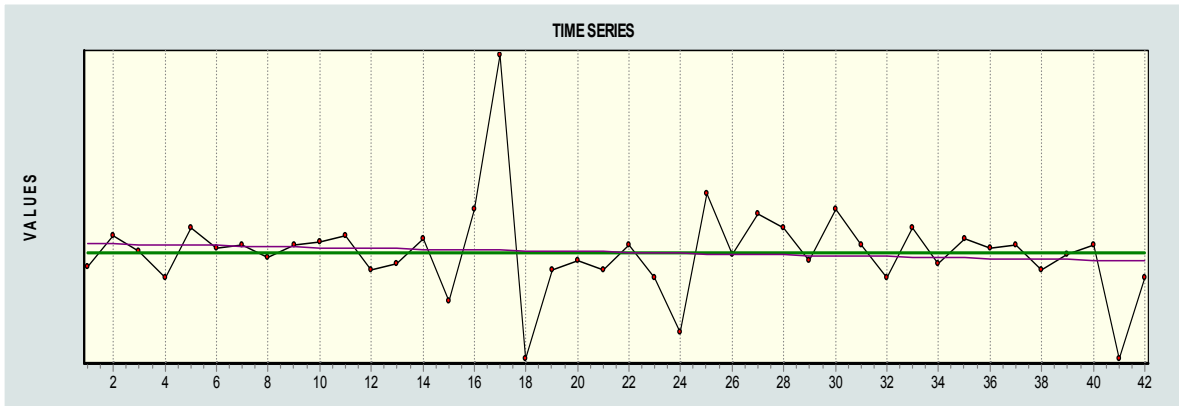


Figura 16. Correlograma. Medición N° 4.

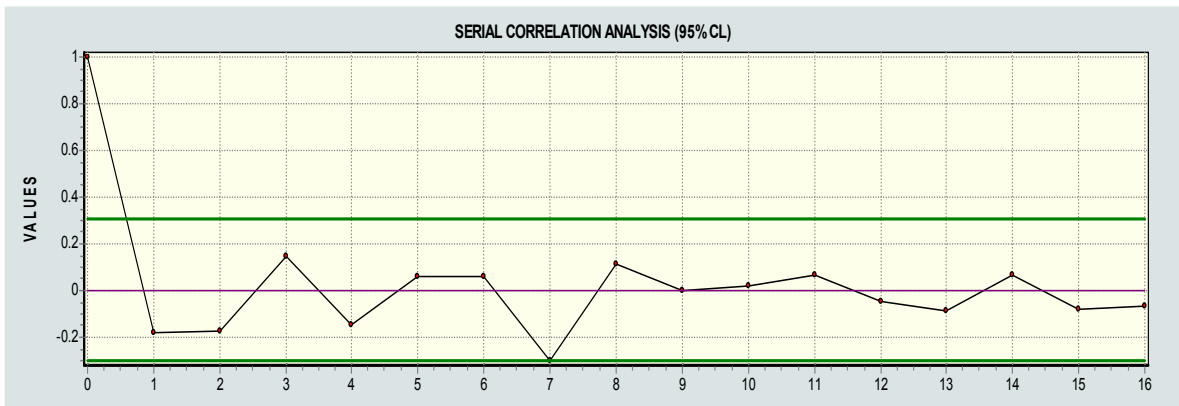


Figura 17. Ajuste a una función normal Medición N° 4.

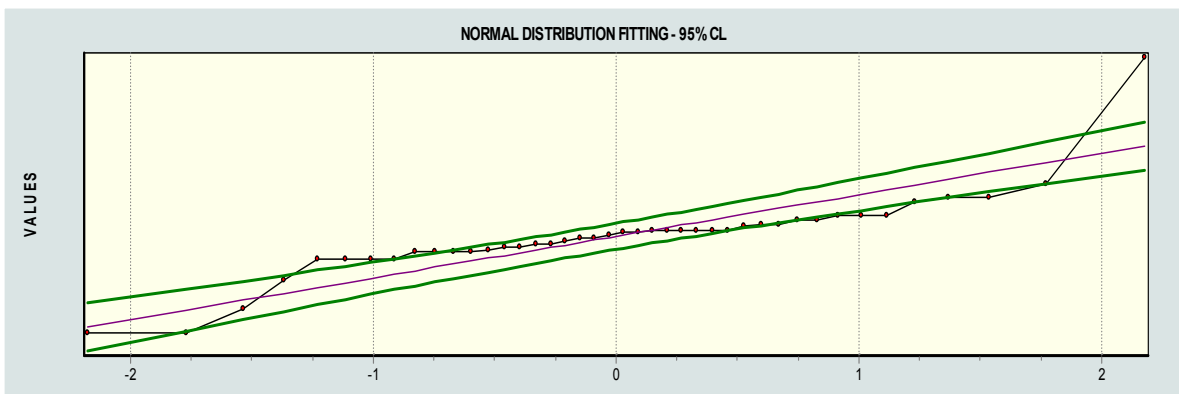


Figura 18. Serie de tiempo. Medición N° 5

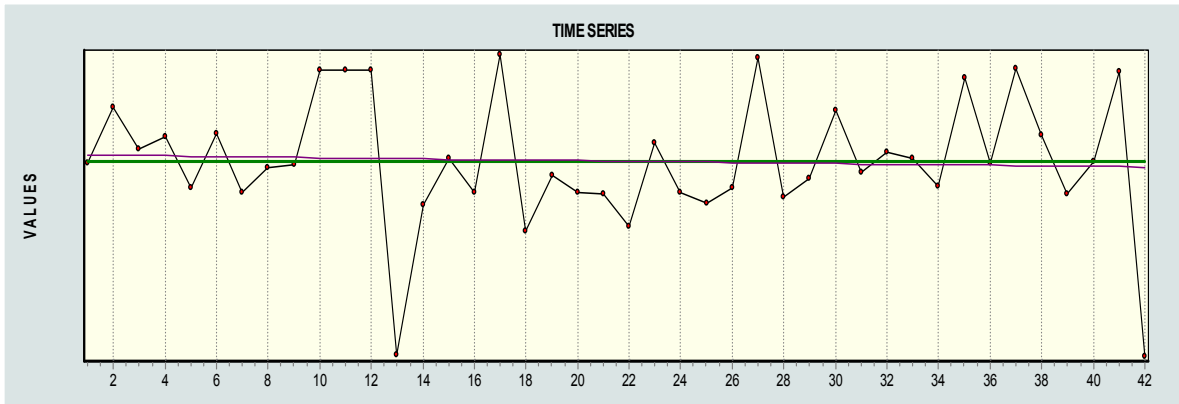


Figura 19. Correlograma. Medición N° 5.

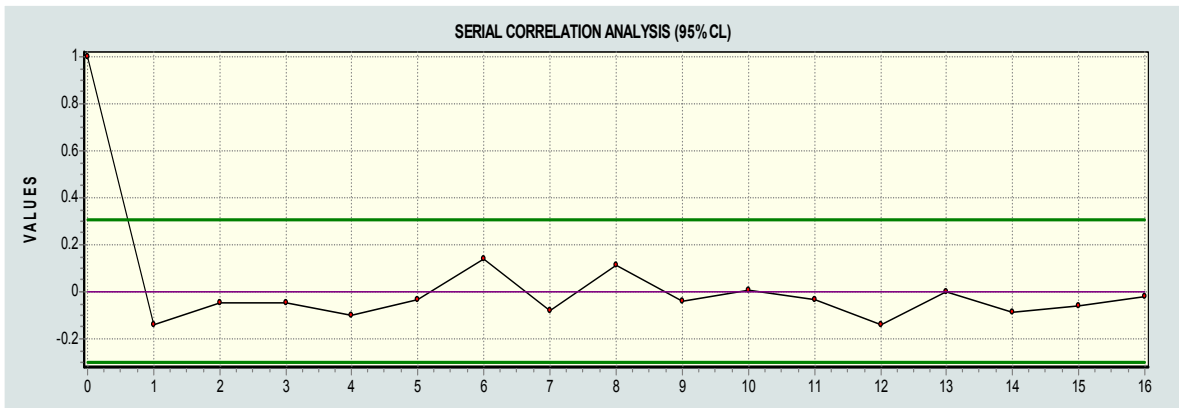


Figura 20. Ajuste a una función normal Medición N° 5.

