



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LLUVIA Y SU POTABILIZACIÓN
MEDIANTE EL USO DE LA DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA**

PRESENTA

INGRID ELIZABETH RUÍZ VELÁZQUEZ



CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX. AÑO 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: Sergio Adrián García González
VOCAL: Profesor: Gema Luz Andraca Ayala
SECRETARIO: Profesor: Alma Concepción Chávez Mejía
1er. SUPLENTE: Profesor: Alejandra Mendoza Campos
2° SUPLENTE: Profesor: David Frago Osorio

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, CDMX.

ASESOR DEL TEMA: 
DRA. ALMA CONCEPCIÓN CHÁVEZ MEJÍA

SUPERVISOR TÉCNICO: 
DR. RAFAEL MAGAÑA LÓPEZ

SUSTENTANTE: 
INGRID ELIZABETH RUÍZ VELÁZQUEZ

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México y Facultad de Química por su aceptación dentro de sus planteles e innumerables lecciones a lo largo de mi trayectoria académica. Así como al Instituto de Ingeniería por el uso de sus instalaciones y los conocimientos adquiridos durante el desarrollo de esta Tesis de Licenciatura, donde se efectuó el Proyecto “Aseguramiento de la Cantidad y Calidad del Agua Almacenada en Proyectos de Captación del Agua de Lluvia en México” II-UNAM Proy. 6335, el cual, brindó apoyo económico durante mi estancia.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| RESUMEN | 15 |
| I. INTRODUCCIÓN | 18 |
| II. ANTECEDENTES | 21 |
| 2.1 Agua en México | 21 |
| 2.2 Calidad de Agua en el país | 23 |
| 2.3 Precipitaciones pluviales..... | 27 |
| 2.4 Captación de agua de lluvia | 31 |
| 2.5 Calidad del agua de lluvia..... | 33 |
| 2.5.1 Contaminantes en el agua de lluvia | 36 |
| III. MARCO DE REFERENCIA | 38 |
| 3.1 Sistemas de captación de agua de lluvia | 38 |
| 3.2 Sistemas de potabilización de agua de lluvia | 39 |
| 3.2.1 <i>Sistemas de pretratamiento</i> | 41 |
| 3.2.1.1 <i>Filtro de arena</i> | 42 |
| 3.2.1.2 <i>Filtro de carbón activado granular</i> | 43 |
| 3.2.2 <i>Sistemas de desinfección</i> | 44 |
| 3.2.2.1 <i>Filtro de carbón activado granular impregnado con plata coloidal</i> | 44 |
| 3.2.2.2 <i>Filtro KDF (Kinetic Degradation Fluxion)</i> | 45 |
| 3.2.2.3 <i>Sistema de luz ultravioleta</i> | 45 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 3.3 | Legislación aplicable | 46 |
| 3.4 | Contaminantes en el agua | 47 |
| 3.5 | Partículas en agua para consumo humano | 52 |
| 3.6 | Tamaño de partícula..... | 53 |
| 3.7 | Medición de la distribución del tamaño de partícula (DTP) | 55 |
| 3.7.1 | <i>Método de zona de detección eléctrica (Principio Coulter)</i> | 59 |
| 3.7.2 | <i>Método de bloqueo de luz</i> | 59 |
| 3.7.3 | <i>Método de dispersión de luz</i> | 60 |
| 3.8 | Reseña histórica sobre el método Coulter | 61 |
| 3.9 | Mecanismo de funcionamiento del Método Coulter..... | 63 |
| IV. | DEFINICIÓN DEL PROBLEMA | 71 |
| 4.1 | Objetivos generales..... | 74 |
| 4.2 | Objetivos particulares | 74 |
| V. | METODOLOGÍA | 75 |
| 5.1 | Sitio de muestreo | 76 |
| 5.2 | Toma de muestras realizada en la Academia Mexicana de Ciencias | 77 |
| 5.3 | Sistema de tratamiento | 81 |
| 5.4 | Técnicas y métodos analíticos usados en la determinación de la calidad de agua..... | 86 |
| 5.4.1 | <i>Distribución del tamaño de partícula (DTP)</i> | 86 |
| 5.4.2 | <i>Absorbancia UV 254 nm (Abs UV 254 nm)</i> | 93 |
| 5.4.3 | <i>Carbón orgánico total (COT)</i> | 94 |

| | |
|---|-----|
| 5.4.4 Coliformes fecales y totales | 95 |
| 5.4.5 Color | 96 |
| 5.4.6 Demanda química de oxígeno (DQO) | 97 |
| 5.4.7 Potencial de hidrógeno (pH)..... | 97 |
| 5.4.8 Sólidos disueltos totales (SDT)..... | 98 |
| 5.4.9 Sólidos suspendidos totales (SST) | 99 |
| 5.4.10 Turbiedad | 100 |
| 5.5 Análisis estadístico | 101 |
| 5.5.1 Prueba de Grubbs..... | 102 |
| 5.5.2 Análisis de Varianza (ANOVA) | 102 |

VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS104

| | |
|--|-----|
| 6.1 Análisis de la distribución de tamaño de partículas (DTP), en agua de lluvia | 104 |
| 6.1.1 DTP en los puntos de muestreo "Fondo y Superficie" (F y S)..... | 104 |
| 6.1.2 DTP a lo largo de la temporada de lluvia..... | 106 |
| 6.1.3 DTP en el sistema de pretratamiento | 108 |
| 6.1.3.1 Filtro de arena (FA)..... | 109 |
| 6.1.3.2 Filtro de carbón activado (CA) | 111 |
| 6.1.4 DTP en el sistema de desinfección | 113 |
| 6.1.4.1 Filtro de carbón activado granular impregnado con plata coloidal (PC) | 114 |
| 6.1.4.2 Filtro KDF (Kinetic Degradation Fluxion)..... | 116 |
| 6.1.4.3 Sistema de luz ultravioleta (UV) | 118 |
| 6.1.5 DTP en el influente y las barreras de potabilización | 120 |

| | | |
|---------------|---|-----|
| 6.2 | Análisis de la calidad del agua de lluvia determinada por los parámetros físicos, químicos y biológicos | 124 |
| 6.2.1 | <i>Parámetros físicos</i> | 125 |
| 6.2.2 | <i>Parámetros químicos</i> | 127 |
| 6.2.3 | <i>Parámetros microbiológicos</i> | 128 |
| 6.2.4 | <i>Análisis gráfico de la caracterización del agua de lluvia</i> | 129 |
| 6.3 | Análisis estadístico de los resultados | 134 |
| 6.3.1 | <i>Prueba de Grubbs</i> | 134 |
| 6.3.2 | <i>Análisis de Varianza (ANOVA)</i> | 135 |
| 6.3.2.1 | <i>Variabilidad entre F y S</i> | 136 |
| 6.3.2.2 | <i>Variabilidad entre PC y UV</i> | 137 |
| 6.3.2.3 | <i>Variabilidad entre S y UV</i> | 139 |
| VII. | CONCLUSIONES | 142 |
| VIII. | COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES | 144 |
| IX. | REFERENCIAS | 145 |
| ANEXOS | | 154 |
| A1. | Metodología para el cálculo de disoluciones empleadas en el análisis de DTP | 154 |
| A2. | Manual de mantenimiento del contador de partículas Multisizer™ 3 Coulter Counter ® | 157 |
| A3. | Prueba de Grubbs. | 159 |

| | |
|--|-----|
| A4. Análisis de Varianza (ANOVA) | 160 |
| A4.1 ANOVA en los puntos fondo (F) y superficie (S)..... | 160 |
| A4.2 ANOVA en los puntos plata coloidal (PC) y lámpara de luz ultravioleta (UV)..... | 161 |
| A4.3 ANOVA en los puntos superficie (S) y lámpara de luz ultravioleta (UV) | 162 |
| A5. DTP presentada en forma diferencial | 163 |
| A5.1 Análisis diferencial en fondo y superficie..... | 163 |
| A5.2 Análisis diferencial en temporada de lluvia 2017-2018 | 163 |
| A5.3 Análisis diferencial en el sistema de pretratamiento | 164 |
| A5.4 Análisis diferencial en los sistemas de desinfección | 165 |
| A5.5 Análisis diferencial entre el influente y las barreras de potabilización.. | 166 |
| A6. Variabilidad en los análisis de DTP..... | 167 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 2.1. DISPONIBILIDAD SUPERFICIAL DEL AGUA EN LAS CUENCAS HIDROLÓGICAS..... | 23 |
| FIGURA 2.2. MAPA DE CALIDAD DEL AGUA SUPERFICIAL: DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO), 2017..... | 25 |
| FIGURA 2.3. MAPA DE CALIDAD DEL AGUA SUPERFICIAL: SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST), 2017..... | 26 |
| FIGURA 2.4. MAPA DE CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA: SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (SDT), 2017.. | 27 |
| FIGURA 2.5. BALANCE HIDROLÓGICO DEL AGUA EN MÉXICO, VALORES MEDIOS ANUALES MEDIDOS. | 29 |
| FIGURA 2.6. PRECIPITACIÓN PLUVIAL NACIONAL MEDIA EN (mm)..... | 30 |
| FIGURA 3.1. CONSTITUYENTES ORGÁNICOS TÍPICOS EN AGUA SUPERFICIAL SUS RANGOS DE TAMAÑO..... | 55 |
| FIGURA 3.2. EJEMPLOS DE PARTÍCULAS SIMULADAS..... | 56 |
| FIGURA 3.3. TÉCNICAS ANALÍTICAS USADAS PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA EN AGUA..... | 58 |
| FIGURA 3.4. DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DEL COULTER COUNTER.. | 64 |
| FIGURA 3.5. REPRESENTACIÓN DE EL PASO DE LAS PARTÍCULAS A TRAVÉS DE LA APERTURA Y LA GENERACIÓN DE PULSOS ELÉCTRICOS, SEGÚN EL TAMAÑO DE LA PARTÍCULA..... | 65 |
| FIGURA 3.6. EJEMPLO DE GRÁFICA DE ANÁLISIS DE DATOS (A).. | 67 |
| FIGURA 3.7. EJEMPLO DE GRÁFICA DE ANÁLISIS DE DATOS (B).. | 67 |
| FIGURA 5.1. DIAGRAMA DE TRABAJO.. | 75 |
| FIGURA 5.2. CLIMA CIUDAD DE MÉXICO, MÉXICO..... | 76 |
| FIGURA 5.3. AUDITORIO "GALILEO GALILEI", UBICADO EN LA ACADEMIA MEXICANA DE CIENCIAS. | 77 |
| FIGURA 5.4. RESERVORIO DEL AUDITORIO "GALILEO GALILEI".. | 78 |
| FIGURA 5.5. MUESTREO DE AGUA DE LLUVIA EN EL PUNTO S, UBICADO EN EL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE LA AMC..... | 79 |
| FIGURA 5.6. TOMA DE MUESTRAS PARA DTP EN FONDO Y SUPERFICIE DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE AGUA DE LLUVIA EN LA AMC. | 80 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 5.7. TOMA DE MUESTRAS DE LOS PUNTOS "F Y S" EN EL SITIO DE MUESTREO, PARA LA DETERMINACIÓN DE COLIFORMES FECALES Y TOTALES..... | 80 |
| FIGURA 5.8. DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO (DFP) DEL SISTEMA DE POTABILIZACIÓN PROPUESTO..... | 82 |
| FIGURA 5.9. SISTEMA DE POTABILIZACIÓN PILOTO. | 83 |
| FIGURA 5.10. MEDICIÓN DE FLUJO EN CADA SISTEMA DE DESINFECCIÓN..... | 83 |
| FIGURA 5.11. TOMA DE MUESTRAS DE CADA SISTEMA DE TRATAMIENTO..... | 84 |
| FIGURA 5.12. TOTALIDAD DE MUESTRA TOMADAS DE UNA BARRERA DE TRATAMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA..... | 85 |
| FIGURA 5.13. TOMA DE MUESTRAS DE LOS EFLUENTES PARA LA DETERMINACIÓN DE COLIFORMES FECALES Y TOTALES. | 85 |
| FIGURA 5.14. FILTRACIÓN DE LA SOLUCIÓN ISOTÓNICA 0.9% M/V..... | 87 |
| FIGURA 5.15. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS PARA SU ANÁLISIS.. | 88 |
| FIGURA 5.16. CURVA DE CALIBRACIÓN DEL BLANCO. | 89 |
| FIGURA 5.17. MEDICIÓN DE LAS MUESTRAS EN EL EQUIPO.. | 91 |
| FIGURA 5.18. MEDICIÓN DE LAS MUESTRAS EN EL EQUIPO Y GRÁFICA GENERADA POR EL SOFTWARE..... | 91 |
| FIGURA 5.19. CELDA PUESTA EN SOLUCIÓN LIMPIADORA | 93 |
| FIGURA 5.20. DETERMINACIÓN DE ABSORBANCIA UV_{254NM} | 94 |
| FIGURA 5.21. DETERMINACIÓN DE COT..... | 95 |
| FIGURA 5.22. DETERMINACIÓN DE COLIFORMES FECALES Y TOTALES.. | 96 |
| FIGURA 5.23. DETERMINACIÓN DE COLOR. | 96 |
| FIGURA 5.24. DETERMINACIÓN DE DQO.. | 97 |
| FIGURA 5.25. DETERMINACIÓN DE PH. | 98 |
| FIGURA 5.26. DETERMINACIÓN DE SDT USANDO UN MULTIPARÁMETRO. | 98 |
| FIGURA 5.27. DETERMINACIÓN DE SDT USANDO NMX-AA-034-SCFI-2015. | 99 |
| FIGURA 5.28. DETERMINACIÓN DE SST USANDO NMX-AA-034-SCFI-2015..... | 100 |
| FIGURA 5.29. DETERMINACIÓN DE TURBIEDAD. | 101 |
| FIGURA 6.1. DTP PROMEDIO EN LOS PUNTOS DE MUESTREO "FONDO Y SUPERFICIE" (JULIO 2017-ENERO 2018)..... | 105 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 6.2. DTP A LO LARGO DE TODA LA TEMPORADA DE LLUVIA (JULIO 2017- ENERO 2018) | 107 |
| FIGURA 6.3. COMPORTAMIENTO DE LA DTP EN EL FILTRO DE ARENA (FILTRO DE ARENA) Y GRAVA (JULIO 2017- ENERO 2018) | 110 |
| FIGURA 6.4. COMPORTAMIENTO DE LA DTP EN EL LECHO DE CARBÓN ACTIVADO (JULIO 2017- ENERO 2018) | 112 |
| FIGURA 6.5. COMPORTAMIENTO DE LA DTP EN EL FILTRO DE PLATA COLOIDAL (JULIO 2017- ENERO 2018) | 114 |
| FIGURA 6.6. COMPORTAMIENTO DE LA DTP EN EL SISTEMA KDF (JULIO 2017- ENERO 2018) | 117 |
| FIGURA 6.7. COMPORTAMIENTO DE LA DTP EN EL SISTEMA DE LUZ ULTRAVIOLETA (JULIO 2017- ENERO 2018) | 119 |
| FIGURA 6.8. DTP EN EL INFLUENTE S, RESPECTO A LOS EFLUENTES DE LAS BARRERAS DEL SISTEMA DE POTABILIZACIÓN (JULIO 2017- ENERO 2018) | 122 |
| FIGURA 6.9. EVALUACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS PARA LOS PARÁMETROS; ABSORBANCIA, COLIFORMES TOTALES, DQO Y SST | 131 |
| FIGURA 6.10. EVALUACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS PARA LOS PARÁMETROS; COLOR APARENTE Y VERDADERO, COT, PH Y TURBIEDAD | 132 |
| FIGURA 6.11. EVALUACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS PARA EL PARÁMETRO SDT | 133 |
| FIGURA 50. METODOLOGÍA REALIZADA PARA LAS DILUCIONES | 154 |
| FIGURA 51. ANÁLISIS PROMEDIO DIFERENCIAL EN "F Y S" | 163 |
| FIGURA 52. ANÁLISIS DIFERENCIAL EN TEMPORADA DE LLUVIA (JULIO 2017- ENERO 2018) | 163 |
| FIGURA 53 ANÁLISIS DIFERENCIAL EN FA | 164 |
| FIGURA 54. ANÁLISIS DIFERENCIAL EN CA | 164 |
| FIGURA 55. ANÁLISIS DIFERENCIAL EN PC | 165 |
| FIGURA 56. ANÁLISIS DIFERENCIAL EN KDF | 165 |
| FIGURA 57. ANÁLISIS DIFERENCIAL EN UV | 166 |
| FIGURA 58. ANÁLISIS DIFERENCIAL EN EL INFLUENTE "S", RESPECTO A LOS EFLUENTES DE LAS BARRERAS DEL SISTEMA DE POTABILIZACIÓN | 166 |
| FIGURA 59. VARIABILIDAD DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA EN CADA SISTEMA DE ESTUDIO | 167 |