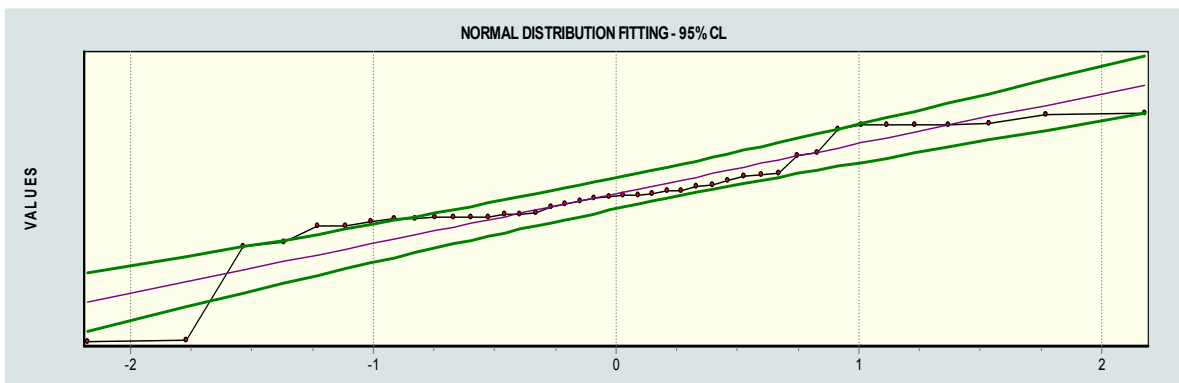


Figura 21. Serie de tiempo. Medición N° 6

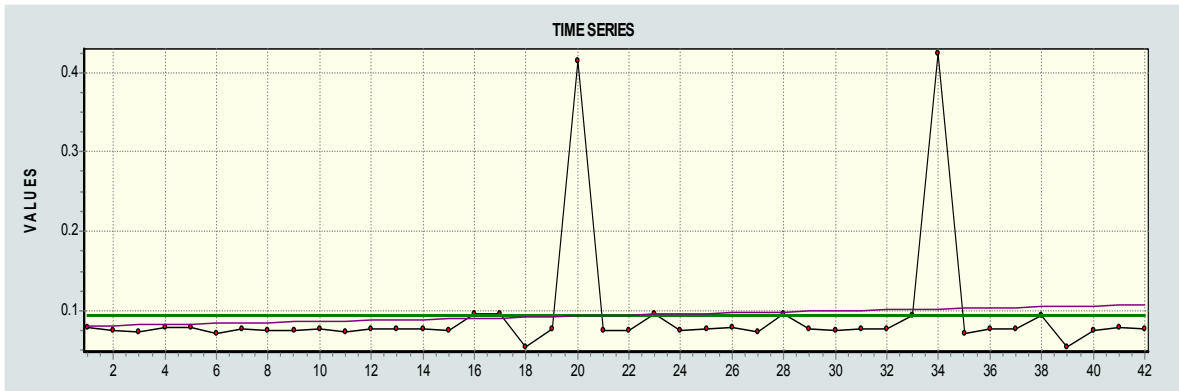


Figura 22. Correlograma. Medición N° 6

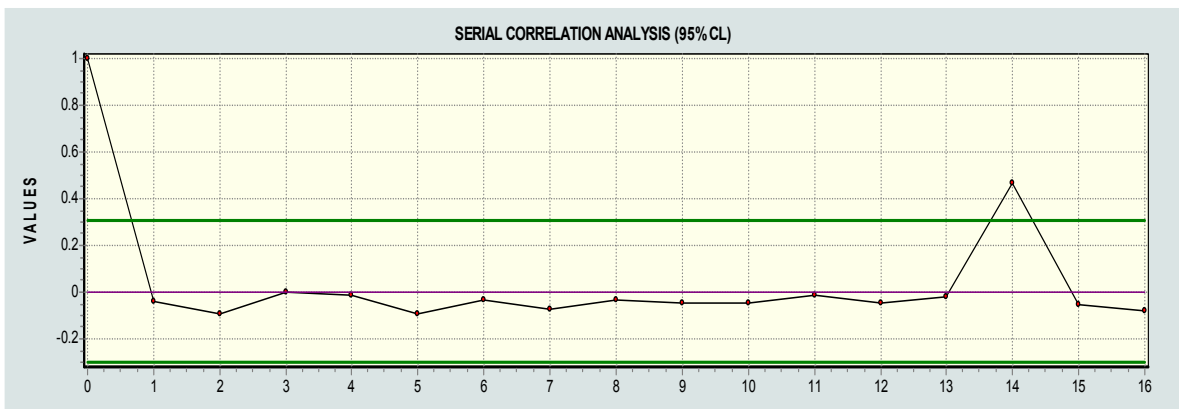


Figura 23. Ajuste a una función normal Medición N° 6

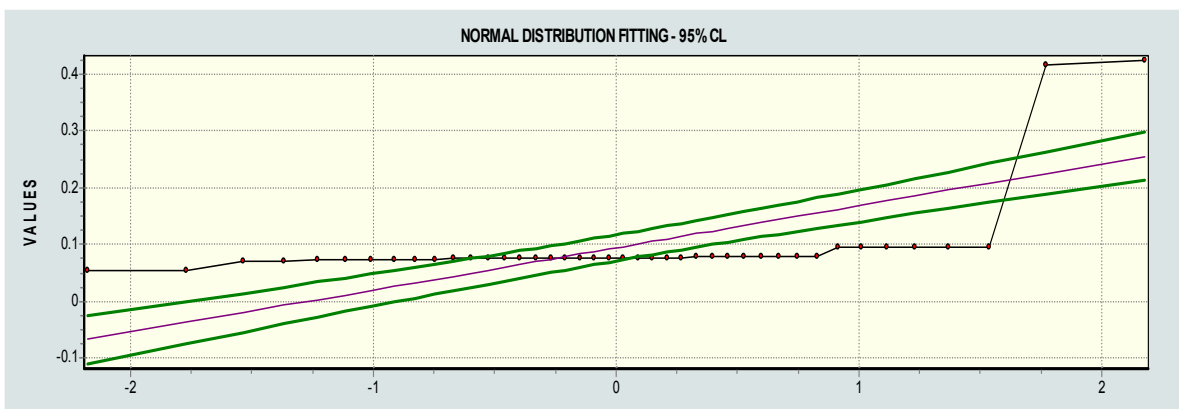


Figura 24. Serie de tiempo. Medición N° 7

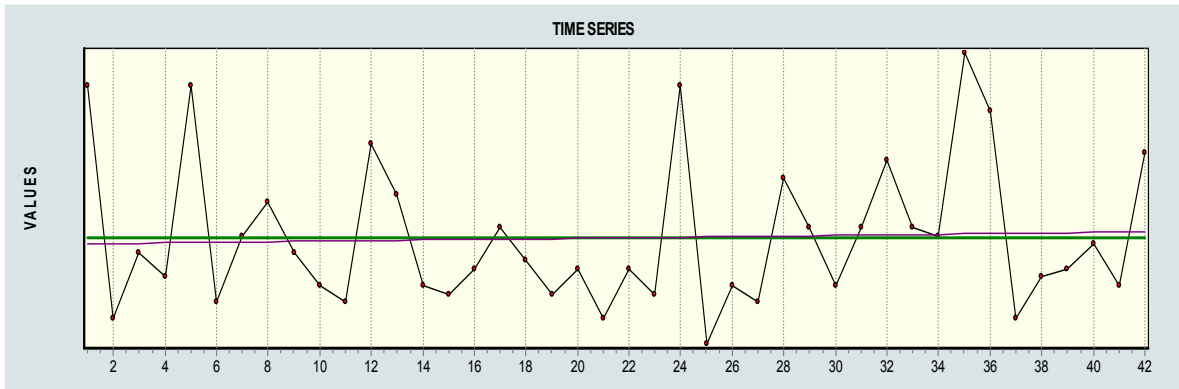


Figura 25. Correlograma. Medición N° 7

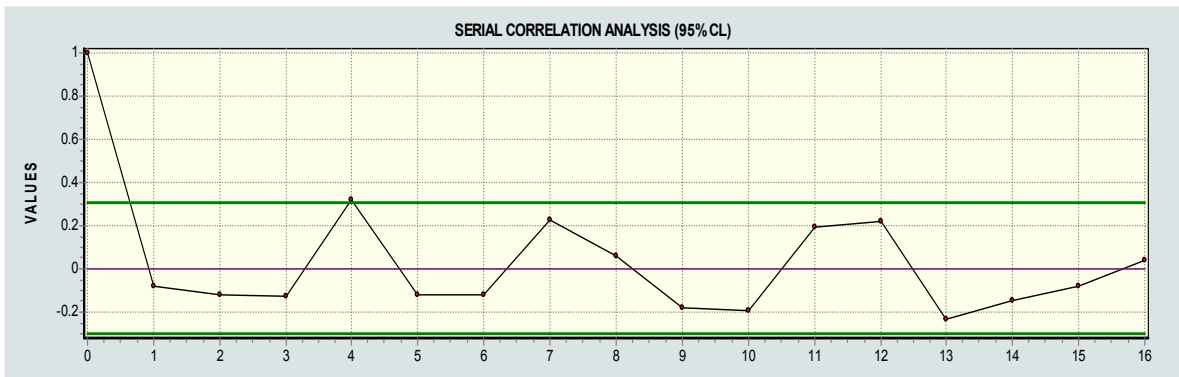


Figura 26. Ajuste a una función normal. Medición N° 7

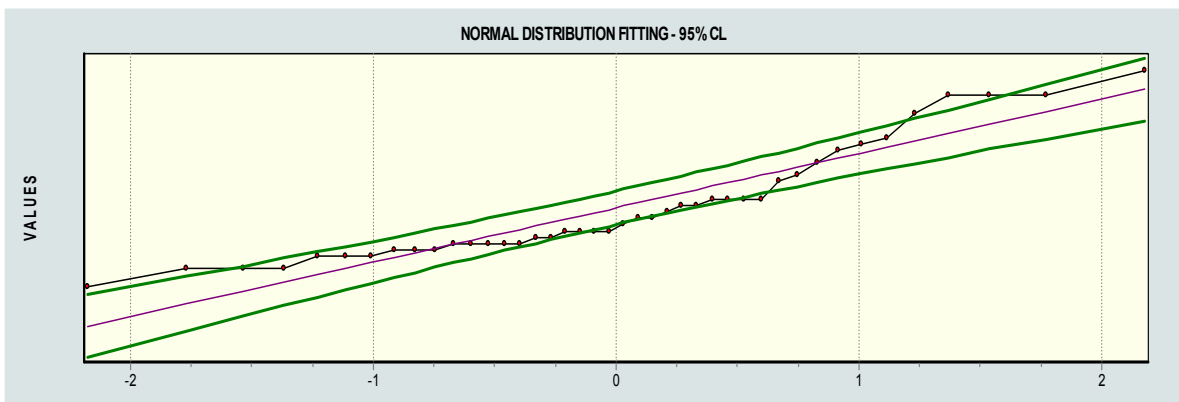


Figura 27. Serie de tiempo. Medición N° 8

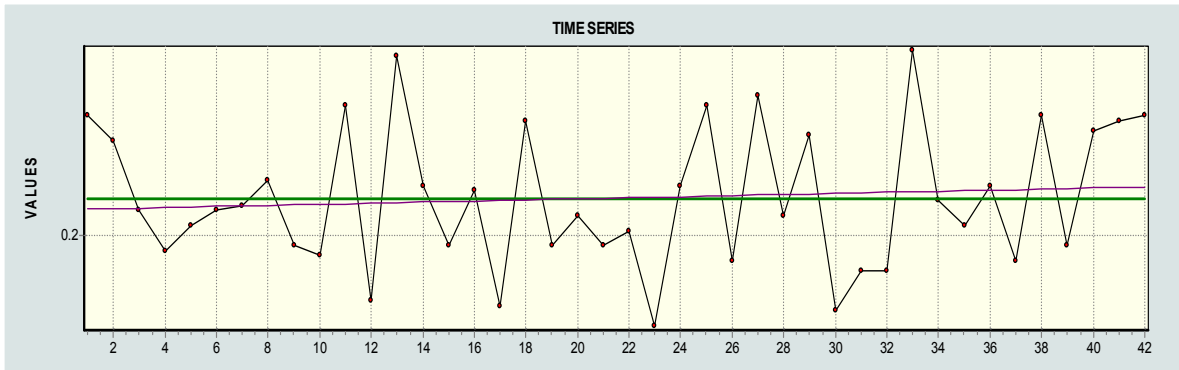


Figura 28. Correlograma. Medición N° 8

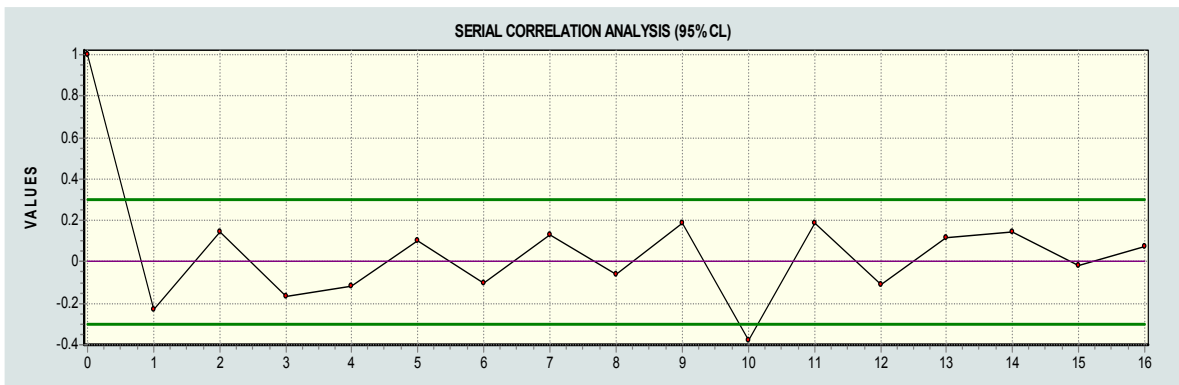


Figura 29. Ajuste a una función normal. Medición N° 8

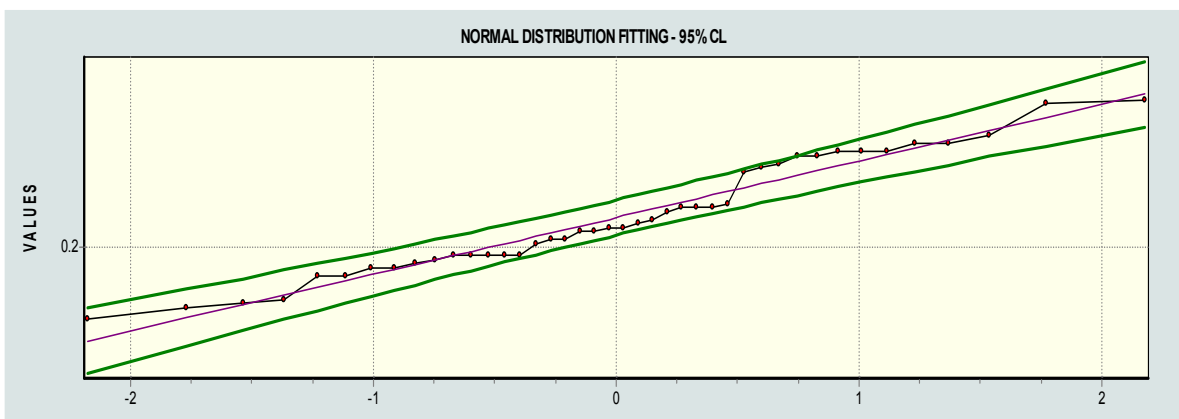


Figura 30. Serie de tiempo. Medición N° 9

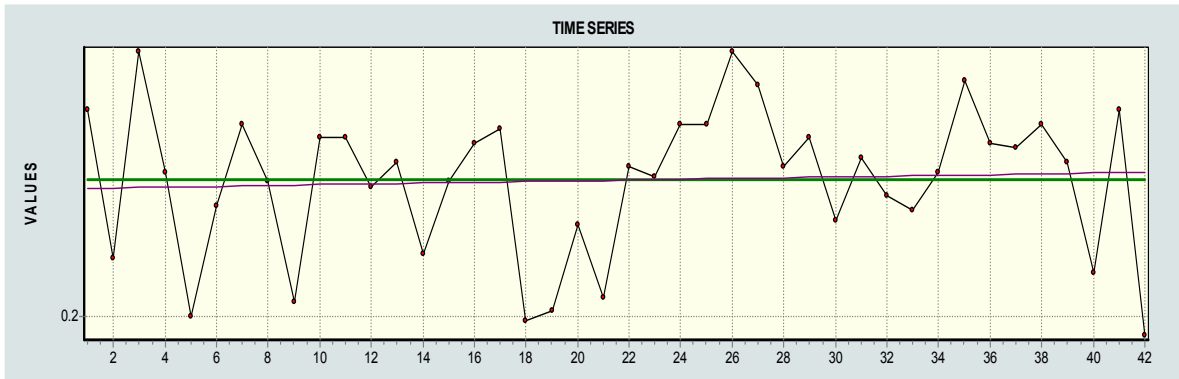


Figura 31. Correlograma. Medición N° 9

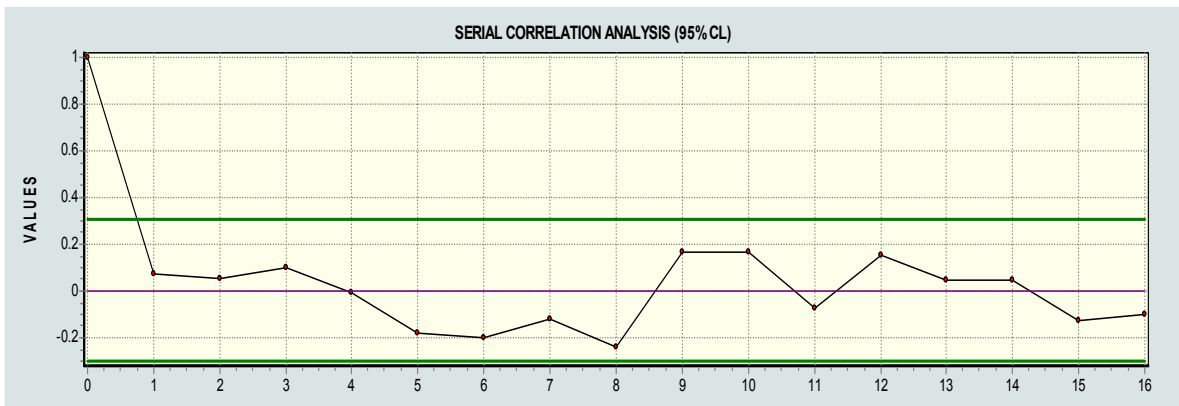


Figura 32. Ajuste a una función normal. Medición N° 9

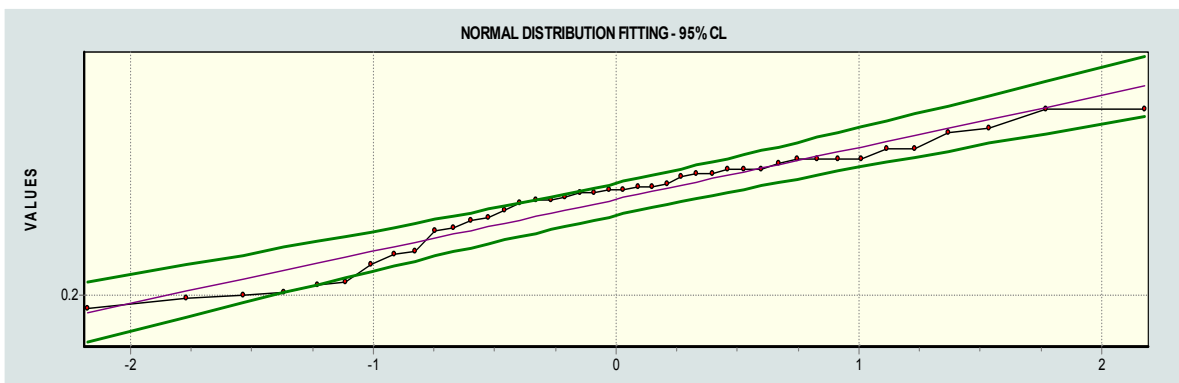


Figura 33. Serie de tiempo. Medición N° 10

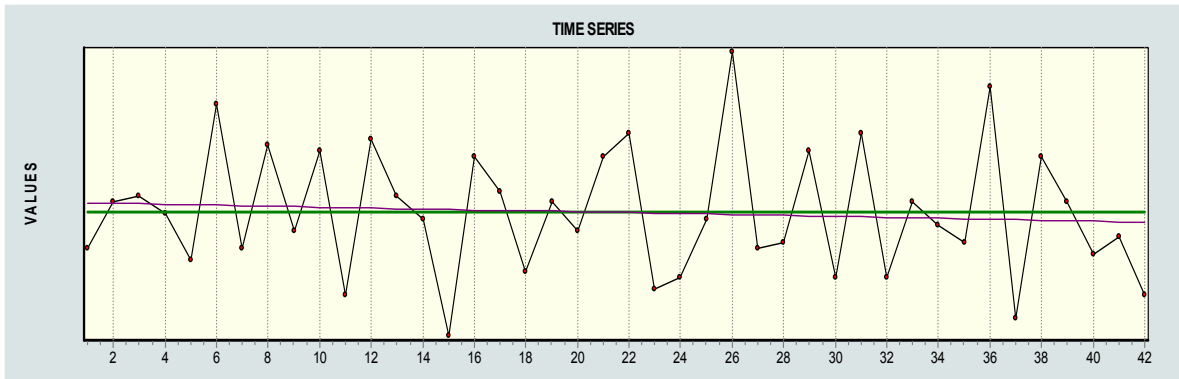


Figura 34. Correlograma. Medición N° 10

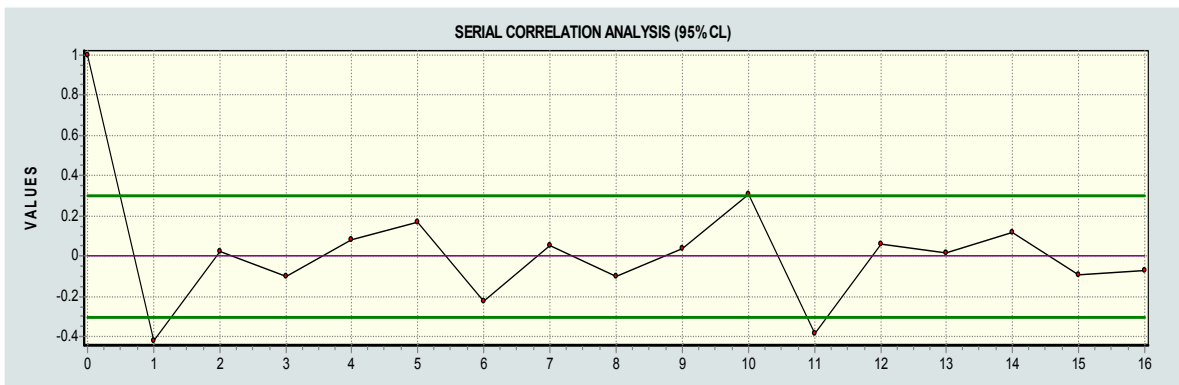


Figura 35. Ajuste a una función normal. Medición N° 10

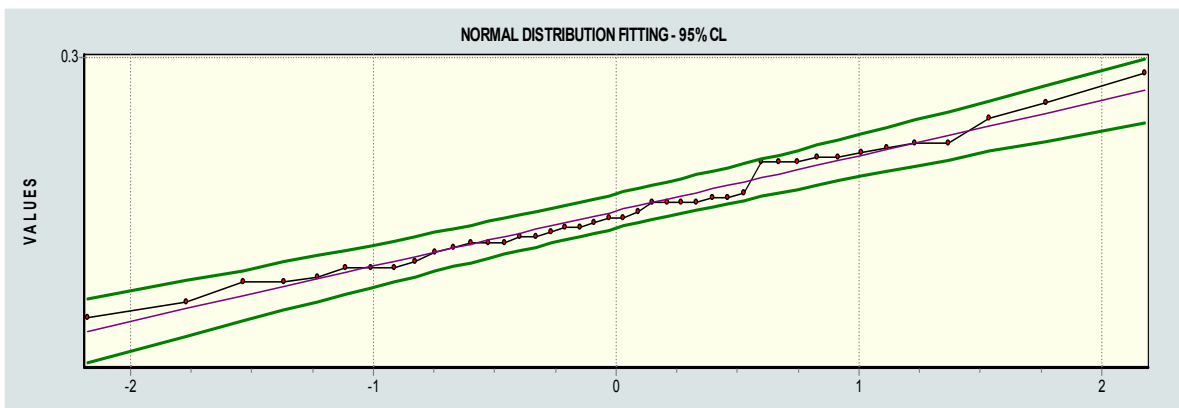


Figura 36. Serie de tiempo. Medición N° 11

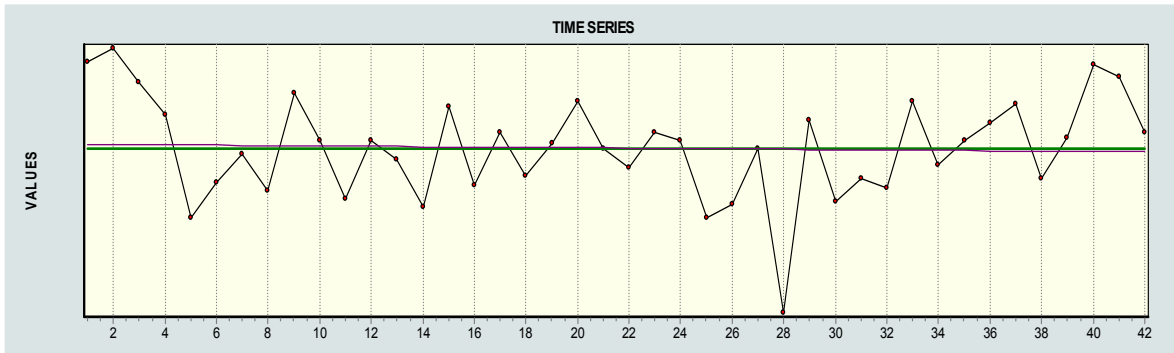


Figura 37. Correlograma. Medición N° 11.

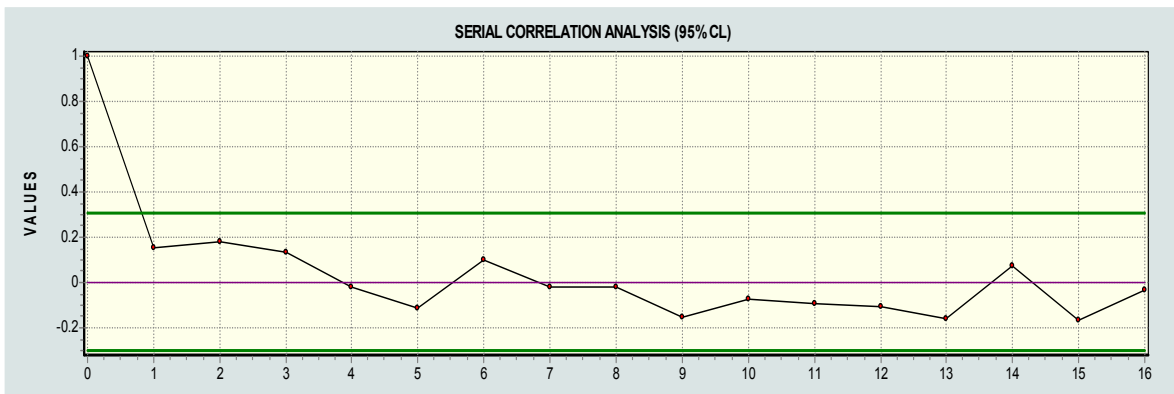


Figura 38. Ajuste a una función normal. Medición N° 11

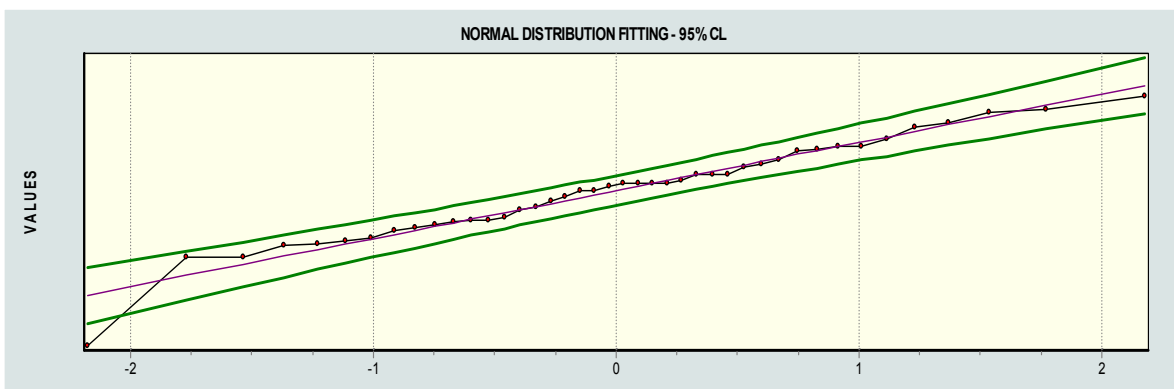


Figura 39. Serie de tiempo. Medición N° .12

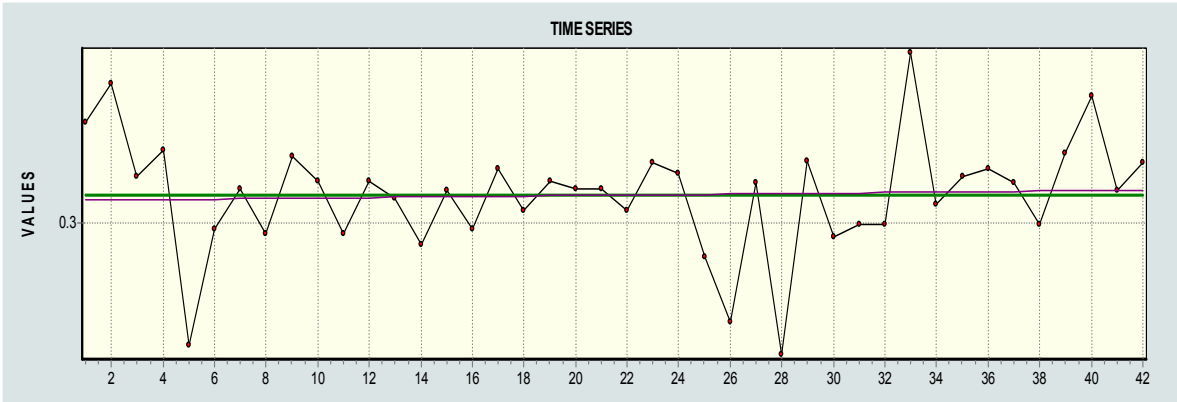


Figura 40. Correlograma. Medición N° 12.