FIGURA 60. VARIABILIDAD DEL NÚMERO DE PARTÍCULAS EN CADA SISTEMA DE ESTUDIO.167

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| TABLA 2.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL AGUA DE LLUVIA. VALORES EN mg/L, AL MENOS QUE ESTÉ INDICADO LO CONTRARIO. | 35 |
| TABLA 3.1. PROCESOS UNITARIOS POSIBLES A LLEVAR A CABO EN FUNCIÓN DE LOS CONTAMINANTES PRESENTES. | 40 |
| TABLA 3.2. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ADSORCIÓN DE COMPUESTOS PRESENTES EN EL AIRE. | 43 |
| TABLA 3.3 CONTAMINANTES CONVENCIONALES EN AGUA. | 49 |
| TABLA 3.4. COMPARACIÓN ENTRE UN CONTADOR DE PARTÍCULAS Y UN TURBIDÍMETRO. | 69 |
| TABLA 5.1. CONDICIONES DE OPERACIÓN ESTABLECIDAS DESPUÉS DE LA CALIBRACIÓN EN LA APERTURA DE 30 μ m. | 90 |
| TABLA 5.2. DILUCIONES REALIZADAS DURANTE EL ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS. | 92 |
| TABLA 6.1. VALORES CORRESPONDIENTES A LOS PARÁMETROS FÍSICOS MEDIDOS. | 125 |
| TABLA 6.2. VALORES CORRESPONDIENTES A LOS PARÁMETROS QUÍMICOS MEDIDOS. | 127 |
| TABLA 6.3. VALORES CORRESPONDIENTES A LOS PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS MEDIDOS. | 128 |
| TABLA 6.4. ANOMALÍAS ENCONTRADAS EN LA PRUEBA DE GRUBBS PARA DTP. | 134 |
| TABLA 6.5. ANOMALÍAS ENCONTRADAS EN LA PRUEBA DE GRUBBS PARA PARÁMETROS TRADICIONALES. | 135 |
| TABLA 6.6. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS PUNTOS FONDO (F) Y SUPERFICIE (S) DE LA DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS. | 136 |
| TABLA 6.7. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS PUNTOS FONDO (F) Y SUPERFICIE (S). | 136 |

| | |
|---|-----|
| TABLA 6.8. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS PUNTOS PLATA COLOIDAL (PC) Y LÁMPARA DE LUZ ULTRAVIOLETA (UV) DE LA DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS. | 137 |
| TABLA 6.9. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS PUNTOS PLATA COLOIDAL (PC) Y LÁMPARA DE LUZ ULTRAVIOLETA (UV)..... | 138 |
| TABLA 6.10. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS PUNTOS SUPERFICIE (S) Y LÁMPARA DE LUZ ULTRAVIOLETA (UV) DE LA DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS. | 139 |
| TABLA 6.11. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS PUNTOS SUPERFICIE (S) Y LÁMPARA DE LUZ ULTRAVIOLETA (UV)..... | 139 |
| TABLA A.1. VALORES DE ALFA DE ACUERDO CON EL NÚMERO DE DATOS. | 159 |
| TABLA A.2. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS PUNTOS FONDO (F) Y SUPERFICIE (S) DE LA DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS. | 160 |
| TABLA A.3. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS PUNTOS FONDO (F) Y SUPERFICIE (S). | 160 |
| TABLA A.4. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS PUNTOS PLATA COLOIDAL (PC) Y LÁMPARA DE LUZ ULTRAVIOLETA (UV) DE LA DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS. | 161 |
| TABLA A.5. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS PUNTOS PLATA COLOIDAL (PC) Y LÁMPARA DE LUZ ULTRAVIOLETA (UV)..... | 161 |
| TABLA A.6. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS PUNTOS SUPERFICIE (S) Y LÁMPARA DE LUZ ULTRAVIOLETA (UV) DE LA DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS. | 162 |
| TABLA A.7. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS PUNTOS SUPERFICIE (S) Y LÁMPARA DE LUZ ULTRAVIOLETA (UV)..... | 162 |

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

| | |
|--------------------------------|---|
| Abs UV_{254 nm} | ABSORBANCIA ULTRAVIOLETA 254 nm |
| AMC | ACADEMIA MEXICANA DE CIENCIAS |
| ADN | ÁCIDO DESOXIRIBONUCLEICO |
| ARN | ÁCIDO RIBONUCLEICO |
| AWWA | <i>AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION</i> |
| ANOVA | ANÁLISIS DE VARIANZA |
| cm⁻¹ | CANTIDAD DE LUZ EMITIDA POR CADA CENTÍMETRO DE ÁREA |
| CA | CARBÓN ACTIVADO |
| COT | CARBÓN ORGÁNICO TOTAL |
| NaCl | CLORURO DE SODIO |
| CF | COLIFORMES FECALES |
| CONAGUA | COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA |
| DBO₅ | DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO DESPUÉS DE 5 DÍAS DE LA TOMA DE MUESTRA |
| DQO | DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO |
| S | DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LA MUESTRA |
| DFP | DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO |
| d_{eq} | DIÁMETRO EQUIVALENTE |
| DTP | DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA |
| G | ESTADÍSTICA DE PRUEBA GRUBBS |
| FA | FILTRO DE ARENA |
| F | FONDO |
| FAO | <i>FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION</i> |
| P | FÓSFORO |
| °C | GRADOS CELSIUS |
| H₁ | HIPÓTESIS ALTERNA |
| H₀ | HIPÓTESIS NULA |
| INEGI | INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA |
| K ohms | KILO OHMS |
| KDF | <i>KINETIC DEGRADATION FLUXION</i> |
| LIA | LABORATORIO DE INGENIERÍA AMBIENTAL |
| L | LITRO |
| m/V | MASA POR UNIDAD DE VOLUMEN |
| μ₁ | MEDIA DE LA MUESTRA 1 |
| μ₂ | MEDIA DE LA MUESTRA 2 |
| m³ | METRO CÚBICO |
| μA | MICROAMPERIO |
| μL | MICROLITRO |
| μL/s | MICROLITRO POR SEGUNDO |
| μm | MICRÓMETRO |

| | |
|-------------------|--|
| mg/L | MILIGRAMO POR LITRO |
| mL | MILILITRO |
| mm | MILÍMETRO |
| nm | NANÓMETRO |
| N | NITRÓGENO |
| N°/L | NÚMERO DE PARTÍCULAS QUE HAY POR CADA LITRO DE MUESTRA |
| NMP/100 mL | NÚMERO MÁS PROBABLE EN 100 mL DE MUESTRA DE AGUA |
| ONU | ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS |
| OMS | ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD |
| PC | PLATA COLOIDAL |
| Pt/Co | PLATA/ COBALTO |
| % | PORCENTAJE |
| pH | POTENCIAL DE HIDRÓGENO |
| p | PROBABILIDAD |
| PROFECO | PROCURADURÍA FEDERAL DEL CONSUMIDOR |
| ̄ | PROMEDIO DE LA MUESTRA |
| REDOX | REDUCCIÓN-OXIDACIÓN |
| RAI | REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA |
| SDT | SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES |
| SST | SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES |
| S | SUPERFICIE |
| SAAM | SUSTANCIAS ACTIVAS AL AZUL DE METILENO |
| UV | ULTRAVIOLETA |
| UFC/100 mL | UNIDADES FORMADORAS DE COLONIAS POR CADA 100 mL DE MUESTRA DE AGUA |
| NTU | UNIDADES NEFELOMÉTRICAS |
| UPRM | UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO, RECINTO UNIVERSITARIO DE MAYAGÜEZ |
| US | UNIVERSIDAD DE SEVILLA |
| Xo | VALOR ATÍPICO |
| WHCF | <i>WALLACE H. COULTER FOUNDATION</i> |

RESUMEN

En éste trabajo se presentan los resultados obtenidos en el análisis de calidad de agua de lluvia considerando los parámetros convencionales y los obtenidos mediante la técnica de Distribución de Tamaño de Partícula o DTP, ambos análisis son realizados en las muestras antes y después del proceso de potabilización comprendido por varias barreras múltiples.

El trabajo busca ser un referente para estudios futuros en diversas condiciones de análisis de calidad de agua de lluvia, también busca emplear una nueva tecnología que mejore los procesos de tratamiento y potabilización de agua de lluvia destinada para el abastecimiento. La relación que pueda existir con los parámetros de calidad ya conocidos, es muy importante, pues al ser una técnica muy sensible, es posible obtener un análisis con mayor certeza y rapidez en los resultados arrojados

Así el presente trabajo evalúa la calidad de agua de lluvia, mediante técnicas no convencionales, a saber, la DTP. El agua de lluvia captada fue caracterizada antes y después de haber sido sometida un proceso de potabilización utilizando un sistema de barreras múltiples experimental, a base de un pretratamiento compuesto por un filtro de arena (FA) y un filtro de carbón activado (CA) para posteriormente pasar por una barrera de desinfección integrada por tres sistemas operados de manera paralela y compuesta por un filtro de plata coloidal (PC), un *Kinectic Degradation Fluxion* (KDF) y un sistema de luz Ultravioleta (UV). El sistema operó durante siete meses y se alimentó con el agua de lluvia previo su almacenaje. El desempeño del sistema se analizó con base en el comportamiento de los parámetros básicos como absorbancia UV_{254} , Carbón Orgánico Total (COT), Coliformes Fecales (CF), Coliformes Totales (CT), Demanda Química de Oxígeno (DQO), potencial Hidrógeno (pH), Sólidos Disueltos Totales (SDT), Sólidos Suspendidos Totales (SST) y turbiedad, algunos de ellos establecidos en la modificación de la NOM-127-SSA1-1994.

Adicionales a estos, y como parte elemental de la investigación, se determinó el comportamiento de la distribución del tamaño de partícula (DTP) antes y después de su potabilización.

Entre los resultados más importantes se encontró que el agua de lluvia presenta una variabilidad de las partículas entre 310 y 7 634 partículas/L, el primer valor corresponde a la época de lluvia y el segundo a la de estiaje. De éstas, el 90% se presentan en un tamaño $\leq 1.14 \mu\text{m}$.

En el pretratamiento a base de FA, se observa un incremento en el número de partículas de hasta 1.34 veces con respecto al de la entrada, sin embargo, las partículas remanentes se presentan en diámetros menores a $0.913 \mu\text{m}$, mientras que en el de CA se remueve la menos el 57% de ellas. Respecto a la barrera de desinfección compuesta por tres filtros operados de manera paralela, se encontró que el sistema de luz ultravioleta (UV_{254}), removi6 el 55.22%, el de plata coloidal (PC) el 44.94% y el de KDF s6lo el 13.75%, en todos los casos, las partículas que permanecen en el sistema, son menores a $0.83 \mu\text{m}$.

Con relación a los parámetros convencionales para las barreras de desinfección, el filtro con mejor desempeño fue el de PC en el cual se obtuvieron los porcentajes de remoción siguientes: 15.58% en color verdadero, 13.75% en SDT y 42.23% en turbiedad, cuya desviación estandar (S) corresponde a los valores 3.81, 80.3 y 1.09, respectivamente.

En cuanto a los análisis estadísticos realizados, las correlaciones lineales, entre la DTP y los parámetros convencionales analizados son nulas, 6nicamente se encontraron relaciones polin6micas y logarítmicas, con un factor $r \leq 0.8$, la falta de relación fue atribuido al tamaño tan pequeño que las partículas tienen en el agua de lluvia.

De esta manera, se establece que es posible utilizar el tamaño de partícula c6mo una herramienta de análisis para determinar la variabilidad del agua a lo largo del periodo de secas y lluvia, así como comparar la eficiencia de las barreras de

potabilización y con la ventaja de ser una técnica analítica que reduce el tiempo y costo en los análisis de calidad de agua tratada.

I. INTRODUCCIÓN

Los problemas del manejo del agua, la sobreexplotación del agua subterránea, la evapotranspiración, la contaminación de fuentes de agua por metales tóxicos y nutrientes, la intrusión de agua salina, entre otros, ponen de manifiesto la forma segmentada del manejo actual del recurso del agua (Jiménez, *et al.*, 2010), ante la situación por tener agua de calidad, se han desarrollado e implementado una serie de técnicas que permiten tener un mejor aprovechamiento del recurso hídrico, mejorando su calidad y conociéndola en tiempo real según el tipo de abastecimiento necesario.

Entre estas técnicas, destaca el conteo y el análisis de su distribución del tamaño de partículas que permite determinar la composición de las aguas naturales, la calidad del efluente de la planta de tratamiento, el agua de proceso y tratada. Del mismo modo, sirve como una herramienta para establecer algunos parámetros críticos para el diseño de los procesos de tratamiento y tomar decisiones sobre cambios en las operaciones (Clesceri, *et al.*, 1998).

De acuerdo con Miska, *et al.* (2006), la determinación del tamaño de partícula en agua es de suma importancia en los procesos de tratamiento usados actualmente para la producción de agua potable, en algunos procesos como la filtración o en donde es necesario el uso de membranas. Generalmente, el monitoreo y rendimiento para los procesos de filtración, es medido con la turbiedad, sin embargo, es importante cuantificar el tamaño de las partículas que puedan obstruir los sistemas.

Si bien, la distribución y conteo de tamaño de partícula no es una técnica generalizada en los tratamientos primarios, ya que se ha probado que es una herramienta de gran utilidad para caracterizar los efluentes de los tratamientos

secundarios y terciarios (Neis & Tiehm, 1997), citado por Chávez *et al.*, (2008), y se puede llegar a convertir en una herramienta útil al momento de definir un tren de tratamiento de potabilización de agua, sin la necesidad de recurrir a pruebas piloto, reduciendo así el uso de tiempo y costo (Chávez, *et al.*, 2008), así mismo, puede emplearse para optimizar el proceso de potabilización.

De esta manera, la Distribución de Tamaño de Partícula (DTP), permite clasificar a los contaminantes presentes en las muestras, de manera que los resultados arrojados son comparados con los parámetros tradicionales seleccionados como lo son absorbancia UV_{254nm}, Carbón Orgánico Total (COT), color, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Potencial de Hidrógeno (pH), turbiedad, entre otros, y medidos para determinación de la calidad inicial del agua captada, su clasificación puede ayudar a controlar los procesos de potabilización a los que será sometida el agua captada (Mesa, 2010) por lo que es una herramienta útil en cualquier sistema de tratamiento, donde es posible determinar características de parámetros biológicos y fisicoquímicos. De hecho, Chávez *et al.*, (2008), establece que la DTP, funciona como un método de medición indirecta de la calidad de agua potable para uso y consumo humano, y se puede aplicar tanto en residual como pluvial esta última proveniente de los sistemas de captación, método emergente para el abastecimiento ante la escasez de agua.

En este caso en particular, el comportamiento de la DTP es utilizada para conocer la calidad del agua de lluvia captada y almacenada, así como los cambios surgidos durante el proceso de potabilización en una planta piloto con la finalidad de determinar el desempeño que cada barrera de tratamiento tiene a lo largo de su operación, lo que motivó el desarrollo de esta tesis.

De esta manera, se presenta la variabilidad de la calidad del agua de lluvia que se pretende utilizar como un método alternativo a la demanda de abastecimiento de agua debido al incremento que la población tiene año con año, así como el acceso limitado al agua potable que se tiene en algunos lugares

haciendo referencia a la población del país (Torres, *et al.*, 2011), considerando la técnica de DTP para evaluar dicha calidad del agua antes y posterior a su potabilización.

II. ANTECEDENTES

La necesidad que los seres humanos tienen sobre el uso y consumo de agua potable es fundamental para el desarrollo de las sociedades (Mesa, 2010). Desde siempre, se contempló cuán importante es la presencia de esta sustancia, pues los usos que se le puedan otorgar de manera detallada, son incalculables. El aumento de población, la mejora de las condiciones de vida, el desarrollo de las técnicas industriales, etc. han hecho que el abastecimiento de agua sea cada vez más vital, lo cual incrementa la necesidad de una utilizar las aguas superficiales y subterráneas (Durand, *et al.*, 2005). Dado lo anterior, la calidad y el desalojo del agua en los centros urbanos de los países económicamente emergentes constituyen grandes retos por resolver (Gómez Reyes, 2013).

El agua es un elemento trascendente para la vida, su disponibilidad para el uso marca las tendencias de la sociedad. Sin embargo, no todas las poblaciones tienen acceso al agua potable, en efecto, se estima que sólo el 60% de la población mundial tiene acceso al agua potable, de ahí que en muchos lugares se convierta en un factor estratégico (Eurona, 2018). Debido a que gran parte de las actividades humanas dependen de la disponibilidad espacial y temporal de este recurso, ejerce una gran influencia sobre la localización e intensidad de numerosas actividades productivas (como factor de producción agrícola, industrial y energética, como medio de transporte, como canalizador de los residuos urbanos e industriales, etc. (Mateos, 2005).