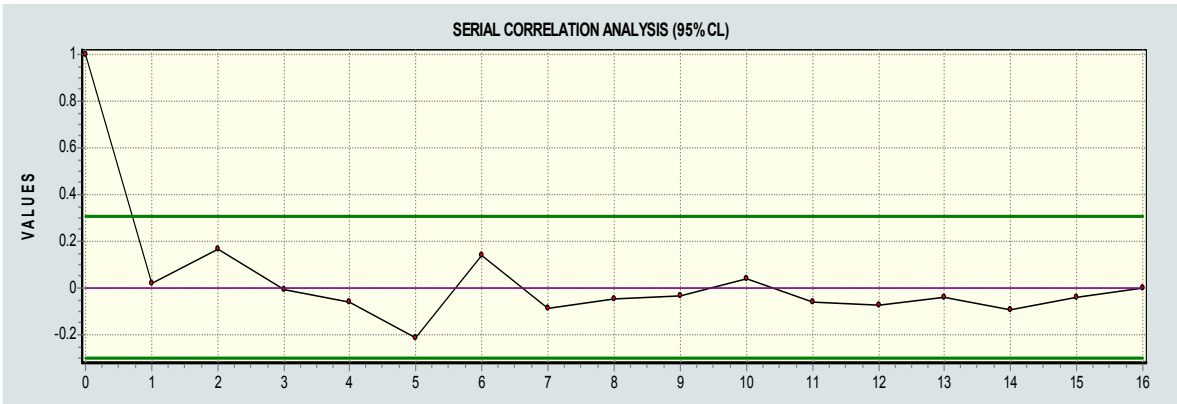


Figura 41. Ajuste a una función normal. Medición N° 12.

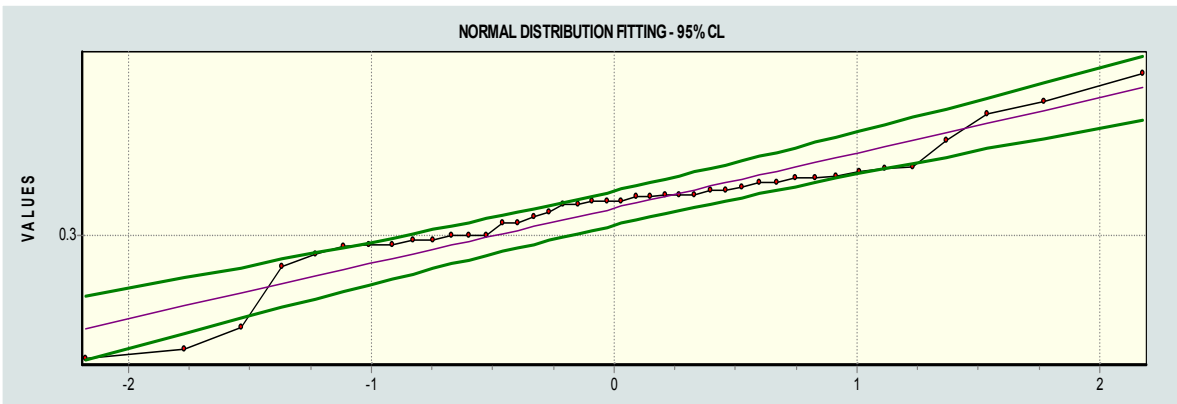


Figura 42. Serie de tiempo. Medición N° 13

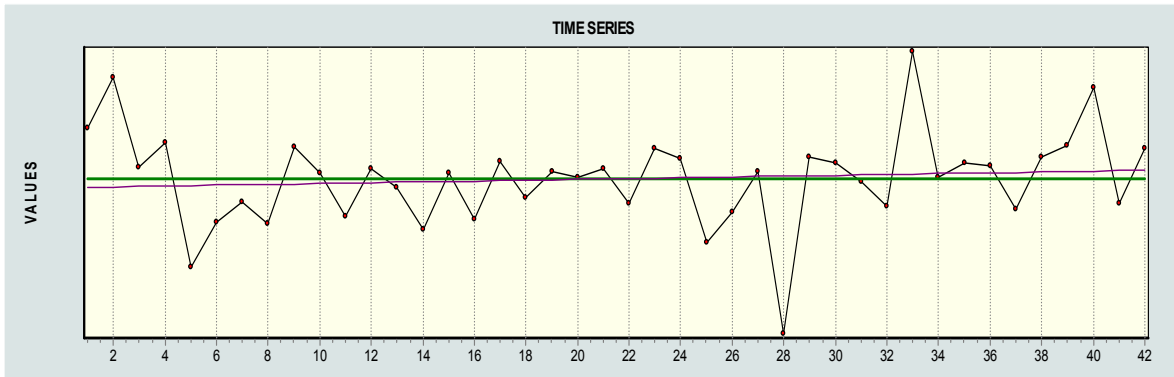


Figura 43. Correlograma. Medición N° 13.

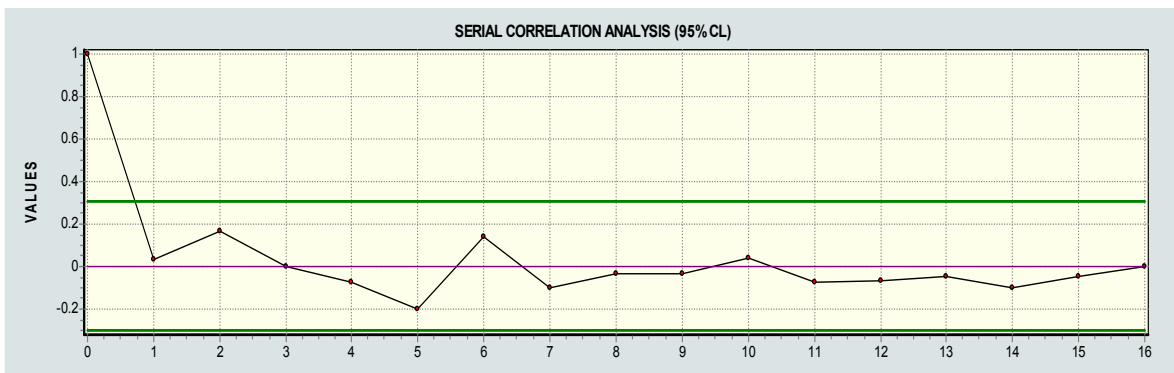


Figura 44. Ajuste a una función normal. Medición N° 13.

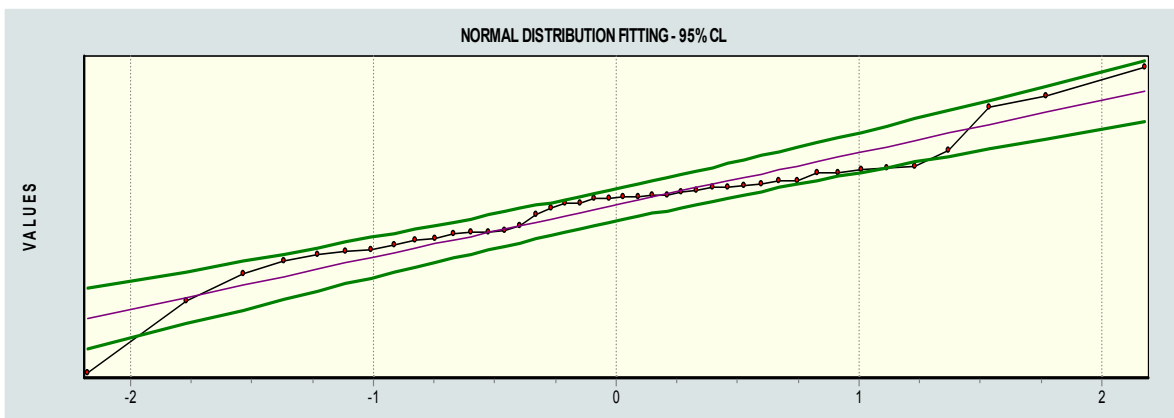


Figura 45. Serie de tiempo. Medición N° 14

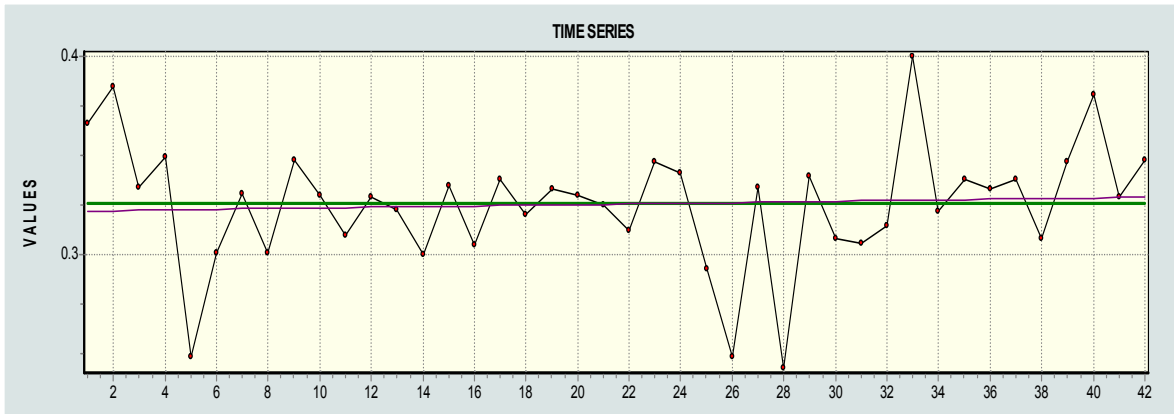


Figura 46. Correlograma. Medición N° 14.

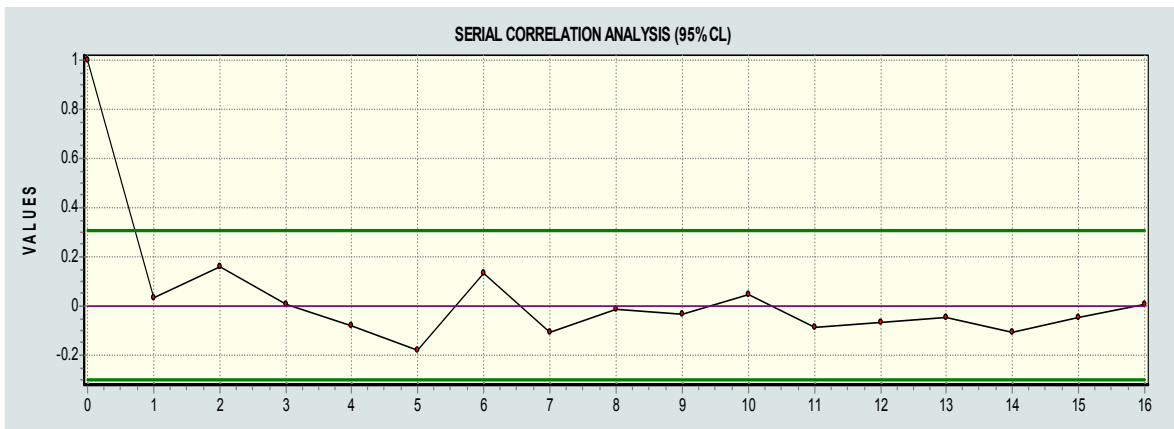


Figura 47. Ajuste a una función normal. Medición N° 14.

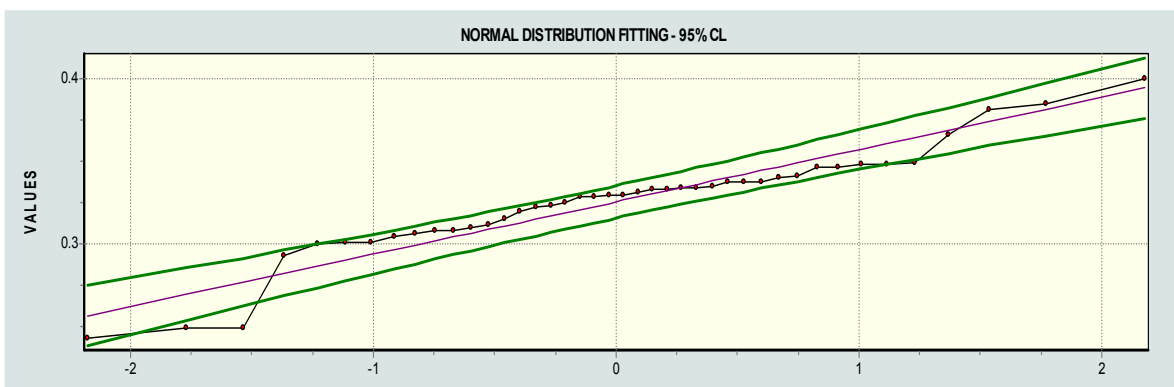


Figura 48. Serie de tiempo. Medición N° 15

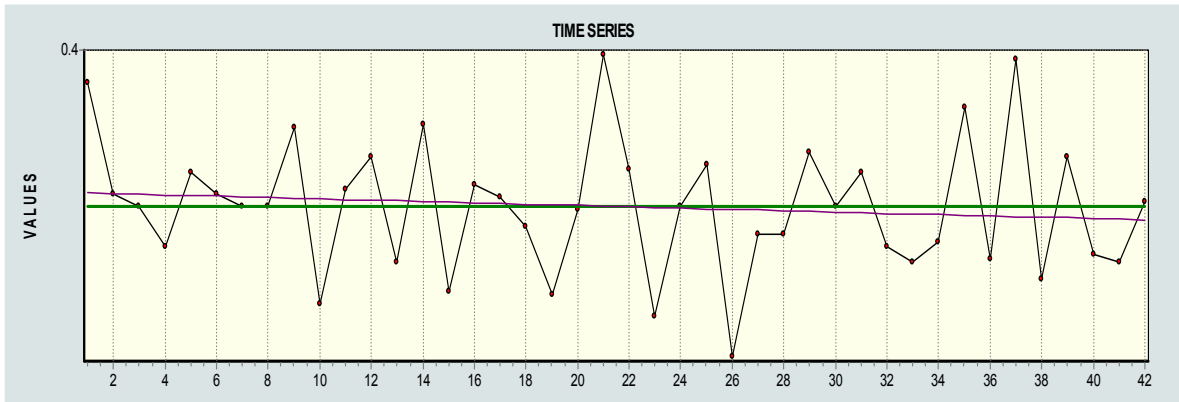


Figura 49. Correlograma. Medición N° 15

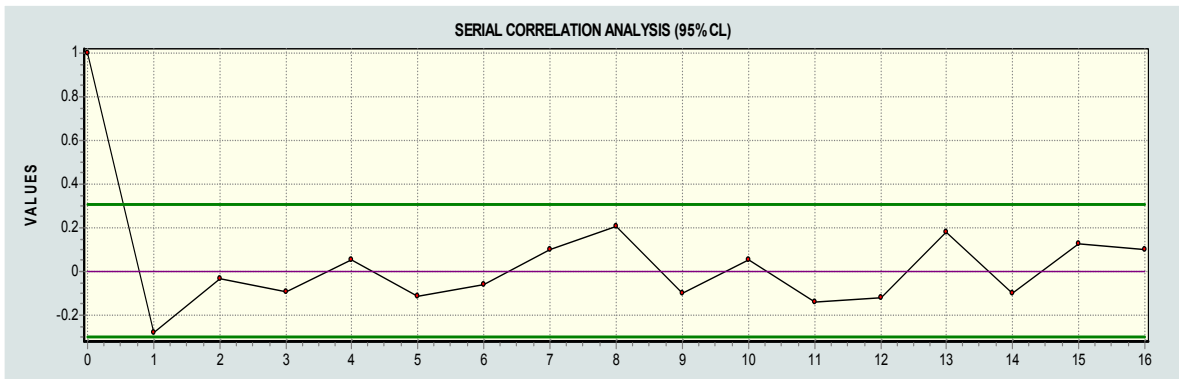
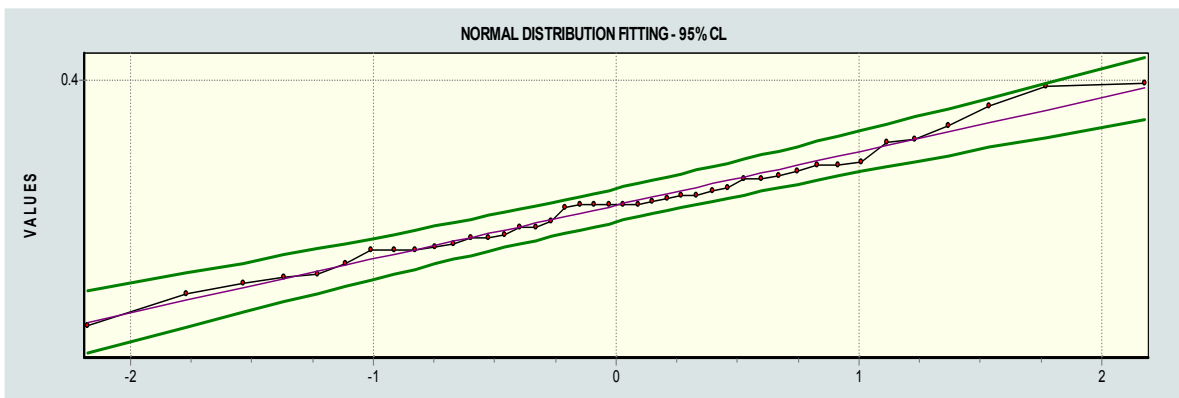


Figura 50. Ajuste a una función normal. Medición N° 15



Según el análisis de estos resultados anteriores se decidió desechar la tabla N° 10, correspondiente a la medición N° 6; ya que la mayoría de los datos no se encontraban dentro de los límites de confianza. Lo anterior pudo haber sucedido por causas como inestabilidad en el flujo y/o errores humanos.

El correlograma demuestra la independencia de cada dato.

Con las otras mediciones, se descartaron los datos que se encontraban fuera de los límites de confianza y con los datos restantes se halló un caudal y velocidad de ascenso promedio para cada medición.

Tabla 21. Caudales y velocidades de lavado definitivas.

<b>Tomas</b>	<b>Expansión (cm)</b>	<b>Caudal promedio (lps)</b>	<b>Velocidad promedio (cm/sg)</b>
1	0	0.019	0.098
2	0	0.033	0.176
3	0	0.028	0.150
4	0	0.054	0.283
5	0	0.058	0.305
7	9	0.172	0.911
8	12	0.208	1.098
9	16	0.230	1.215
10	22	0.269	1.425
11	29	0.308	1.631
12	33	0.314	1.660
13	40	0.322	1.703
14	66	0.328	1.737
15	72	0.362	1.914

Figura 51. Caudal vs Expansión del lecho

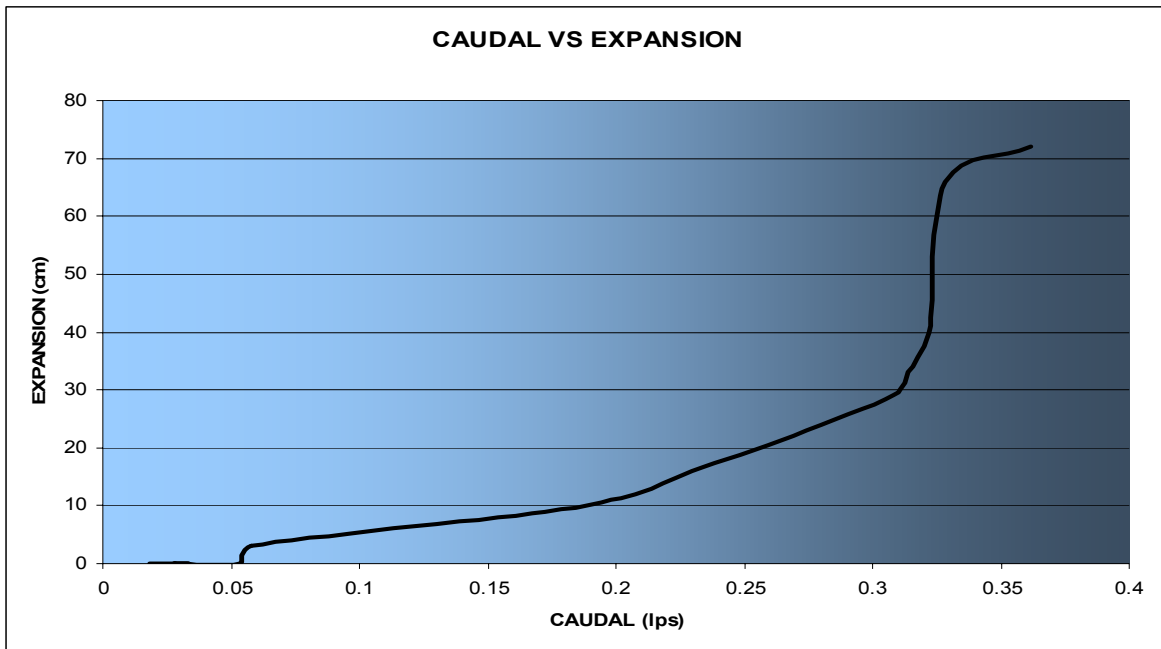
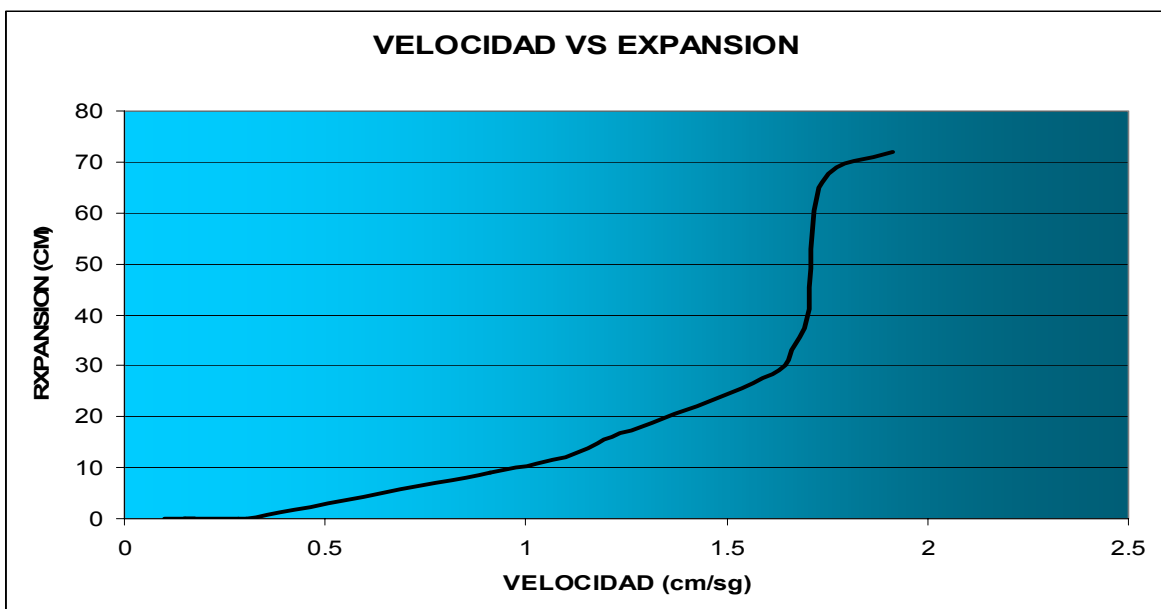


Figura 52. Velocidad ascensional vs Expansión del lecho



#### 4.2.2 EVALUACION DE LA CONSTANTE n

Una de las variables más importantes para la predicción de la expansión es quizás la porosidad inicial del lecho.

Para ello uso la siguiente formula:

$$p_o = \frac{V_v}{V_T} \quad (5-1)$$

Donde  $V_v$  es el volumen de vacíos y  $V_T$  es el volumen total.

Con los datos obtenidos en el Laboratorio de Hormigón Simple mediante el ensayo de gravedades específicas citado y desarrollado en el capítulo 2, en el cual se obtuvo un volumen de vacíos de 40.89%; entonces el volumen total de al arena es de  $0.01134 \text{ m}^3$ ; lo cual da una porosidad inicial  $p_o = 0.4089$ .

Con la información recolectada y teniendo en cuenta que la expansión total es:

$$E = \sum_{L=L}^{L=L_e} \Delta \varepsilon X_i = \sum_{L=L}^{L=L_e} \frac{\left( \frac{v_a}{v_s} \right)^{\frac{1}{n}} - p_o}{1 - \left( \frac{v_a}{v_s} \right)^{\frac{1}{n}}} X_i \quad (5-2)$$

Con la ecuación general para la determinación de la expansión del lecho filtrante en un filtro rápido de arena durante el proceso de lavado de flujo ascendente y conociendo la velocidad de lavado ascendente ( $v_a$ ), la porosidad inicial del lecho filtrante ( $p_o$ ), la granulometría de la arena la que especifica los valores de  $X_{i1}$ ,  $X_{i2}$ ,  $X_{i3}$ ,  $X_{i4}$  que son los valores correspondientes al porcentaje de peso de la arena retenido en cada tamiz, y las velocidades de sedimentación de las arena para los diferentes diámetros de partículas  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $v_3$ ,  $v_4$ ; se evaluaron los diferente valores de la constante n para las velocidades de sedimentación calculadas y las velocidades de sedimentación medidas.

$$\varepsilon = \frac{Xi_1 * \left(\frac{v_{a1}}{v_{s1}}\right)^n - p_o}{100 * \left(1 - \left(\frac{v_{a1}}{v_{s1}}\right)^n\right)} + \frac{Xi_2 * \left(\frac{v_{a2}}{v_{s2}}\right)^n - p_o}{100 * \left(1 - \left(\frac{v_{a2}}{v_{s2}}\right)^n\right)} + \frac{Xi_3 * \left(\frac{v_{a3}}{v_{s3}}\right)^n - p_o}{100 * \left(1 - \left(\frac{v_{a3}}{v_{s3}}\right)^n\right)} + \frac{Xi_4 * \left(\frac{v_{a4}}{v_{s4}}\right)^n - p_o}{100 * \left(1 - \left(\frac{v_{a4}}{v_{s4}}\right)^n\right)}$$

(5-3)

Las siguientes tablas resumen los resultados obtenidos para cada una de las velocidades de ascenso del flujo; es decir para las velocidades que se midieron experimentalmente en el laboratorio y las calculadas por la fórmula 1-11.

Tabla 22. n para velocidades de sedimentación medidas.

TOMA		Xi	EXPANSION (cm/cm)	Va	Vs	po	n
1	1	86.55	0	0.098	12.43	0.41	0.1727
	2	13.13			10.72		
	3	0.13			8.32		
	4	0.08			6.17		
2	1	86.55	0	0.176	12.43	0.41	0.195
	2	13.13			10.72		
	3	0.13			8.32		
	4	0.08			6.17		
3	1	86.55	0	0.15	12.43	0.41	0.1883
	2	13.13			10.72		
	3	0.13			8.32		
	4	0.08			6.17		
4	1	86.55	0	0.283	12.43	0.41	0.2174
	2	13.13			10.72		
	3	0.13			8.32		
	4	0.08			6.17		
5	1	86.55	0	0.305	12.43	0.41	0.2215
	2	13.13			10.72		
	3	0.13			8.32		
	4	0.08			6.17		
7	1	86.55	0.15	0.911	12.43	0.41	0.2455
	2	13.13			10.72		
	3	0.13			8.32		
	4	0.08			6.17		

Tabla 22. n para velocidades de sedimentación medidas (continuación)

TOMA			EXPANSION (cm/cm)	Va	Vs	po	n
8	1	86.55	0.2	1.098	12.43	0.41	0.2466
	2	13.13			10.72		
	3	0.13			8.32		
	4	0.08			6.17		
9	1	86.55	0.2667	1.215	12.43	0.41	0.2372
	2	13.13			10.72		
	3	0.13			8.32		
	4	0.08			6.17		
10	1	86.55	0.3667	1.425	12.43	0.41	0.2276
	2	13.13			10.72		
	3	0.13			8.32		
	4	0.08			6.17		
11	1	86.55	0.4833	1.631	12.43	0.41	0.216
	2	13.13			10.72		
	3	0.13			8.32		
	4	0.08			6.17		
12	1	86.55	0.55	1.66	12.43	0.41	0.2056
	2	13.13			10.72		
	3	0.13			8.32		
	4	0.08			6.17		
13	1	86.55	0.6667	1.703	12.43	0.41	0.1896
	2	13.13			10.72		
	3	0.13			8.32		
	4	0.08			6.17		
14	1	86.55	1.1	1.737	12.43	0.41	0.1443
	2	13.13			10.72		
	3	0.13			8.32		
	4	0.08			6.17		
15	1	86.55	1.2	1.914	12.43	0.41	0.1427
	2	13.13			10.72		
	3	0.13			8.32		
	4	0.08			6.17		

Tabla 23. n para velocidades de sedimentación calculadas por fórmula

TOMA		Xi	EXPANSION (cm/cm)	Va	Vs	po	n
1	1	86.55	0	0.098	17.88	0.41	0.145
	2	13.13			13.18		
	3	0.13			7.46		
	4	0.08			6.28		
2	1	86.55	0	0.176	17.88	0.41	0.161
	2	13.13			13.18		
	3	0.13			7.46		
	4	0.08			6.28		
3	1	86.55	0	0.15	17.88	0.41	0.156
	2	13.13			13.18		
	3	0.13			7.46		
	4	0.08			6.28		
4	1	86.55	0	0.283	17.88	0.41	0.176
	2	13.13			13.18		
	3	0.13			7.46		
	4	0.08			6.28		
5	1	86.55	0	0.305	17.88	0.41	0.178
	2	13.13			13.18		
	3	0.13			7.46		
	4	0.08			6.28		
7	1	86.55	0.15	0.911	17.88	0.41	0.184
	2	13.13			13.18		
	3	0.13			7.46		
	4	0.08			6.28		
8	1	86.55	0.2	1.098	17.88	0.41	0.181
	2	13.13			13.18		
	3	0.13			7.46		
	4	0.08			6.28		
9	1	86.55	0.2667	1.215	17.88	0.41	0.173
	2	13.13			13.18		
	3	0.13			7.46		
	4	0.08			6.28		
10	1	86.55	0.3667	1.425	17.88	0.41	0.163
	2	13.13			13.18		
	3	0.13			7.46		
	4	0.08			6.28		

Tabla 23. n para velocidades de sedimentación calculadas por fórmula  
(continuación)

TOMA		Xi	EXPANSION (cm/cm)	Va	Vs	po	n
11	1	86.55	0.4833	1.631	17.88	0.41	0.152
	2	13.13			13.18		
	3	0.13			7.46		
	4	0.08			6.28		
12	1	86.55	0.55	1.66	17.88	0.41	0.144
	2	13.13			13.18		
	3	0.13			7.46		
	4	0.08			6.28		
13	1	86.55	0.6667	1.703	17.88	0.41	0.132
	2	13.13			13.18		
	3	0.13			7.46		
	4	0.08			6.28		
14	1	86.55	1.1	1.737	17.88	0.41	0.101
	2	13.13			13.18		
	3	0.13			7.46		
	4	0.08			6.28		
15	1	86.55	1.2	1.914	17.88	0.41	0.098
	2	13.13			13.18		
	3	0.13			7.46		
	4	0.08			6.28		

Teniendo en cuenta que las expansiones recomendadas por el CEPIS se encuentran en las tomas 9 y 13, se obtuvo estadísticamente los valores de la media y el promedio para cada valor de la constante n para las correspondientes mediciones.

Tabla 24. Valores promedios de la constante n

	TOMAS	n LABORATORIO	n FORMULA	% ERROR
	10	0.253	0.2276	10.0395
	11	0.242	0.216	10.7438
	12	0.223	0.2056	7.8027
<b>máx</b>		0.253	0.2276	
<b>mín</b>		0.223	0.2056	
<b>media</b>		<b>0.239</b>	<b>0.2162</b>	
<b>Promedio</b>		0.239	0.2164	

Como se puede observar los valores de  $n$  obtenidos en el laboratorio se acercan más a los rangos recomendados, a diferencia de los obtenidos mediante la fórmula de la velocidad de sedimentación citada en el Capítulo 1.

## 5. VERIFICACIÓN POR PRESIONES

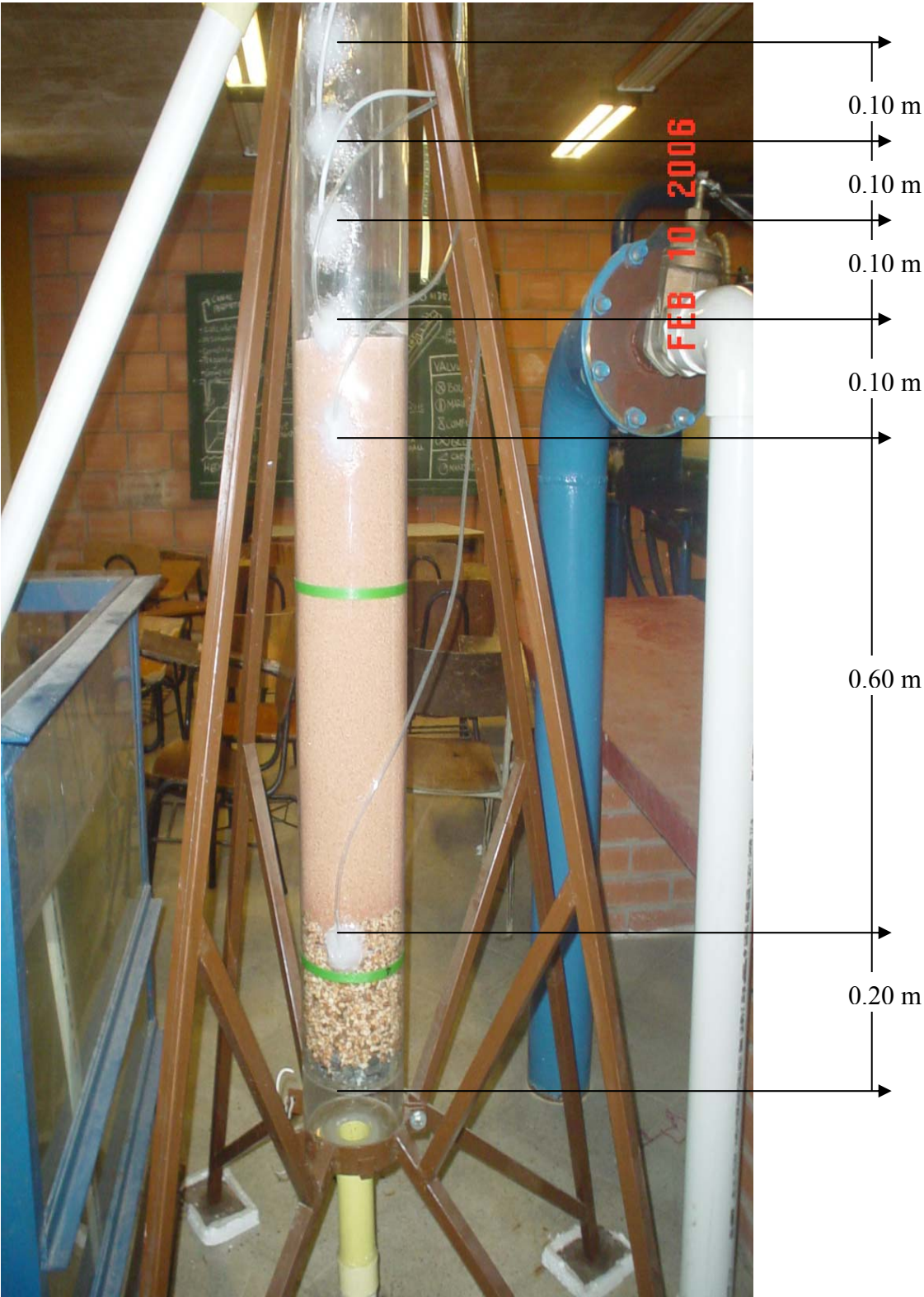
Una vez verificadas las velocidades de sedimentación halladas experimentalmente contra las calculadas mediante la formulación teórica, se puede apreciar que los errores son relativamente pequeños teniendo en cuenta que se usaron equipos de medición análogos es decir, susceptibles a errores humanos.

Retomando la teoría expuesta con anterioridad <sup>3</sup> la cual dice que para que exista expansión  $V_s < V_a$  y se ve claramente que a velocidades de ascenso,  $V_a$ ; menores que la velocidad de sedimentación;  $V_s$ ; de las partículas existe expansión (ver tabla 22); por ello se decidió implementar una serie de piezómetros ubicados de la siguiente manera:

---

<sup>3</sup> TEORÍA, DISEÑO Y CONTROL DE LOS PROCESOS DE CLARIFICACION DEL AGUA; Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS); 1981; pags 367-369

Foto 4. Distribución de piezómetros



Esto con el fin de medir las fuerzas de presión a diferentes alturas del filtro y de esta manera enfocar la hidráulica del lavado analizando las fuerzas y no las velocidades que en ella se presentan como se ha hecho hasta ahora.

Los esfuerzos en un continuo<sup>4</sup> son el resultado de fuerzas que actúan en alguna parte del medio. El concepto de esfuerzo constituye una forma apropiada para describir la manera en que las fuerzas que intervienen sobre las fronteras del medio se transmiten a través de él, puesto que tanto la fuerza como el área son cantidades vectoriales.

En el estudio de la mecánica de los fluidos continuos suelen considerarse dos tipos de fuerzas: las superficiales y las volumétricas. Las fuerzas superficiales son aquellas que actúan sobre las fronteras del medio a través del contacto directo. Las fuerzas que actúan sin contacto físico, y que se distribuyen sobre el volumen del fluido, se denominan volumétricas.