2.1 Agua en México

Dentro de un total de 1960 millones de km² correspondientes al territorio mexicano, la población asciende a 119.5 millones de habitantes, con una tasa de crecimiento

anual del 1.4%¹. Como en otros países del mundo, México enfrenta problemas que obligan a hacer una administración mejor para satisfacer las demandas de sus habitantes, entre ellos destacan la escasez, la contaminación del recurso, la necesidad de mejorar la administración del agua, la falta de ordenamiento ecológico, el impacto del cambio climático sobre el ciclo hidrológico y la poca inversión en investigación y desarrollo tecnológico en el país (Jiménez, *et al.*, 2010), sabemos que el 77% del agua se utiliza en la agricultura, 14% para abastecimiento público, 5% para generación de energía por medio de plantas termoeléctricas y 4% para la industria (Jiménez, *et al.*, 2010), siendo insuficiente la disponibilidad superficial del agua que el país posee.

La Comisión Nacional de Agua (CONAGUA) el 27 de Mayo de 2016, presentó una disponibilidad de 757 cuencas², de las cuales 649 se encontraron en situación de disponibilidad, como se muestra en la Figura 2.1.

¹ FUENTE:

INEGI. Población total/Volumen y Crecimiento /Entidad federativa 1895 a 2010.

INEGI. Encuesta Intercensal 2015

² De acuerdo a (CONAGUA, 2018), las cuencas son unidades naturales del terreno, definidas por la existencia de una división de las aguas superficiales debida a la conformación del relieve.

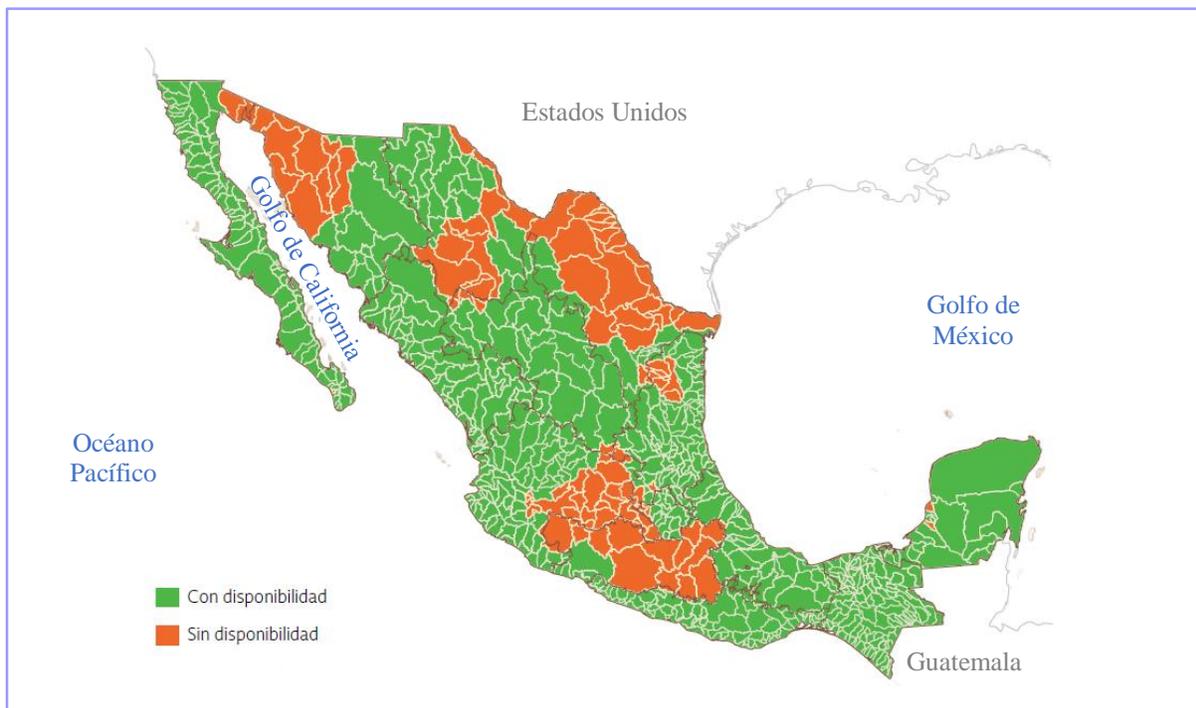


FIGURA 2.1. DISPONIBILIDAD SUPERFICIAL DEL AGUA EN LAS CUENCAS HIDROLÓGICAS.
FUENTE: ELABORADO CON BASE EN CONAGUA (2016B).

2.2 Calidad de Agua en el país

La creciente escasez del recurso de agua potable y la desconfianza que los usuarios han ido adquiriendo, pagando un alto costo por agua embotellada, en lugar de pagar los servicios que se tienen disponibles, ha provocado que el tema de calidad de Agua en México gane terreno en los espacios de discusión pública (Jiménez, *et al.*, 2010).

El concepto de calidad del agua es un término abstracto, su medición se logra definiendo el uso que se le dará, así como asociando parámetros y valores a éste. Existe una gran dificultad al momento de seleccionar los parámetros adecuados, por una parte, deben ser relevantes para una situación específica y, por otra, viable de medir desde un punto de vista técnico, económico e Institucional, es necesario

conocer qué parámetros afectan el uso del agua debido a que existen compuestos contaminantes en ella³ (Jiménez, *et al.*, 2010).

De acuerdo a la ONU (2016), la calidad de agua es determinada mediante la caracterización física y química de una muestra, comparando los datos obtenidos con normas y estándares de calidad. De esta manera, es posible asociar si el agua es idónea para los requerimientos de calidad según el uso que le sea asociado, como el consumo humano, citado por CONAGUA (2018).

En los cuerpos de agua de México, la evaluación de la calidad se lleva a cabo utilizando cuatro indicadores: Coliformes Fecales (CF), Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO), y Sólidos Suspendidos Totales (SST). La DBO₅ es indicador de la cantidad de materia orgánica biodegradable, mientras que los CF se distinguen por ser bacterias aerobias y anaerobias facultativas, gram negativas, no esporuladas, de forma de bacilo corto, que fermentan lactosa con producción de gas en 48 horas a 35 °C, por asociación son indicadores de la presencia de aguas residuales (CONAGUA, 2017).

Con referencia en lo anterior, en éste estudio únicamente se considera la medición de los parámetros DQO y SST para su análisis.

La Figura 2.2 presenta el monitoreo del parámetro DQO (mg/L) de la Red Nacional de Monitoreo en el 2017, el cual representa la cantidad de materia orgánica presente. Se muestra en el mapa que gran parte del territorio cuenta con calidad aceptable según los requerimientos para agua superficial, sin embargo, en la zona centro se observan grandes manchas con calidad que va desde contaminada a fuertemente contaminada.

³ Tan sólo de origen antropogénico se estima que son por lo menos unos 700,000 compuestos los que se pueden encontrar en el agua (Jiménez, *et al.*, 2010).