La fuerza gravitacional que actúa sobre un elemento de volumen,  $\delta v$  y esta dada por:

$$\rho * g * \delta v \quad (6-1)$$

Donde  $\rho$  es la densidad (masa por unidad de volumen) y  $g$  es la aceleración local de la gravedad. Así, la fuerza volumétrica gravitacional por unidad de volumen es  $\rho * g$  y la fuerza volumétrica por unidad de masa es  $g$ .

Se define un fluido<sup>5</sup> como una sustancia que se deforma continuamente bajo la acción de un esfuerzo cortante, en ausencia de este no existe deformación.

Si para nosotros ese esfuerzo cortante es la fuerza producida por la velocidad ascensional, por debajo de una cierta fuerza, la suspensión se comporta como un sólido (no hay expansión), sin embargo, a medida que esta fuerza aumenta, el fluido comienza a fluir.

Partiendo de lo anterior éste estudio solo llegará hasta hacer la medición de las fuerzas de presión lo largo del lecho tal y como se mencionó anteriormente.

---

<sup>4</sup> Alan S. Foust. Principios de Operaciones Unitarias. Ed Wiley. Pag 245-246.

<sup>5</sup> John Perry. Manual del Ingeniero Químico. Ed Atenea.

## 5.1 RECOLECCION DE DATOS

Las siguientes mediciones se hicieron bajo las mismas condiciones que las realizadas en el capítulo 4.

Volumen del tanque:  $h * l * a$  (4-1)

Donde

$\Delta h = 0.01 \text{ m}$     $l = 0.70 \text{ m}$     $a = 1.0 \text{ m}$ .

$V_{\text{tanque}} = 0.07 \text{ m}^3$     $A_{\text{tubo}} = 0.0189 \text{ m}^2$

Las columnas 1, 2 y 3 corresponden al tiempo acumulado expresado en horas, minutos y segundos para todos los  $\Delta h$  de una misma medición. La columna 4 son los mismos tiempos expresados en segundos. La columna 5 es tiempo comprendido entre los diferentes  $\Delta h$  para las diferentes tomas. Las columnas 6 y 7 son los caudales de ascenso en  $\text{m}^3/\text{seg}$  y  $\text{lps}$  y se calcula dividiendo  $V_{\text{tanque}}$  entre la columna 5. Las columnas 8 y 9 son las velocidades de ascenso y se obtienen dividiendo los caudales anteriores entre el  $A_{\text{tubo}}$ .

Tabla 25. Toma 1

t				t	t	E	Q		V <sub>tubo</sub>	
horas	min	seg	seg/100	seg	seg	(cm)	m <sup>3</sup> /s	lps	(m/s)	(cm/s)
0	0	59	41	59.41	59.41	0	0.000118	0.1178	0.0062	0.6244
0	1	50	82	110.82	51.41	0	0.000136	0.1362	0.0072	0.7216
0	2	51	24	171.24	60.42	0	0.000116	0.1159	0.0061	0.6140
0	3	45	34	225.34	54.1	0	0.000129	0.1294	0.0069	0.6857
0	4	44	20	284.2	58.86	0	0.000119	0.1189	0.0063	0.6303
0	5	41	84	341.84	57.64	0	0.000121	0.1214	0.0064	0.6436
0	6	31	30	391.3	49.46	0	0.000142	0.1415	0.0075	0.7500
0	7	29	30	449.3	58	0	0.000121	0.1207	0.0064	0.6396
0	8	27	6	507.06	57.76	0	0.000121	0.1212	0.0064	0.6423
0	9	23	38	563.38	56.32	0	0.000124	0.1243	0.0066	0.6587
0	10	18	90	618.9	55.52	0	0.000126	0.1261	0.0067	0.6682
0	11	13	30	673.3	54.4	0	0.000129	0.1287	0.0068	0.6819
0	12	9	19	729.19	55.89	0	0.000125	0.1252	0.0066	0.6638
0	13	5	64	785.64	56.45	0	0.000124	0.1240	0.0066	0.6572
0	13	57	45	837.45	51.81	0	0.000135	0.1351	0.0072	0.7160
0	14	51	30	891.3	53.85	0	0.000130	0.1300	0.0069	0.6889
0	15	50	46	950.46	59.16	0	0.000118	0.1183	0.0063	0.6271
0	16	44	50	1004.5	54.04	0	0.000130	0.1295	0.0069	0.6865
0	17	37	45	1057.5	52.95	0	0.000132	0.1322	0.0070	0.7006
0	18	30	49	1110.5	53.04	0	0.000132	0.1320	0.0070	0.6994
0	19	19	4	1159.04	48.55	0	0.000144	0.1442	0.0076	0.7642
0	20	14	41	1214.41	55.38	0	0.000126	0.1264	0.0067	0.6699
0	21	9	58	1269.58	55.16	0	0.000127	0.1269	0.0067	0.6725
0	22	4	5	1324.05	54.47	0	0.000129	0.1285	0.0068	0.6810
0	23	1	88	1381.88	57.83	0	0.000121	0.1210	0.0064	0.6415
0	24	1	76	1441.76	59.88	0	0.000117	0.1169	0.0062	0.6195
0	24	57	48	1497.48	55.71	0	0.000126	0.1256	0.0067	0.6658
0	25	54	37	1554.37	56.89	0	0.000123	0.1230	0.0065	0.6521
0	26	53	76	1613.76	59.40	0	0.000118	0.1179	0.0062	0.6246
0	27	53	49	1673.49	59.72	0	0.000117	0.1172	0.0062	0.6211
0	28	47	51	1727.51	54.02	0	0.000130	0.1296	0.0069	0.6867
0	29	44	30	1784.30	56.79	0	0.000123	0.1233	0.0065	0.6532
0	30	34	93	1834.93	50.63	0	0.000138	0.1383	0.0073	0.7327
0	31	28	38	1888.38	53.45	0	0.000131	0.1310	0.0069	0.6941
0	32	20	58	1940.58	52.19	0	0.000134	0.1341	0.0071	0.7108
0	33	21	29	2001.29	60.71	0	0.000115	0.1153	0.0061	0.6110
0	34	18	74	2058.74	57.45	0	0.000122	0.1218	0.0065	0.6457
0	35	16	54	2116.54	57.80	0	0.000121	0.1211	0.0064	0.6418
0	36	14	53	2174.53	57.99	0	0.000121	0.1207	0.0064	0.6397
0	37	6	42	2226.42	51.89	0	0.000135	0.1349	0.0071	0.7150
0	38	0	20	2280.20	53.78	0	0.000130	0.1302	0.0069	0.6898

Tabla 26. Toma 2

t				t	t	E	Q		V <sub>tubo</sub>	
horas	min	seg	seg/100	seg	seg	(cm)	m <sup>3</sup> /s	lps	(m/s)	(cm/s)
0	0	33	84	33.84	33.84	8	0.00021	0.2069	0.0110	1.0963
0	1	8	7	68.07	34.23	8	0.00020	0.2045	0.0108	1.0838
0	1	42	63	102.63	34.56	8	0.00020	0.2025	0.0107	1.0734
0	2	15	19	135.19	32.56	8	0.00021	0.2150	0.0114	1.1394
0	2	49	38	169.38	34.19	8	0.00020	0.2047	0.0109	1.0850
0	3	21	58	201.58	32.2	8	0.00022	0.2174	0.0115	1.1521
0	3	56	21	236.21	34.63	8	0.00020	0.2021	0.0107	1.0713
0	4	28	56	268.56	32.35	8	0.00022	0.2164	0.0115	1.1468
0	5	2	34	302.34	33.78	8	0.00021	0.2072	0.0110	1.0982
0	5	35	63	335.63	33.29	8	0.00021	0.2103	0.0111	1.1144
0	6	8	73	368.73	33.1	8	0.00021	0.2115	0.0112	1.1208
0	6	42	52	402.52	33.79	8	0.00021	0.2072	0.0110	1.0979
0	7	17	20	437.2	34.68	8	0.00020	0.2018	0.0107	1.0697
0	7	50	31	470.31	33.11	8	0.00021	0.2114	0.0112	1.1204
0	8	23	90	503.9	33.59	8	0.00021	0.2084	0.0110	1.1044
0	8	57	52	537.52	33.62	8	0.00021	0.2082	0.0110	1.1034
0	9	32	58	572.58	35.06	8	0.00020	0.1997	0.0106	1.0581
0	10	4	81	604.81	32.23	8	0.00022	0.2172	0.0115	1.1510
0	10	36	84	636.84	32.03	8	0.00022	0.2185	0.0116	1.1582
0	11	10	56	670.56	33.72	8	0.00021	0.2076	0.0110	1.1002
0	11	42	95	702.95	32.39	8	0.00022	0.2161	0.0115	1.1453
0	12	15	76	735.76	32.81	8	0.00021	0.2133	0.0113	1.1306
0	12	48	70	768.70	32.94	8	0.00021	0.2125	0.0113	1.1263
0	13	23	56	803.56	34.86	8	0.00020	0.2008	0.0106	1.0643
0	13	56	14	836.14	32.59	8	0.00021	0.2148	0.0114	1.1384
0	14	28	96	868.96	32.82	8	0.00021	0.2133	0.0113	1.1304
0	15	2	94	902.94	33.98	8	0.00021	0.2060	0.0109	1.0918
0	15	36	80	936.80	33.86	8	0.00021	0.2067	0.0110	1.0956
0	16	10	94	970.94	34.14	8	0.00021	0.2051	0.0109	1.0867
0	16	44	44	1004.44	33.50	8	0.00021	0.2089	0.0111	1.1073
0	17	16	94	1036.94	32.50	8	0.00022	0.2154	0.0114	1.1416
0	17	51	20	1071.20	34.27	8	0.00020	0.2043	0.0108	1.0826
0	18	24	38	1104.38	33.17	8	0.00021	0.2110	0.0112	1.1183
0	18	57	71	1137.71	33.33	8	0.00021	0.2100	0.0111	1.1129
0	19	30	91	1170.91	33.20	8	0.00021	0.2109	0.0112	1.1175
0	20	3	89	1203.89	32.98	8	0.00021	0.2122	0.0112	1.1248
0	20	35	90	1235.90	32.01	8	0.00022	0.2187	0.0116	1.1588
0	21	11	37	1271.37	35.47	8	0.00020	0.1973	0.0105	1.0458
0	21	45	98	1305.98	34.61	8	0.00020	0.2023	0.0107	1.0720
0	22	20	36	1340.36	34.38	8	0.000204	0.2036	0.0108	1.0790

Tabla 27. Toma 3

t				t	t	E	Q		V <sub>tubo</sub>	
horas	min	seg	seg/100	seg	seg	(cm)	m <sup>3</sup> /s	lps	(m/s)	(cm/s)
0	0	21	84	21.84	21.84	15	0.00032	0.3205	0.0170	1.6986
0	0	47	57	47.57	25.73	15	0.00027	0.2721	0.0144	1.4418
0	1	13	80	73.8	26.23	15	0.00027	0.2669	0.0141	1.4143
0	1	41	31	101.31	27.51	15	0.00025	0.2545	0.0135	1.3485
0	2	6	78	126.78	25.47	15	0.00027	0.2748	0.0146	1.4565
0	2	33	77	153.77	26.99	15	0.00026	0.2594	0.0137	1.3745
0	2	58	7	178.07	24.3	15	0.00029	0.2881	0.0153	1.5266
0	3	25	56	205.56	27.49	15	0.00025	0.2546	0.0135	1.3495
0	3	51	27	231.27	25.71	15	0.00027	0.2723	0.0144	1.4429
0	4	17	27	257.27	26	15	0.00027	0.2692	0.0143	1.4268
0	4	44	69	284.69	27.42	15	0.00026	0.2553	0.0135	1.3529
0	5	9	70	309.7	25.01	15	0.00028	0.2799	0.0148	1.4833
0	5	34	4	334.04	24.34	15	0.00029	0.2876	0.0152	1.5241
0	6	2	7	362.07	28.03	15	0.00025	0.2497	0.0132	1.3235
0	6	28	71	388.71	26.64	15	0.00026	0.2628	0.0139	1.3925
0	6	54	69	414.69	25.98	15	0.00027	0.2694	0.0143	1.4279
0	7	21	31	441.31	26.62	15	0.00026	0.2630	0.0139	1.3936
0	7	42	73	462.73	21.42	15	0.00033	0.3268	0.0173	1.7319
0	8	14	37	494.37	31.64	15	0.00022	0.2212	0.0117	1.1725
0	8	41	97	521.97	27.6	15	0.00025	0.2536	0.0134	1.3441
0	9	7	80	547.80	25.83	15	0.00027	0.2710	0.0144	1.4360
0	9	33	70	573.70	25.90	15	0.00027	0.2703	0.0143	1.4323
0	9	57	26	597.26	23.56	15	0.00030	0.2971	0.0157	1.5748
0	10	23	83	623.83	26.57	15	0.00026	0.2635	0.0140	1.3964
0	10	49	7	649.07	25.25	15	0.00028	0.2773	0.0147	1.4695
0	11	17	3	677.03	27.96	15	0.00025	0.2504	0.0133	1.3268
0	11	45	49	705.49	28.45	15	0.00025	0.2460	0.0130	1.3037
0	12	7	96	727.96	22.47	15	0.00031	0.3115	0.0165	1.6511
0	12	40	34	760.34	32.38	15	0.00022	0.2162	0.0115	1.1456
0	13	1	62	781.62	21.29	15	0.00033	0.3289	0.0174	1.7429
0	13	28	61	808.61	26.99	15	0.00026	0.2594	0.0137	1.3746
0	13	54	81	834.81	26.20	15	0.00027	0.2672	0.0142	1.4158
0	14	22	6	862.06	27.25	15	0.00026	0.2569	0.0136	1.3614
0	14	45	84	885.84	23.77	15	0.00029	0.2944	0.0156	1.5604
0	15	12	63	912.63	26.80	15	0.00026	0.2612	0.0138	1.3843
0	15	38	47	938.47	25.84	15	0.00027	0.2709	0.0144	1.4358
0	16	4	29	964.29	25.82	15	0.00027	0.2711	0.0144	1.4367
0	16	29	38	989.38	25.08	15	0.00028	0.2791	0.0148	1.4789
0	16	55	76	1015.76	26.38	15	0.00027	0.2654	0.0141	1.4064
0	17	22	38	1042.38	26.63	15	0.00026	0.2629	0.0139	1.3932

Tabla 28. Toma 4

t				t	t	E	Q		V <sub>tubo</sub>	
horas	min	seg	seg/100	seg	seg	(cm)	m <sup>3</sup> /s	lps	(m/s)	(cm/s)
0	0	20	77	20.77	20.77	26	0.00034	0.3370	0.0179	1.7861
0	0	40	56	40.56	19.79	26	0.00035	0.3537	0.0187	1.8746
0	1	1	6	61.06	20.5	26	0.00034	0.3415	0.0181	1.8096
0	1	18	16	78.16	17.1	26	0.00041	0.4094	0.0217	2.1694
0	1	39	94	99.94	21.78	26	0.00032	0.3214	0.0170	1.7033
0	2	0	29	120.29	20.35	26	0.00034	0.3440	0.0182	1.8230
0	2	20	47	140.47	20.18	26	0.00035	0.3469	0.0184	1.8383
0	2	40	41	160.41	19.94	26	0.00035	0.3511	0.0186	1.8605
0	2	59	70	179.7	19.29	26	0.00036	0.3629	0.0192	1.9231
0	3	19	93	199.93	20.23	26	0.00035	0.3460	0.0183	1.8338
0	3	39	92	219.92	19.99	26	0.00035	0.3502	0.0186	1.8558
0	4	0	9	240.09	20.17	26	0.00035	0.3471	0.0184	1.8392
0	4	20	50	260.5	20.41	26	0.00034	0.3430	0.0182	1.8176
0	4	40	28	280.28	19.78	26	0.00035	0.3539	0.0188	1.8755
0	5	1	73	301.73	21.45	26	0.00033	0.3263	0.0173	1.7295
0	5	20	55	320.55	18.82	26	0.00037	0.3719	0.0197	1.9712
0	5	41	13	341.13	20.58	26	0.00034	0.3401	0.0180	1.8026
0	6	0	70	360.7	19.57	26	0.00036	0.3577	0.0190	1.8956
0	6	21	27	381.27	20.57	26	0.00034	0.3403	0.0180	1.8035
0	6	41	62	401.62	20.35	26	0.00034	0.3440	0.0182	1.8230
0	7	2	91	422.91	21.29	26	0.00033	0.3288	0.0174	1.7427
0	7	23	29	443.29	20.38	26	0.00034	0.3435	0.0182	1.8205
0	7	43	26	463.26	19.97	26	0.00035	0.3505	0.0186	1.8575
0	8	2	83	482.83	19.58	26	0.00036	0.3576	0.0190	1.8950
0	8	21	9	501.09	18.26	26	0.00038	0.3834	0.0203	2.0316
0	8	42	25	522.25	21.16	26	0.00033	0.3308	0.0175	1.7531
0	9	1	43	541.43	19.17	26	0.00037	0.3651	0.0193	1.9348
0	9	21	54	561.54	20.11	26	0.00035	0.3481	0.0184	1.8446
0	9	42	73	582.73	21.19	26	0.00033	0.3304	0.0175	1.7507
0	10	2	45	602.45	19.72	26	0.00036	0.3550	0.0188	1.8815
0	10	22	16	622.16	19.72	26	0.00036	0.3550	0.0188	1.8816
0	10	41	69	641.69	19.53	26	0.00036	0.3585	0.0190	1.9000
0	11	1	37	661.37	19.68	26	0.00036	0.3557	0.0189	1.8850
0	11	22	48	682.48	21.11	26	0.00033	0.3315	0.0176	1.7570
0	11	44	91	704.91	22.42	26	0.00031	0.3122	0.0165	1.6543
0	12	5	58	725.58	20.68	26	0.00034	0.3385	0.0179	1.7940
0	12	25	80	745.80	20.22	26	0.00035	0.3463	0.0184	1.8351
0	12	46	11	766.11	20.31	26	0.00034	0.3447	0.0183	1.8269
0	13	5	58	785.58	19.47	26	0.00036	0.3595	0.0191	1.9052
0	13	22	88	802.88	17.30	26	0.00040	0.4047	0.0214	2.1446

Tabla 29. Toma 5

t				t	t tomas	E	Q		V <sub>tubo</sub>	
horas	min	seg	Seg100	seg	seg	(cm)	m <sup>3</sup> /s	lps	(m/s)	(cm/s)
0	0	18	85	18.85	18.85	36	0.00037	0.3714	0.0197	1.9680
0	0	36	84	36.84	17.99	36	0.00039	0.3891	0.0206	2.0621
0	0	51	18	51.18	14.34	36	0.00049	0.4881	0.0259	2.5870
0	1	6	16	66.16	14.98	36	0.00047	0.4673	0.0248	2.4765
0	1	21	86	81.86	15.7	36	0.00045	0.4459	0.0236	2.3629
0	1	38	9	98.09	16.23	36	0.00043	0.4313	0.0229	2.2857
0	1	54	67	114.67	16.58	36	0.00042	0.4222	0.0224	2.2375
0	2	9	82	129.82	15.15	36	0.00046	0.4620	0.0245	2.4487
0	2	27	6	147.06	17.24	36	0.00041	0.4060	0.0215	2.1518
0	2	43	5	163.05	15.99	36	0.00044	0.4378	0.0232	2.3200
0	2	59	20	179.2	16.15	36	0.00043	0.4334	0.0230	2.2971
0	3	15	17	195.17	15.97	36	0.00044	0.4383	0.0232	2.3229
0	3	31	84	211.84	16.67	36	0.00042	0.4199	0.0223	2.2254
0	3	48	17	228.17	16.33	36	0.00043	0.4287	0.0227	2.2717
0	4	4	31	244.31	16.14	36	0.00043	0.4337	0.0230	2.2985
0	4	19	74	259.74	15.43	36	0.00045	0.4537	0.0240	2.4042
0	4	36	19	276.19	16.45	36	0.00043	0.4255	0.0226	2.2552
0	4	51	59	291.59	15.4	36	0.00045	0.4545	0.0241	2.4089
0	5	7	40	307.4	15.81	36	0.00044	0.4428	0.0235	2.3465
0	5	23	74	323.74	16.34	36	0.00043	0.4284	0.0227	2.2703
0	5	39	26	339.26	15.52	36	0.00045	0.4512	0.0239	2.3910
0	5	56	15	356.15	16.89	36	0.00041	0.4144	0.0220	2.1961
0	6	12	34	372.34	16.19	36	0.00043	0.4323	0.0229	2.2908
0	6	28	46	388.46	16.12	36	0.00043	0.4342	0.0230	2.3010
0	6	43	24	403.24	14.77	36	0.00047	0.4739	0.0251	2.5115
0	7	0	46	420.46	17.22	36	0.00041	0.4064	0.0215	2.1540
0	7	16	22	436.22	15.76	36	0.00044	0.4442	0.0235	2.3543
0	7	32	73	452.73	16.52	36	0.00042	0.4238	0.0225	2.2461
0	7	47	1	467.01	14.28	36	0.00049	0.4902	0.0260	2.5980
0	8	2	95	482.95	15.94	36	0.00044	0.4392	0.0233	2.3278
0	8	21	85	501.85	18.91	36	0.00037	0.3703	0.0196	1.9622
0	8	41	64	521.64	19.78	36	0.00035	0.3538	0.0188	1.8752
0	8	56	46	536.46	14.82	36	0.00047	0.4722	0.0250	2.5025
0	9	12	87	552.87	16.41	36	0.00043	0.4267	0.0226	2.2613
0	9	29	88	569.88	17.01	36	0.00041	0.4114	0.0218	2.1804
0	9	44	77	584.77	14.89	36	0.00047	0.4702	0.0249	2.4920
0	10	1	41	601.41	16.64	36	0.00042	0.4207	0.0223	2.2296
0	10	17	4	617.04	15.64	36	0.00045	0.4476	0.0237	2.3722
0	10	31	25	631.25	14.21	36	0.00049	0.4926	0.0261	2.6107
0	10	47	8	647.08	15.83	36	0.00044	0.4422	0.0234	2.3436

Tabla 30. Toma 6

t				t	t tomas	E	Q		V <sub>tubo</sub>	
horas	min	seg	seg/100	seg	seg	(cm)	m <sup>3</sup> /s	lps	(m/s)	(cm/s)
0	0	13	43	13.43	13.43	47.5	0.00052	0.5212	0.0276	2.7623
0	0	26	23	26.23	12.8	47.5	0.00055	0.5469	0.0290	2.8982
0	0	40	77	40.77	14.54	47.5	0.00048	0.4814	0.0255	2.5514
0	0	55	27	55.27	14.5	47.5	0.00048	0.4828	0.0256	2.5584
0	1	9	9	69.09	13.82	47.5	0.00051	0.5065	0.0268	2.6843
0	1	23	45	83.45	14.36	47.5	0.00049	0.4875	0.0258	2.5834
0	1	36	3	96.03	12.58	47.5	0.00056	0.5564	0.0295	2.9489
0	1	50	57	110.57	14.54	47.5	0.00048	0.4814	0.0255	2.5514
0	2	4	16	124.16	13.59	47.5	0.00052	0.5151	0.0273	2.7298
0	2	18	24	138.24	14.08	47.5	0.00050	0.4972	0.0263	2.6348
0	2	31	24	151.24	13	47.5	0.00054	0.5385	0.0285	2.8536
0	2	44	70	164.7	13.46	47.5	0.00052	0.5201	0.0276	2.7561
0	2	59	69	179.69	14.99	47.5	0.00047	0.4670	0.0247	2.4748
0	3	13	25	193.25	13.56	47.5	0.00052	0.5162	0.0274	2.7358
0	3	25	65	205.65	12.4	47.5	0.00056	0.5645	0.0299	2.9917
0	3	41	21	221.21	15.56	47.5	0.00045	0.4499	0.0238	2.3842
0	3	54	76	234.76	13.55	47.5	0.00052	0.5166	0.0274	2.7378
0	4	9	28	249.28	14.52	47.5	0.00048	0.4821	0.0255	2.5549
0	4	24	12	264.12	14.84	47.5	0.00047	0.4717	0.0250	2.4998
0	4	37	46	277.46	13.34	47.5	0.00052	0.5247	0.0278	2.7809
0	4	51	83	291.83	14.37	47.5	0.00049	0.4872	0.0258	2.5822
0	5	6	76	306.76	14.94	47.5	0.00047	0.4687	0.0248	2.4837
0	5	20	43	320.43	13.67	47.5	0.00051	0.5120	0.0271	2.7136
0	5	35	46	335.46	15.02	47.5	0.00047	0.4659	0.0247	2.4692
0	5	48	29	348.29	12.83	47.5	0.00055	0.5457	0.0289	2.8920
0	6	3	94	363.94	15.65	47.5	0.00045	0.4472	0.0237	2.3702
0	6	18	74	378.74	14.80	47.5	0.00047	0.4730	0.0251	2.5067
0	6	31	84	391.84	13.11	47.5	0.00053	0.5340	0.0283	2.8301
0	6	45	9	405.09	13.24	47.5	0.00053	0.5286	0.0280	2.8013
0	6	58	24	418.24	13.15	47.5	0.00053	0.5323	0.0282	2.8209
0	7	11	18	431.18	12.94	47.5	0.00054	0.5409	0.0287	2.8667
0	7	24	8	444.08	12.90	47.5	0.00054	0.5425	0.0287	2.8749
0	7	38	36	458.36	14.28	47.5	0.00049	0.4902	0.0260	2.5981
0	7	51	45	471.45	13.08	47.5	0.00054	0.5350	0.0284	2.8354
0	8	6	15	486.15	14.71	47.5	0.00048	0.4759	0.0252	2.5223
0	8	20	2	500.02	13.86	47.5	0.00050	0.5049	0.0268	2.6759
0	8	34	69	514.69	14.67	47.5	0.00048	0.4770	0.0253	2.5281
0	8	46	46	526.46	11.77	47.5	0.00059	0.5947	0.0315	3.1519
0	9	1	19	541.19	14.73	47.5	0.00048	0.4753	0.0252	2.5188
0	9	15	60	555.60	14.41	47.5	0.00049	0.4858	0.0257	2.5743

Tabla 31. Toma7

t				t	t tomas	E	Q		V <sub>tubo</sub>	
horas	min	seg	seg/100	seg	seg	(cm)	m <sup>3</sup> /s	lps	(m/s)	(cm/s)
0	0	12	18	12.18	12.18	60	0.00057	0.5747	0.0305	3.0458
0	0	24	36	24.36	12.18	60	0.00057	0.5747	0.0305	3.0458
0	0	35	44	35.44	11.08	60	0.00063	0.6318	0.0335	3.3481
0	0	47	77	47.77	12.33	60	0.00057	0.5677	0.0301	3.0087
0	0	59	17	59.17	11.4	60	0.00061	0.6140	0.0325	3.2542
0	1	11	45	71.45	12.28	60	0.00057	0.5700	0.0302	3.0210
0	1	23	74	83.74	12.29	60	0.00057	0.5696	0.0302	3.0185
0	1	35	99	95.99	12.25	60	0.00057	0.5714	0.0303	3.0284
0	1	47	8	107.08	11.09	60	0.00063	0.6312	0.0335	3.3451
0	2	0	2	120.02	12.94	60	0.00054	0.5410	0.0287	2.8669
0	2	11	45	131.45	11.43	60	0.00061	0.6124	0.0325	3.2456
0	2	23	49	143.49	12.04	60	0.00058	0.5814	0.0308	3.0812
0	2	35	41	155.41	11.92	60	0.00059	0.5872	0.0311	3.1122
0	2	47	77	167.77	12.36	60	0.00057	0.5663	0.0300	3.0014
0	2	59	42	179.42	11.65	60	0.00060	0.6009	0.0318	3.1843
0	3	11	4	191.04	11.62	60	0.00060	0.6024	0.0319	3.1925
0	3	24	20	204.2	13.16	60	0.00053	0.5319	0.0282	2.8190
0	3	35	77	215.77	11.57	60	0.00061	0.6050	0.0321	3.2063
0	3	47	75	227.75	11.98	60	0.00058	0.5843	0.0310	3.0966
0	4	0	11	240.11	12.36	60	0.00057	0.5663	0.0300	3.0014
0	4	11	71	251.71	11.60	60	0.00060	0.6034	0.0320	3.1976
0	4	23	96	263.96	12.25	60	0.00057	0.5713	0.0303	3.0276
0	4	35	67	275.67	11.71	60	0.00060	0.5978	0.0317	3.1682
0	4	46	85	286.85	11.17	60	0.00063	0.6265	0.0332	3.3203
0	4	58	52	298.52	11.68	60	0.00060	0.5994	0.0318	3.1768
0	5	10	78	310.78	12.26	60	0.00057	0.5710	0.0303	3.0263
0	5	23	12	323.12	12.34	60	0.00057	0.5672	0.0301	3.0058
0	5	34	2	334.02	10.90	60	0.00064	0.6422	0.0340	3.4034
0	5	46	26	346.26	12.23	60	0.00057	0.5723	0.0303	3.0328
0	5	57	14	357.14	10.88	60	0.00064	0.6432	0.0341	3.4087
0	6	9	45	369.45	12.31	60	0.00057	0.5688	0.0301	3.0147
0	6	20	15	380.15	10.70	60	0.00065	0.6541	0.0347	3.4666
0	6	31	35	391.35	11.20	60	0.00062	0.6248	0.0331	3.3113
0	6	44	57	404.57	13.22	60	0.00053	0.5296	0.0281	2.8066
0	6	55	90	415.90	11.34	60	0.00062	0.6175	0.0327	3.2724
0	7	8	66	428.66	12.76	60	0.00055	0.5486	0.0291	2.9074
0	7	20	53	440.53	11.86	60	0.00059	0.5901	0.0313	3.1271
0	7	31	81	451.81	11.28	60	0.00062	0.6203	0.0329	3.2874
0	7	43	50	463.50	11.69	60	0.00060	0.5988	0.0317	3.1732
0	7	55	28	475.28	11.78	60	0.00059	0.5942	0.0315	3.1493

## **5.2 ANALISIS DE DATOS**

Para garantizar la veracidad en las mediciones se ajustaron mediante la utilización del programa de modelamiento hidrológico Spell-stat adoptado anteriormente.

Al analizar los resultados, se pudo constatar que estos se ajustan a una distribución normal con unos límites de confianza del 95 %; lo cual indica que los datos recolectados tienen una validez aceptable.

Figura 53. Serie de tiempo. Medición N° 1.

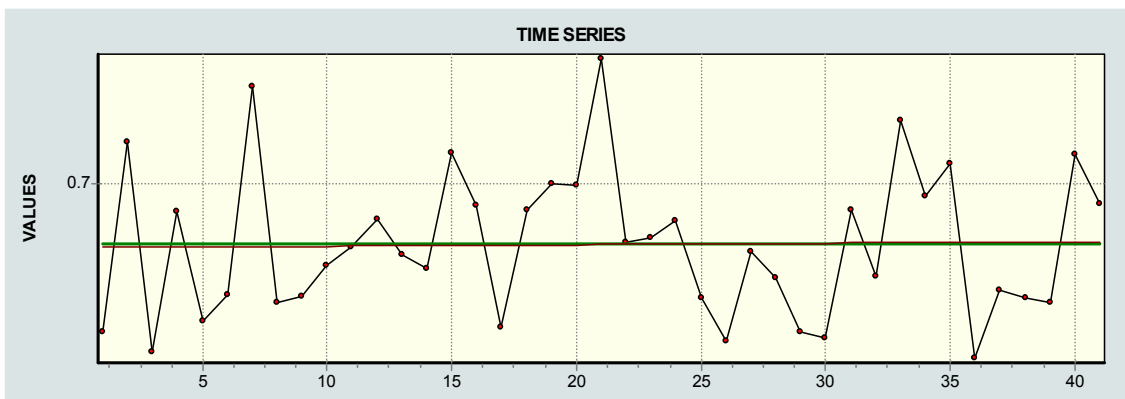


Figura 54. Correlograma. Medición N° 1.

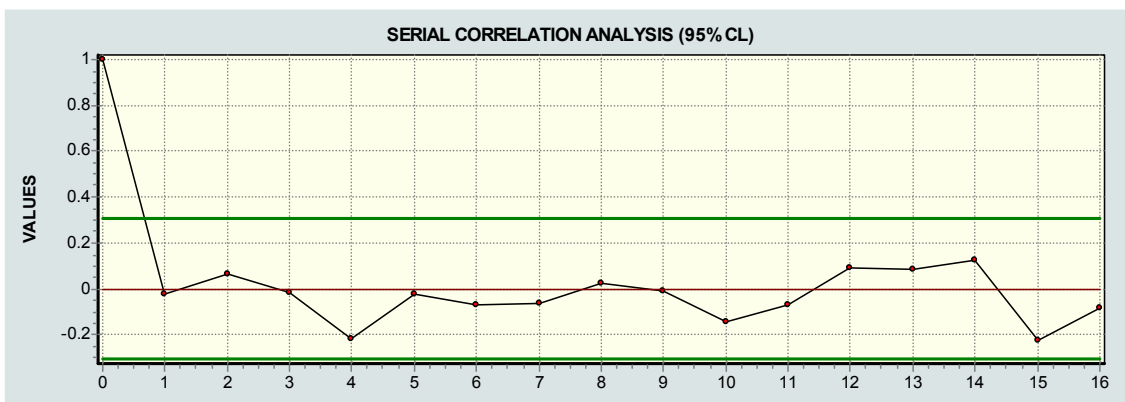


Figura 55. Ajuste a una función normal. Medición N° 1.

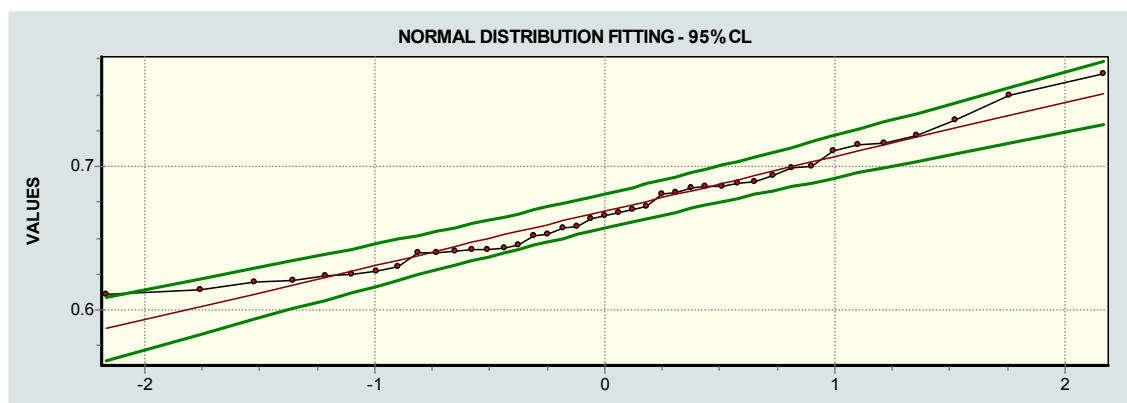


Figura 56. Serie de tiempo. Medición N° 2.

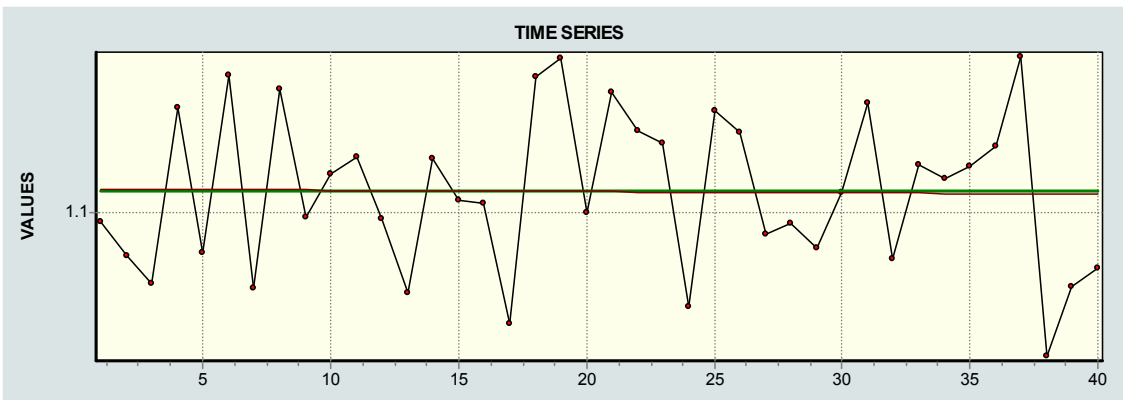


Figura 57. Correlograma. Medición N° 2.

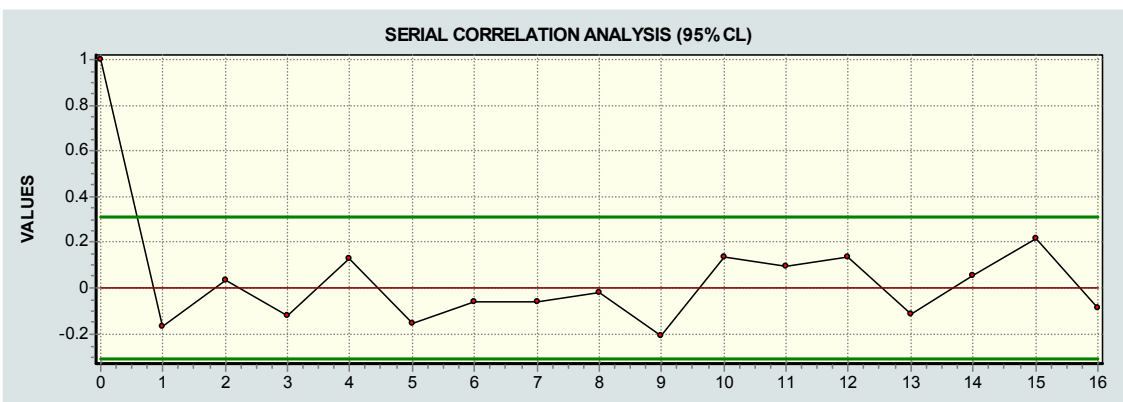


Figura 58. Ajuste a una función normal. Medición N° 2.