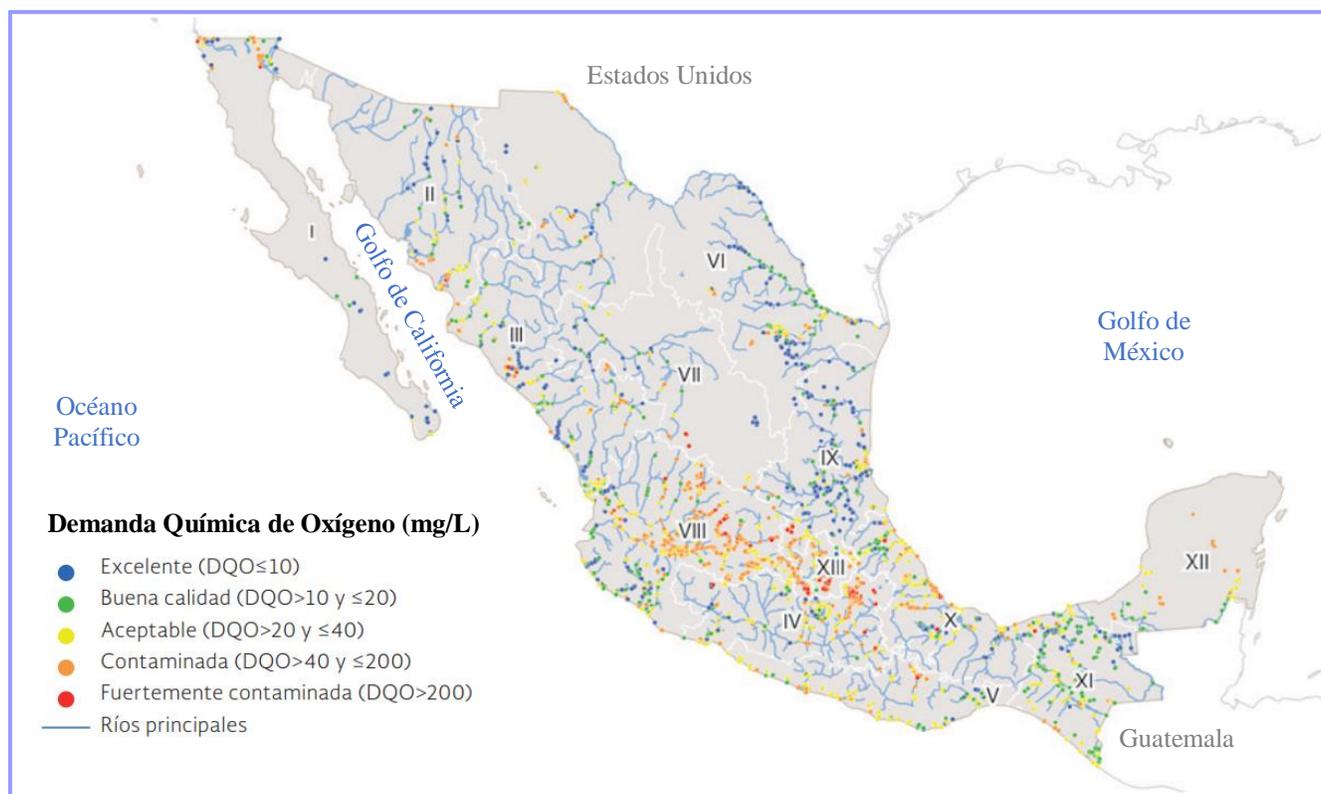


FIGURA 2.2. MAPA DE CALIDAD DEL AGUA SUPERFICIAL: DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO), 2017.
FUENTE: CONAGUA (2017B).

La Figura 2.3 presenta el estudio para el parámetro SST de la misma fuente de información, en el que es posible cuantificar la cantidad de sólidos sedimentables, sólidos y materia orgánica en suspensión y/o coloidal. Para este análisis, se muestra que se tiene una calidad excelente en cuanto a SST, cuyo valor es menor o igual que 25 mg/L en el agua superficial.

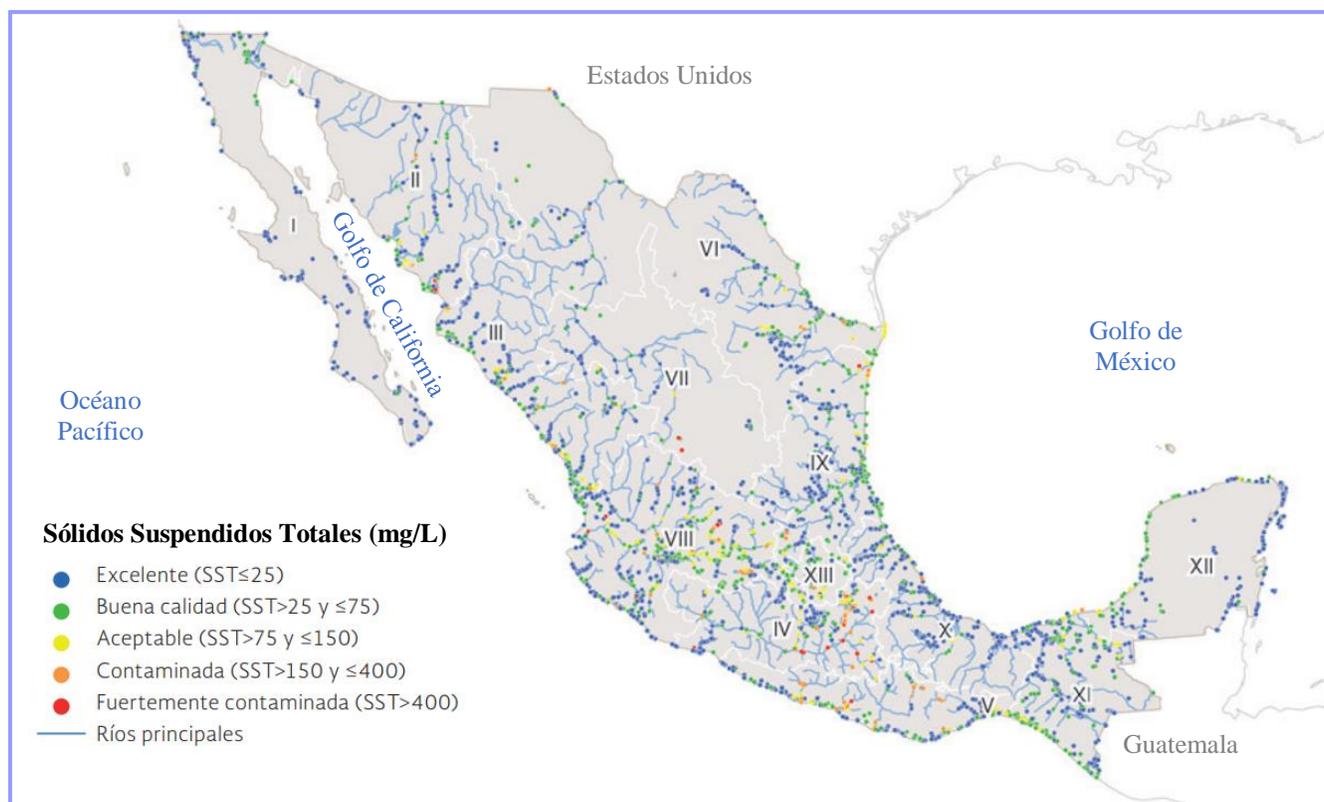


FIGURA 2.3. MAPA DE CALIDAD DEL AGUA SUPERFICIAL: SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST), 2017.
FUENTE: CONAGUA (2017B).

Por otro lado, los SDT permiten evaluar la salinización de las aguas subterráneas, que de acuerdo con su concentración se clasifican en dulces (menor a 1000 mg/L), ligeramente salobres (1000 - 2000 mg/L), salobres (2000 - 10000 mg/L) y salinas (más de 10000 mg/L). El monitoreo realizado por CONAGUA (2017) se observa en la Figura 2.4, indicando que, en su mayoría, el agua subterránea pertenece a la clasificación de agua dulce, la cual representa el 60% del total evaluado.

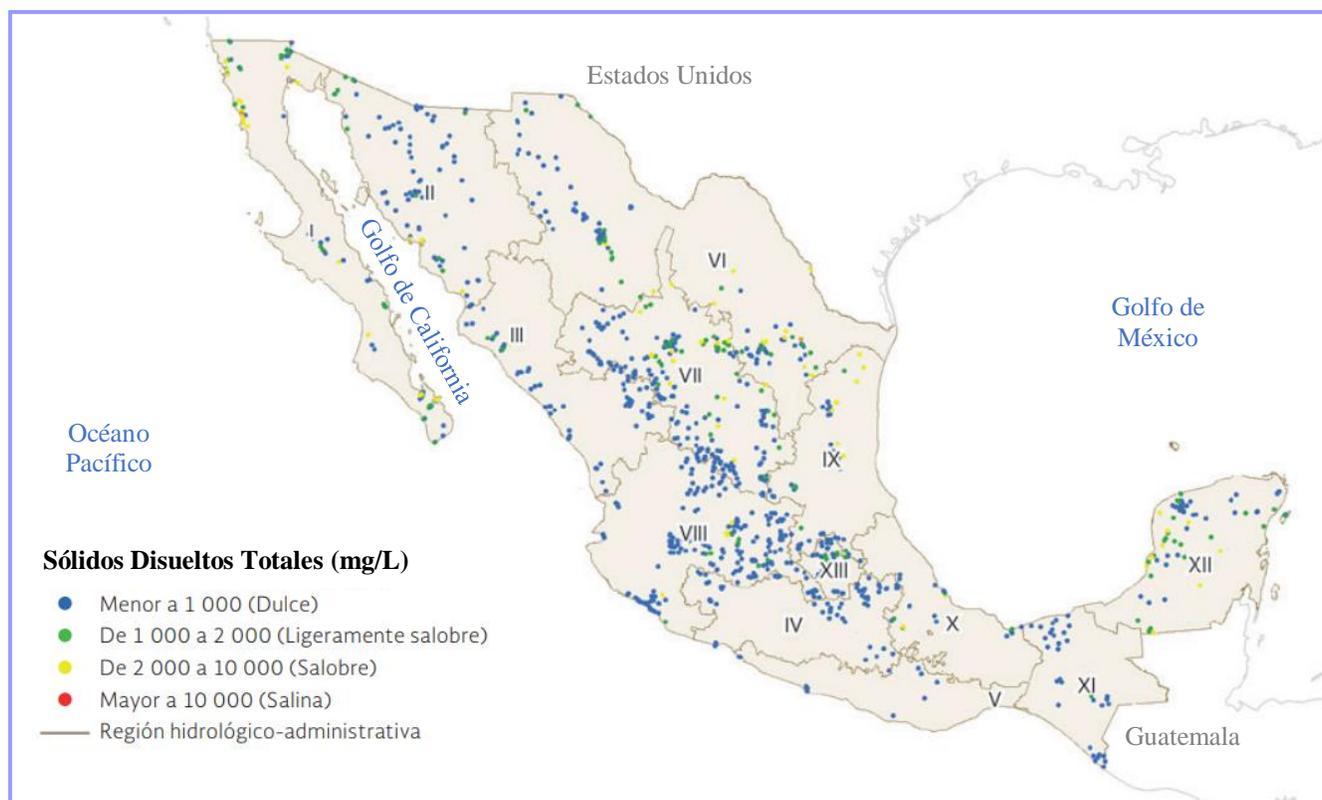


FIGURA 2.4. MAPA DE CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA: SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (SDT), 2017.
FUENTE: CONAGUA (2017B).