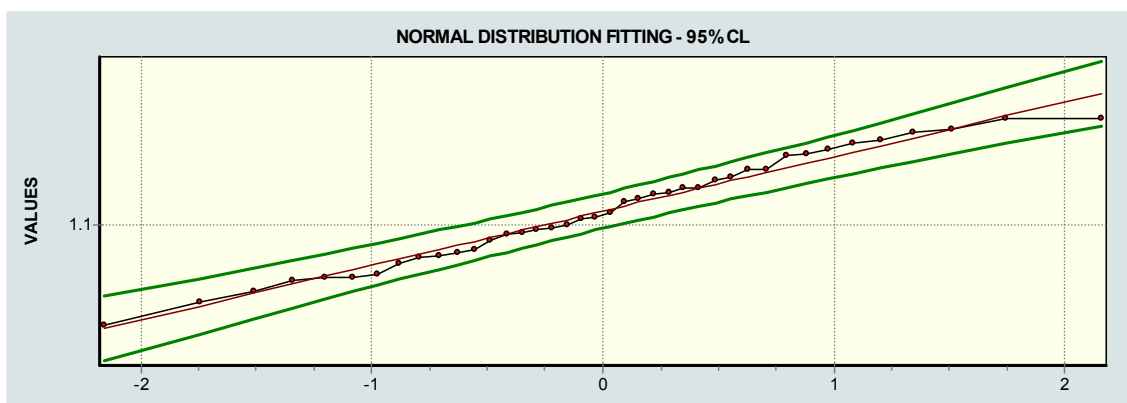


Figura 59. Serie de tiempo. Medición N° 3.

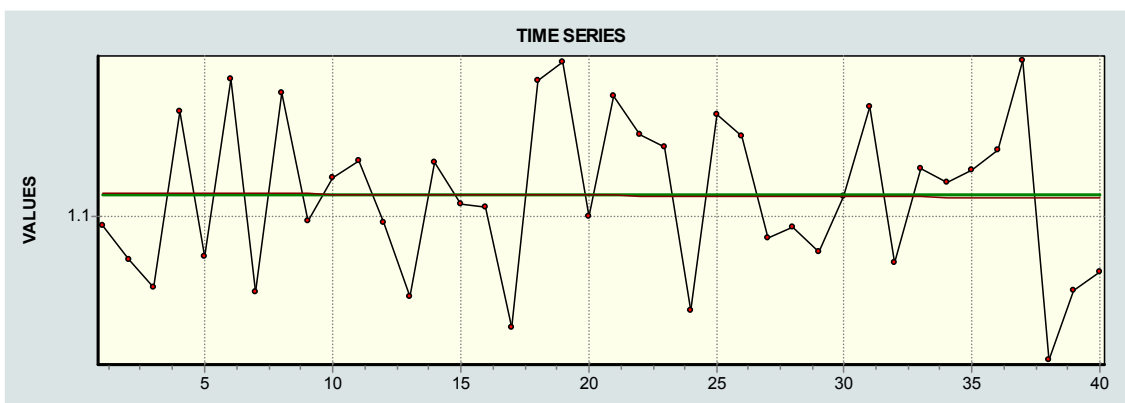


Figura 60. Correlograma. Medición N° 3.

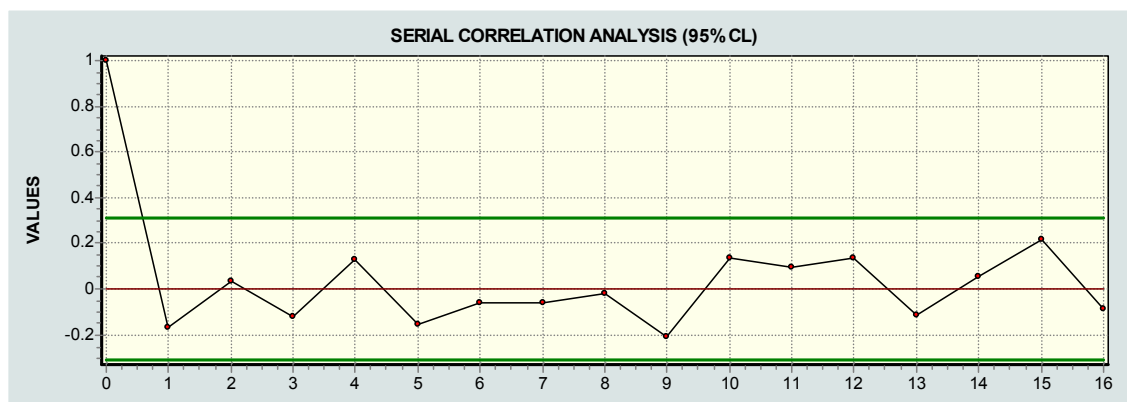


Figura 61. Ajuste a una función normal. Medición N° 3.

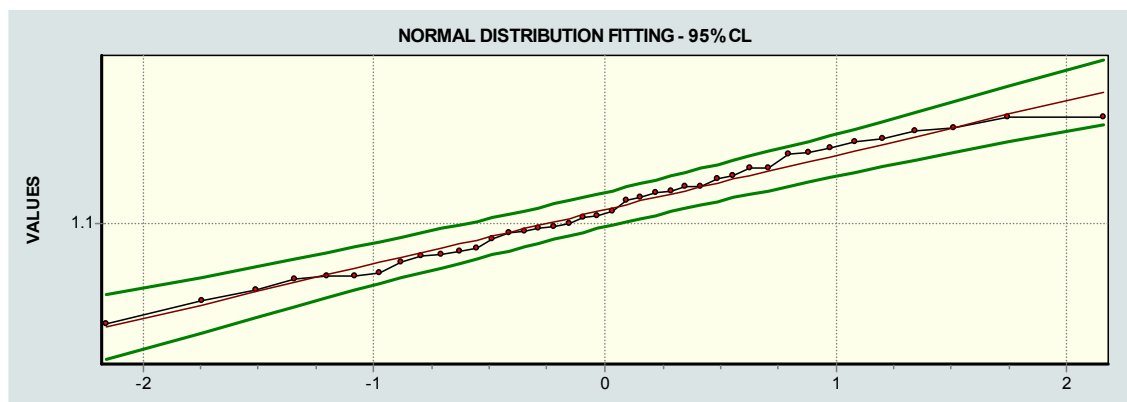


Figura 62. Serie de tiempo. Medición N° 4.

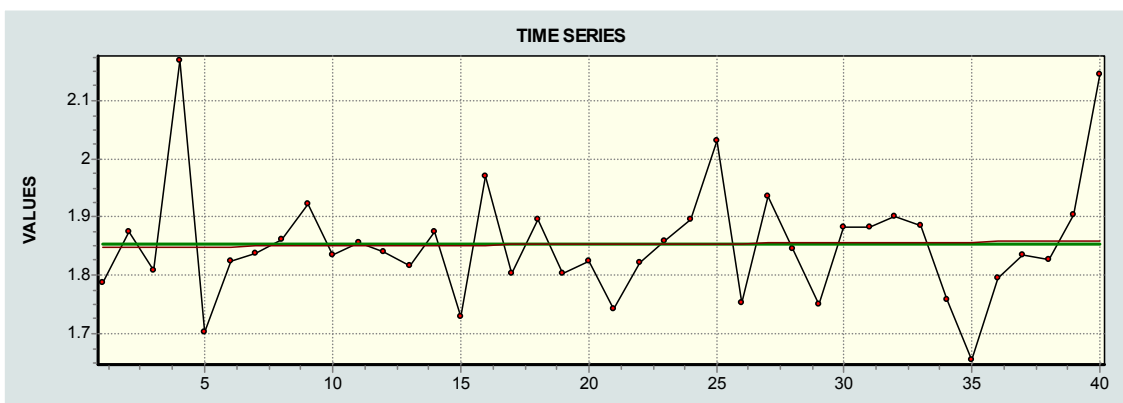


Figura 63. Correlograma. Medición N° 4

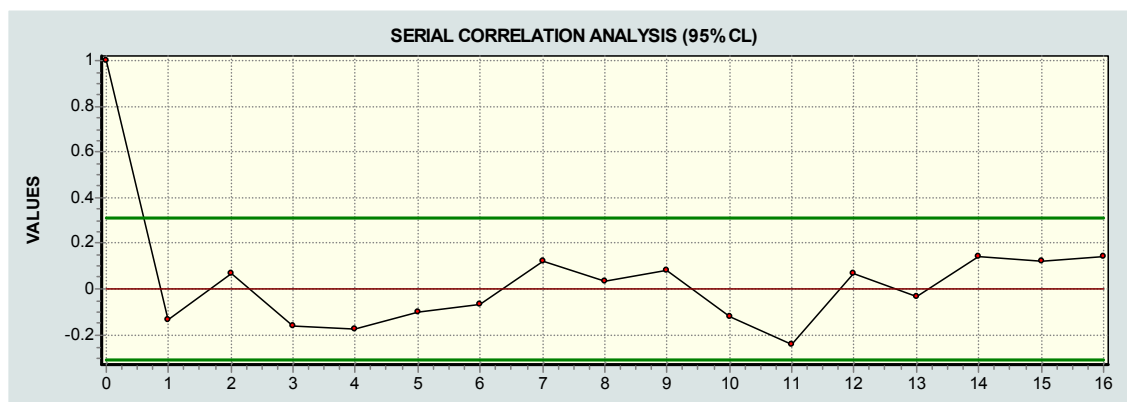


Figura 64. Ajuste a una función normal. Medición N° 4.

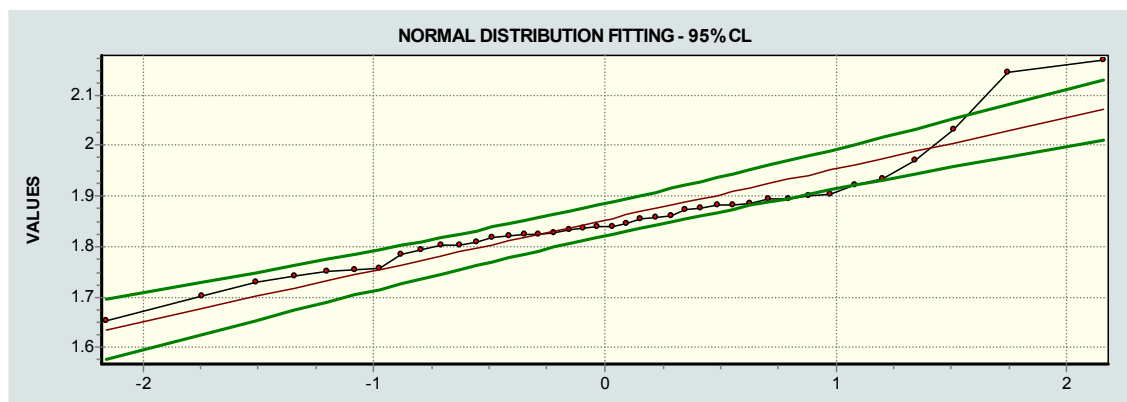


Figura 65. Serie de tiempo. Medición N° 5.

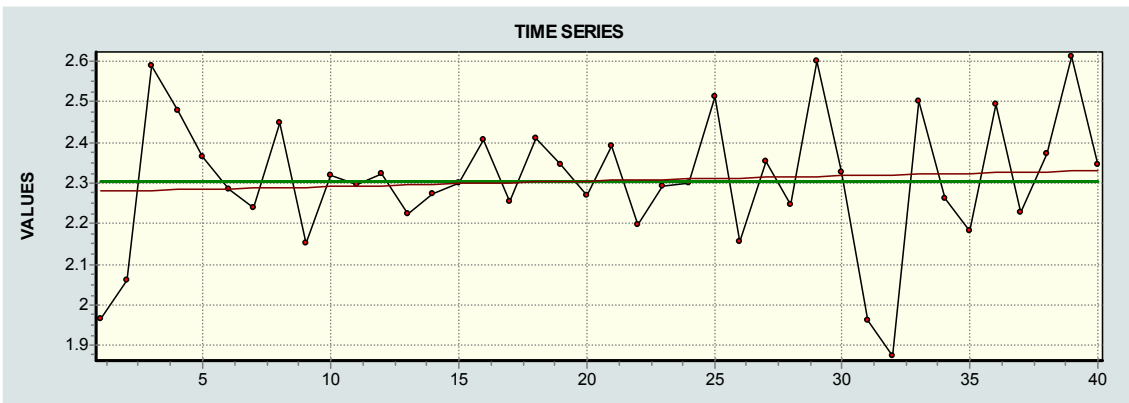


Figura 66. Correlograma. Medición N° 5.

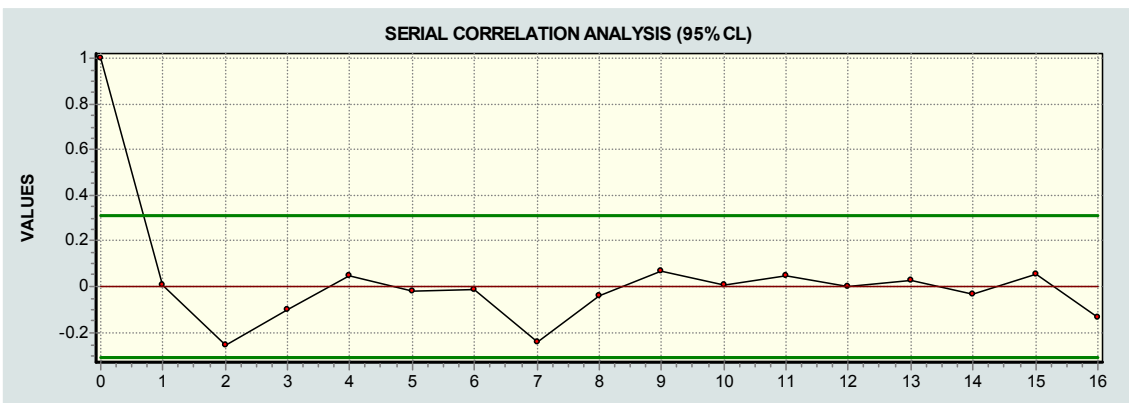


Figura 67. Ajuste a una función normal. Medición N° 5.

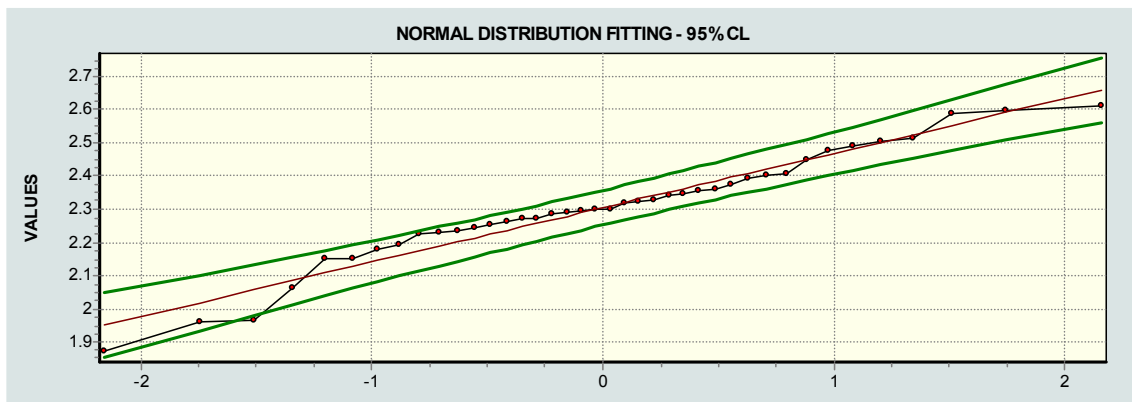


Figura 68. Serie de tiempo. Medición N° 6.

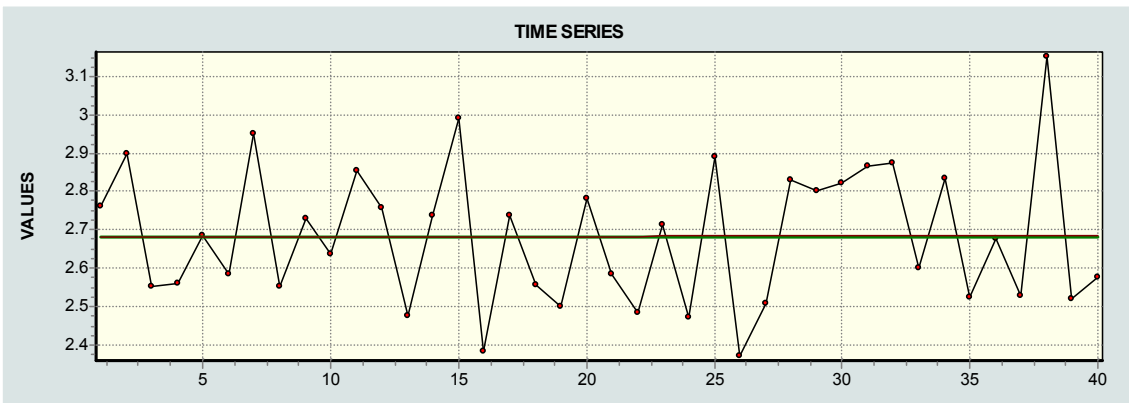


Figura 69. Correlograma. Medición N° 6.

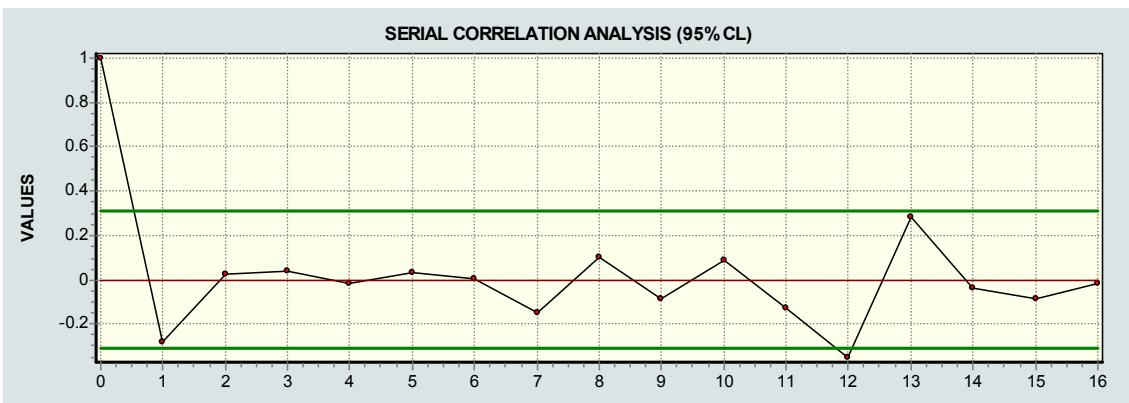


Figura 70. Ajuste a una función normal. Medición N° 6.

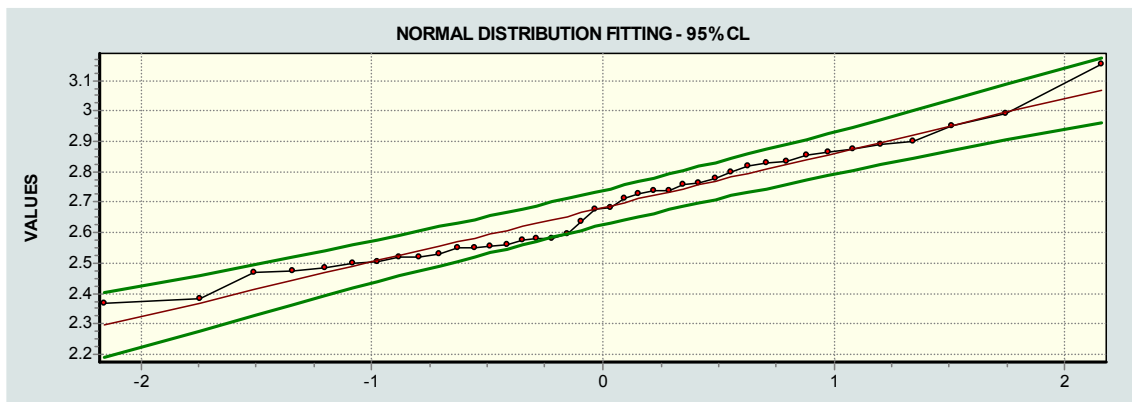


Figura 71. Serie de tiempo. Medición N° 7.

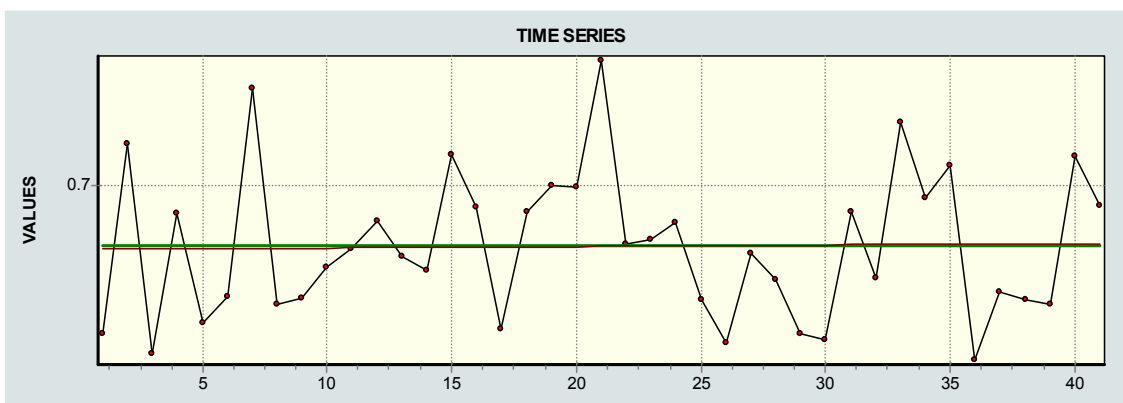


Figura 72. Correlograma. Medición N° 7.

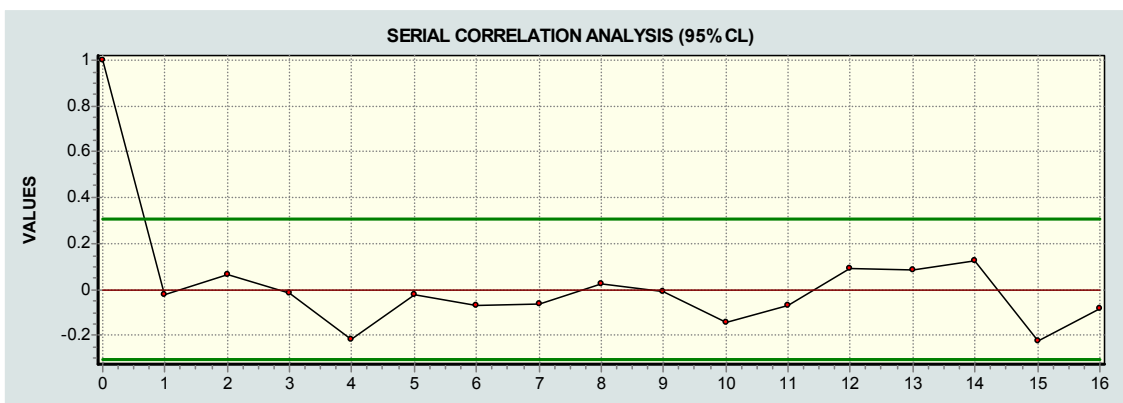
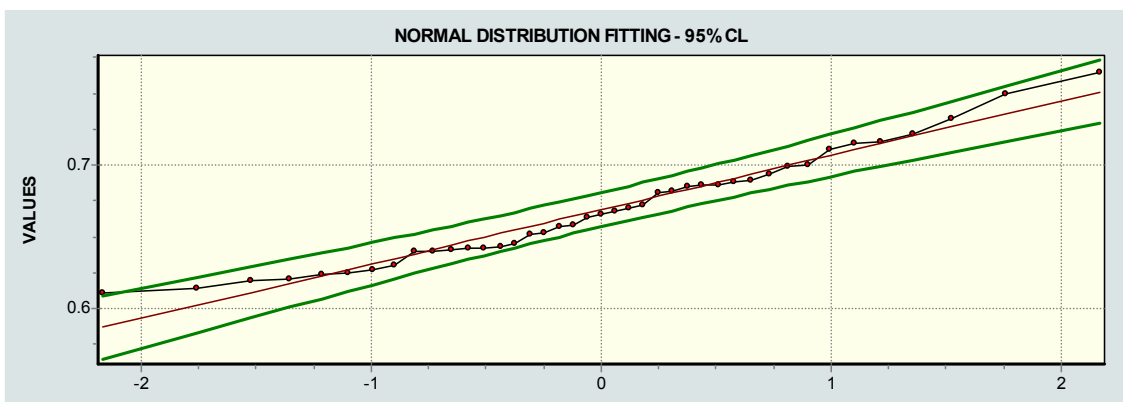
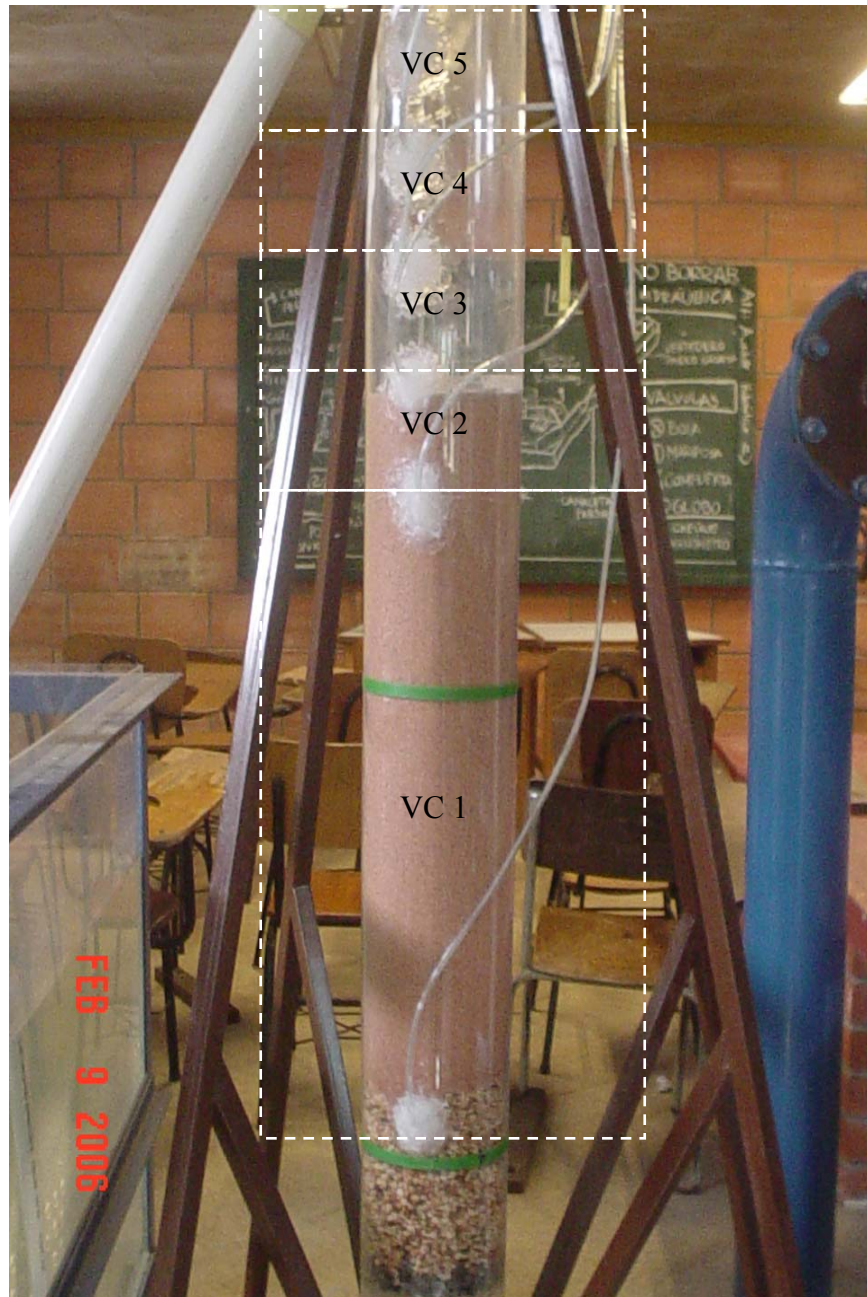


Figura 73. Ajuste a una función normal. Medición N° 7.



Los datos se analizaron por medio de ciertos volúmenes de control ubicados a lo largo del filtro delimitados por la altura de los piezómetros

Foto 5. Volúmenes de control.



Para confirmar las mediciones hechas; se utilizó la ecuación de continuidad en cada volumen de control; es decir:

$$F_1 - w - F_2 = \rho * Q * (V_2 - V_1) \quad (6-2)$$

Sabiendo que:

$$F = P * A \quad \gamma \quad F = \gamma * h * A \quad (6-3)$$

Donde:

$F_n$  = Fuerza aplicada en el punto n

w = peso del agua y de la arena dentro del volumen de control.

P = Presión

A = área

$\rho$  = Densidad del líquido

Q = caudal

$V_n$  = velocidad en el punto n

$\gamma$  = peso específico del líquido.

h = altura de la columna de agua en el piezómetro

La ecuación 6-2 queda:

$$A * \gamma * h_1 = A * \gamma * h_2 + w + \rho * Q * (V_2 - V_1) \quad (6-4)$$

$$h_1 = h_2 + \frac{w}{A * \gamma} + \frac{\rho * Q * (V_2 - V_1)}{A * \gamma} \quad (6-5)$$

Para el primer volumen de control ubicado como indica la figura

Foto 6. Volumen de control 1



Para la arena:

$$d_a = \frac{m_a}{V_a} \quad (6-6) \quad \text{y} \quad V_a = A * L \quad (6-7)$$

Donde

$d_a$  = Densidad de la arena (1424330 gr/m<sup>3</sup>)

$m_a$  = masa de la arena en gr

$V_a$  = Volumen de arena (0.01134 m<sup>3</sup>)

$A$  = área transversal del filtro (0.0189 m<sup>2</sup>)

$L$  = Altura del filtro (0.60 m)

$$m_a = d_a * A * L \quad (6-8)$$

$$m_a = 16152 \quad gr \quad (6-9)$$

Para el agua contenida dentro del volumen de control

$$m_w = d_w * V_v \quad (6-10)$$

$$V_v = V * \%vacios \quad (6-11)$$

Donde

$m_w$  = masa del agua

$d_w$  = densidad del agua

$V_v$  = volumen de vacíos

$V$  = volumen del filtro

$$V = 0.01134 * 0.4089 = 0.0046m^3 \quad (6-12)$$

$$m_w = 1E6 * 0.0046 = 4636.9gr \quad (6-13)$$

$$M_t = (m_a + m_w + m_w^*) * \frac{L}{L_e} \quad (6-14)$$

Donde

$M_t$  = Masa total del volumen de control.

L = Altura del filtro (0.60 m)

$L_e$  = Altura del lecho expandido

$m_w^*$  = masa de agua adicional; la cual se calcula así:

$$m_w^* = d_w * A * \frac{\varepsilon}{100} \quad (6-15)$$

Donde

$\varepsilon$  = Expansión en cm

Haciendo el procedimiento anterior para cada expansión como se muestra en la siguiente tabla

Tabla 32. Masa total del VC para cada expansión.

<b>EXPANSION (cm)</b>	<b>ma (gr)</b>	<b>mw (gr)</b>	<b>mw* (gr)</b>	<b>L (cm)</b>	<b>Le (cm)</b>	<b>L/Le</b>	<b>Mt (gr)</b>
0	16152	4636,9	0	60	60	1	20788,90
8	16152	4636,9	1512	60	68	0,8824	19677,26
15	16152	4636,9	2835	60	75	0,8000	18899,12
26	16152	4636,9	4914	60	86	0,6977	17932,26
36	16152	4636,9	6804	60	96	0,6250	17245,56
47,5	16152	4636,9	8977,5	60	107,5	0,5581	16613,80
60	16152	4636,9	11340	60	120	0,5000	16064,45

En el volumen de control comprendido entre los piezómetros 1 y 2, se considera que las velocidades  $V_1$  y  $V_2$  son iguales pues estos se encuentran por debajo del material filtrante el cual tiene características de densidad, porosidad y diámetro nominal uniforme; por tanto

$$\rho * Q * \frac{V_2 - V_1}{A * \gamma} = 0 \quad (6-16)$$

Entonces la ecuación 6-5 queda

$$h_1 = h_2 + \frac{w}{A * \gamma} \quad (6-17)$$

Tabla 33. Cálculo de la altura piezométrica  $h_1$ .

<b>E (cm)</b>	<b>masa (gr)</b>	<b>W (gr/cm2*sg2)</b>	<b>h2 (cm)</b>	<b>h1 (cm)</b>
0	20788,9	20373122	105,5	215,5
8	19677,2647	19283719,41	112	216,1
15	18899,12	18521137,6	116,5	216,5
26	17932,2558	17573610,68	121,8	216,7
36	17245,5625	16900651,25	125,6	216,8
47,5	16613,8047	16281528,61	129	216,9
60	16064,45	15743161	132,2	217,2

Se calcula el porcentaje de error entre las alturas  $h_1$  medidas en el laboratorio y las encontradas anteriormente y se obtiene:

Tabla 34. Porcentaje de error de h1

<b>h1 EXPERIMENTAL(cm)</b>	<b>h1 TEORICO(cm)</b>	<b>% ERROR</b>
219	215,494	1,601
223,5	216,113	3,305
224,5	216,495	3,566
225,5	216,680	3,911
226,1	216,846	4,093
226,4	216,904	4,194
226,6	217,197	4,150

Se considera que las mediciones tomadas en el laboratorio tiene una validez aceptable para el primer volumen de control.

No obstante al hacer el mismo procedimiento para los otros volúmenes de control; las condiciones hidráulicas cambian haciendo que la ecuación de continuidad no cumpla; arrojando datos de alturas h1 con un error elevado.

Para el primer volumen de control se hallaron las fuerzas de presión correspondientes a cada expansión sabiendo que  $1 \text{ psi} = 0.0703 \text{ kg/cm}^2$ .

Tabla 35. Presiones en el punto 1.

<b>EXPANSION (cm)</b>	<b>P1 (kg/m<sup>2</sup>)</b>	<b>P1 (psi)</b>
0	0.215	3.065
8	0.216	3.074
15	0.216	3.079
26	0.216	3.082
36	0.216	3.081
47.5	0.216	3.085
60	0.217	3.089

En la tabla anterior se puede observar claramente que las fuerzas de presión aumentan a medida que aumenta el porcentaje de expansión,

La expansión recomendada por el CEPIS oscila entre el 30 % y el 50%; para obtener una altura de lecho entre esos rangos se deben garantizar unas presiones entre 3.082 psi y 3.085 psi; siempre y cuando la altura libre  $H_L$  sea de 0.73 m y la altura del lecho  $L$ ; sea de 0.60 m.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El resultado granulométrico indica que el diámetro efectivo ( $d_e$ ) de la arena usada en el modelo, que es la misma que se utiliza en las plantas de tratamiento, es más fino en comparación a lo recomendado por el CEPIS. Al tener una arena de menor tamaño, el lecho tiende a expandirse más provocando quizá fuga de material en las canaletas de lavado. También provoca que el lecho se colmate rápidamente debido al menor porcentaje de vacíos entre los granos de arena, impidiendo que el agua a ser filtrada descienda, y por tanto; aumenta la pérdida de carga disminuyendo la carrera de filtro.

La expansión exagerada, no beneficia al lavado, pues impide el roce o frotamiento de los granos unos contra otros, evitando el desprendimiento de la película adherida a ellos (floc) durante el proceso de filtración, desfilfarrándose más agua durante el proceso de lavado.

Como se pudo demostrar en el análisis de presiones; no es recomendable hablar de la existencia de expansión del lecho cuando la velocidad de ascenso del agua sea mayor a la velocidad de sedimentación de la partícula; ya que como se menciona y se demostró con anterioridad, existe expansión aun cuando la velocidad de ascenso del líquido es menor que la velocidad de sedimentación del grano; por ello se verificó que a velocidades bajas las presiones son suficientes para producir expansión y por lo tanto lavado; al aumentar la velocidad, aumentan las presiones en el fondo del lecho haciendo que éste se expanda.

Se recomienda garantizar una fuerza de presiones entre 3.082 psi y 3.085 psi para alcanzar los rangos recomendados.

Debido a que se ha demostrado que para alcanzar la máxima expansión recomendada por el CEPIS se necesita cierta presión mensurable fácilmente, se recomienda construir el canal de desagüe unos centímetros por encima de la altura que alcanza el lecho para cumplir la expansión recomendada; ya que como se dijo anteriormente, las expansiones mayores no benefician el lavado pero si se incurre en gastos económicos importantes.

Para soportar la teoría de las presiones, es necesario recurrir a un análisis más detallado del comportamiento molecular de la partícula y el líquido en su recorrido a lo largo del filtro, para considerarlo así como un solo fluido de carácter mixto.

Este proyecto de investigación abre las puertas e invita al mismo tiempo a otros investigadores a que mejorando las condiciones en el laboratorio y basados en la certeza de encontrar resultados similares, mejoren la precisión y profundicen en el contexto de éste, para que el tema logre llevar un paso hacia delante y se puedan corregir los errores cometidos a través del tiempo.

## REFERENCIAS

ARBOLEDA, J., Teoría y Práctica de la Purificación del Agua. Tomo 2. Tercera Edición. Bogotá. Ed. McGraw Hill. 2000. 793p.

TEORÍA, DISEÑO Y CONTROL DE LOS PROCESOS DE CLARIFICACIÓN DEL AGUA. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Lima, 1981. 557 p

RIVAS, MIJARES, G. Tratamiento de Aguas Residuales. 2ª Edición. 534 p.

CEBALLOS, L.C. ZULUAGA, M.D. Evaluación de modelos de predicción de expansión de lechos filtrantes. TGD. Ingeniería Civil. Medellín. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. 2001. 120p.

CLEASBY, J.L y FAN, K., "Predicting Fluidization and Expansion of Filter Media", Journal of Environmental Engineering Division, ASCE. Vol 107, N° EE3. pp 456 – 471. Junio, 1981.

MUNERA, J.G. y QUINCENO, C.A., Retrolavado de Filtros Granulares. TGD Ingeniería Civil. Medellín. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. 1978. 99 p.