Si bien en los mapas mostrados es posible observar que la calidad de agua superficial y subterránea en su mayoría se encuentra en buen estado, es necesario buscar otras alternativas de abastecimiento de agua para evitar la sobreexplotación de los mantos y cuencas existentes en el país, ya que la demanda de agua que la población requiere, cada vez es mayor y se ve reflejado en el aumento que la población presenta anualmente, no solo del país, sino de todo el mundo.

2.3 Precipitaciones pluviales

Cada año en México se reciben 1 449 471 millones de hectómetros cúbicos de agua en forma de precipitación pluvial (CONAGUA, 2018). Del total de esta agua, se estima que el 72.2% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 21.5% escurre

por los ríos o arroyos, y el 63% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. Si se toma en cuenta los flujos de salida y entrada de agua con los países vecinos, el país cuenta anualmente con 451 585 millones de metros cúbicos de agua dulce renovable, donde los flujos de entrada representan el volumen de agua que escurre hacia nuestro país, generado en las cuencas transfronterizas que comparte México con sus países vecinos (Estados Unidos de América, Guatemala y Belice), los flujos de salida representan el volumen de Agua que México debe entregar a Estados Unidos de América conforme al “Tratado de Aguas de 1944”⁴ (CONAGUA, 2018), lo anterior se muestra en la Figura 2.5, donde se muestra el agua renovable que aproximadamente se tiene.

⁴ Tratado relativo al aprovechamiento de las aguas entre el Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos y el Gobierno de los Estados Unidos de los ríos Colorado, Tijuana y Bravo, desde Fort Quitman, Texas, hasta el Golfo de México. Establece la asignación de las aguas de los ríos Bravo y Colorado, otorgando 2/3 partes a México y 1/3 a Estados Unidos.

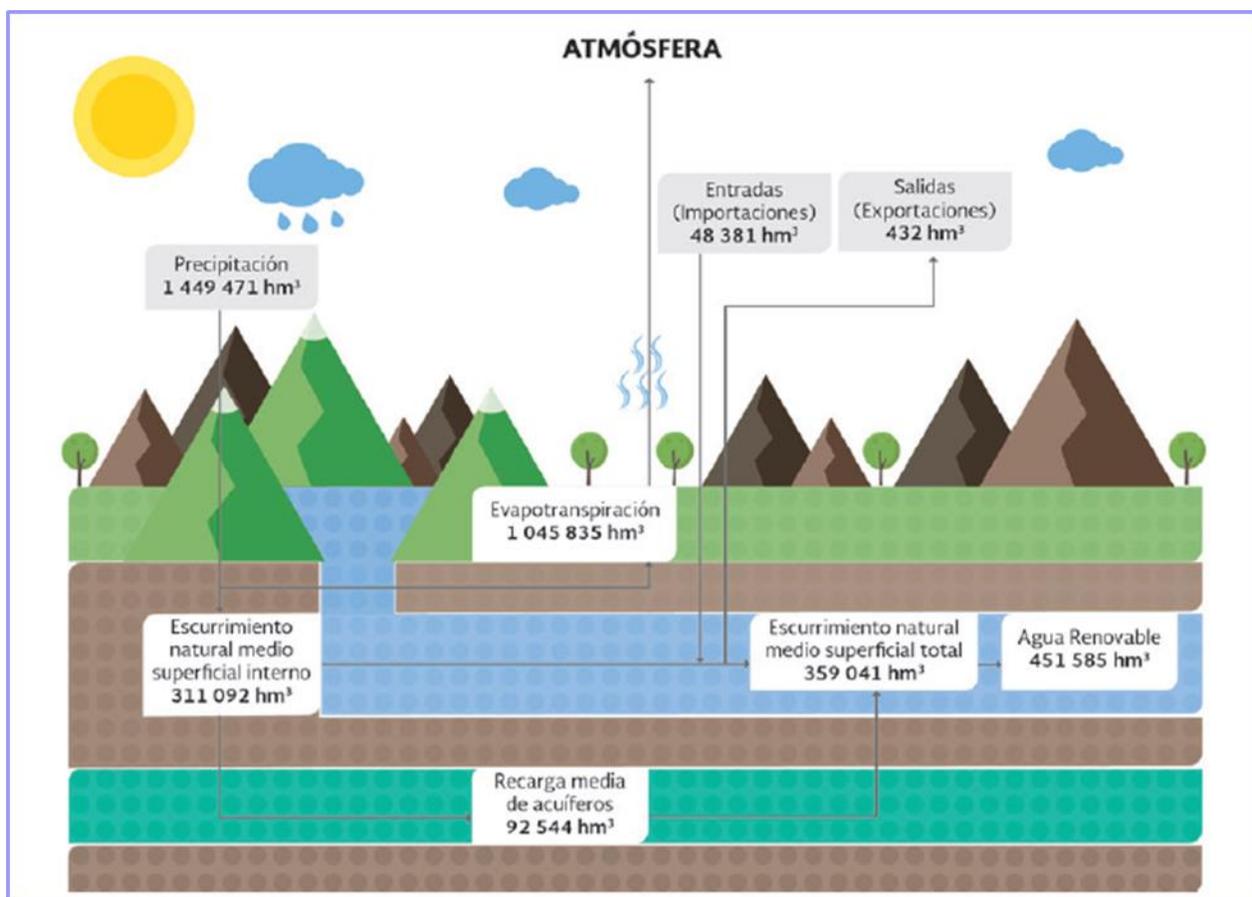


FIGURA 2.5. BALANCE HIDROLÓGICO DEL AGUA EN MÉXICO, VALORES MEDIOS ANUALES MEDIDOS.
FUENTE: CONAGUA (2017B).

El balance hidrológico reportado por CONAGUA 2016, corresponde el total de entradas y salidas de agua al territorio mexicano, se destaca que la precipitación medida para el año 2017 fue de 818 mm, ver Figura 2.6, un valor considerable como recurso alternativo al problema de abastecimiento de agua en el país, así mismo podemos constatar que en 16 años, el valor mínimo presentado de precipitación pluvial es de 697 mm anual, en el mundo, México ocupa el lugar número 93 entre los países con mayor agua disponible per cápita (CONAGUA, 2018).

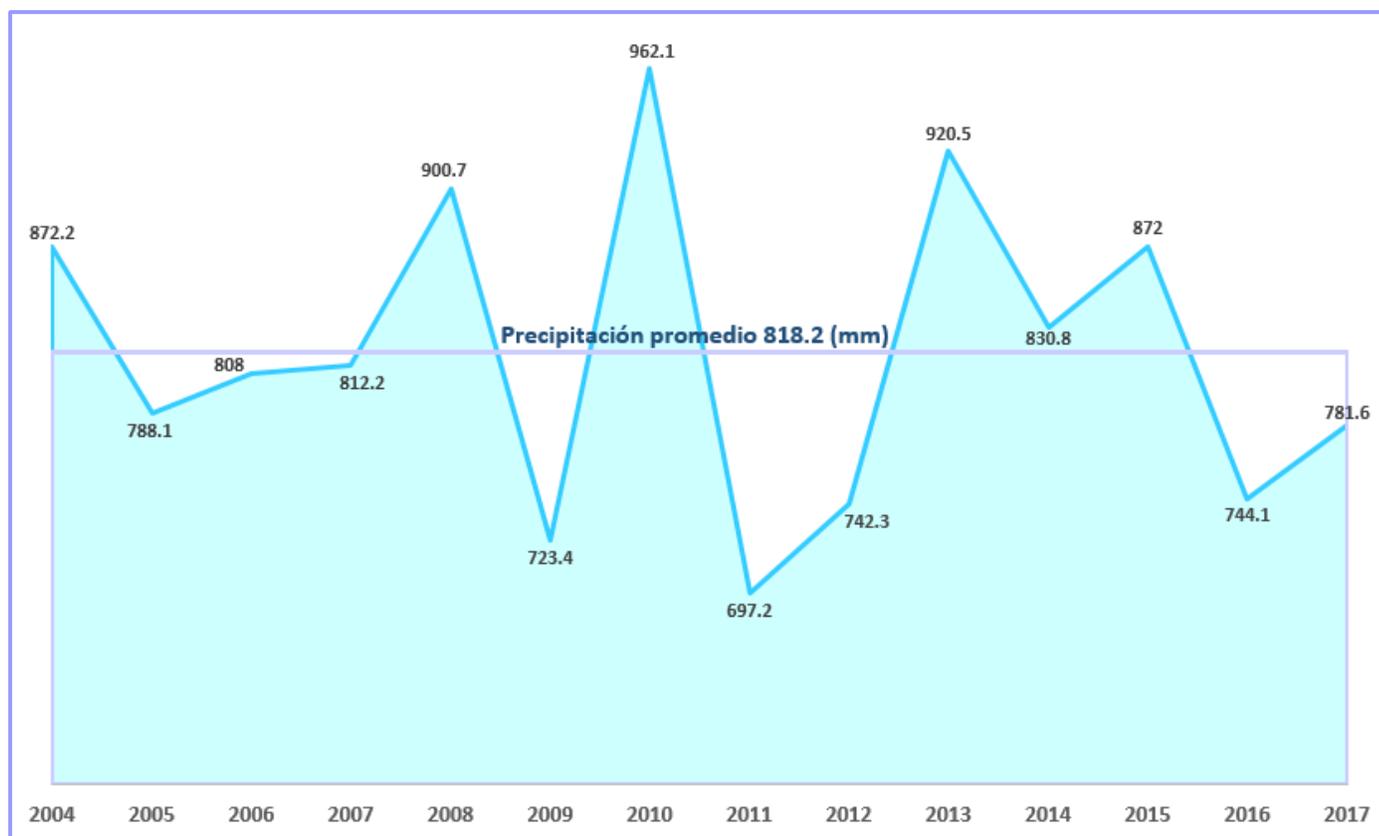


FIGURA 2.6. PRECIPITACIÓN PLUVIAL NACIONAL MEDIA EN (mm).

FUENTE: DATOS OBTENIDOS DEL SISTEMA METEOROLÓGICO NACIONAL, CONAGUA (2018) Y ELABORACIÓN PROPIA.

La precipitación pluvial, constituye una parte importante de ciclo hidrológico ya que en ella se da la producción de agua renovable existente, la precipitación pluvial varía regional y estacionalmente (CONAGUA, 2011), en la mayor parte del territorio mexicano la temporada de lluvias ocurre entre los meses de mayo a octubre, con excepción de la región Noroeste, Centro y Vertiente del Pacífico del país, comprendiendo los estados de Baja California, Sonora, Coahuila, Zacatecas, Jalisco, Michoacán, Querétaro y Guerrero. De acuerdo con la CONAGUA y sus registros del período 2000-2011, en éste se acumula hasta el 80% de la precipitación total anual (FCEA, 2018).

La intensidad de las aguas de lluvias es variada debido al comportamiento de los fenómenos meteorológicos en la región, lo que conlleva periodos de baja y alta precipitación (Ospina & Ramírez, 2014).

La cantidad de agua disponible en alguna región, depende básicamente de la precipitación con la que cuenta y medida con el pluviómetro⁵, donde los datos se toman diariamente y a la misma hora, siendo comparados con los datos de las estaciones meteorológicas más cercanas. La precipitación está constituida por: duración (tiempo total de precipitación), intensidad (volumen de precipitación por unidad de tiempo) y frecuencia (el número de precipitaciones en un tiempo dado y con determinadas características), (FAO, 2013)⁶.

2.4 Captación de agua de lluvia

Entre las alternativas a la necesidad de abastecimiento para uso y consumo humano, es posible considerar el agua de lluvia captada por sistemas que, entre sus características, tienen la capacidad de almacenar grandes cantidades de agua, posteriormente es sometida a procesos de potabilización que la hacen apta según sus requerimientos, evaluando la calidad del agua captada, (Gishi, *et al.*, 2009; Torres, *et al.*, 2011).

El agua de lluvia se ha convertido en una alternativa interesante en países que se encuentran en desarrollo, la principal razón es el bajo costo de operación que se encuentra asociado (Torres, *et al.*, 2011). Se han reportado casos exitosos sobre la implementación de ésta técnica tanto en Asia como en Latinoamérica (Gishi, *et al.*, 2009), donde no necesariamente su uso es para las necesidades domésticas y de consumo como agua potable.

⁵ Un pluviómetro es un dispositivo usado para medir la cantidad de precipitación caída durante un cierto tiempo. La idea base está en que la lluvia se mide por la cantidad de milímetros que alcanzaría el agua en un suelo perfectamente horizontal, que no tuviera ningún tipo de filtración o pérdida. La OMM (Organización Meteorológica Mundial) recomienda una serie de normas destinadas a que las medidas, por una parte, tengan la adecuada precisión y por otra, sean capaces de evitar múltiples errores que harían inviables y absurdas las medidas (Aparicio, 2018).

⁶ FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura).

La captación del agua de lluvia se lleva a cabo en los techos, donde es conducida mediante un sistema de canales y filtros (que se encargan de eliminar impurezas gruesas) a depósitos donde el agua es almacenada hasta el momento en que será utilizada (Rodríguez, 2009). Tiene como prioridad destinarse a consumo humano y utilización doméstica, pues la calidad inicial del agua captada es buena en comparación con otros sistemas de captación (FAO, 2013).

La captación de agua de lluvia ofrece tener agua limpia comparándola con otras fuentes de agua dulce disponibles, de esta forma, se considera así, un recurso gratuito e independiente de empresas suministradoras e infraestructura sencilla para su captación y almacenamiento, ya que el sistema de captación permite almacenar el agua y posteriormente someterla a un tratamiento para utilización como consumo humano (Rodríguez, 2009).

En diferentes lugares del mundo se realizan proyectos sobre captación de agua de lluvia, por ejemplo en Asia, países como China y Singapur buscan recursos alternativos para el aprovechamiento de agua de lluvia, ya que la mayoría de su población vive en edificios y sus techos son utilizados como sistemas de captación, en Tokio el agua de lluvia se aprovecha para disminuir la escasez de agua y controlar inundaciones (Ballen, *et al.*, 2006), en Alemania, Canadá, España y Estados Unidos, disponen del aprovechamiento de agua de lluvia cuyos sistemas cuentan con el tratamiento adecuado para el abastecimiento y utilización del recurso en prácticamente todas las actividades incluyendo consumo humano (Rodríguez, 2009).

Los sistemas de captación y el aprovechamiento del agua de lluvia han sido, son y serán la base para el desarrollo sostenible de los recursos naturales y el bienestar de la humanidad (Anaya, 2002), citado por Ventura, *et al.*, (2014), es importante preservar el agua para garantizar el suministro en el futuro, además de buscar fuentes alternativas para uso doméstico y riego como el agua de lluvia, siempre y cuando su uso sea de bajo riesgo a la salud humana (Ospina & Ramírez, 2014).

Los sistemas de captación de aguas de lluvia son un método alternativo, de necesidades no cubiertas, sea por escasez, por el no acceso a servicios básicos o para aprovechar los recursos naturales, que pueden dar como beneficio paralelo el ahorro, pues es gratuito, su única inversión es el diseño y construcción del sistema y su mantenimiento (Rodríguez, 2009).

2.5 Calidad del agua de lluvia

La problemática de la caracterización del agua de lluvia ha sido motivo de estudio en diferentes países, para el caso de Chile, la investigación adelantada por Montt, *et al.*, (2003) sobre la calidad del agua de lluvia urbana de Santiago consistió en el monitoreo de las lluvias de 12 lugares de la ciudad, (Ospina & Ramírez, 2014). En la ciudad de Bogotá, se llevó a cabo el estudio de la escorrentía pluvial sobre techos y tejados, donde, no se obtuvo una calidad aceptable del agua de lluvia debido a valores de turbiedad superiores a 5 NTU y concentraciones de SST mayores a 30 mg/L y Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días (DBO₅) por encima de 10 mg/L, sin embargo, se recomienda llevar a cabo una caracterización con mayor detalle, con el fin de identificar el origen de la contaminación y proponer soluciones a manera de lograr obtener las condiciones óptimas para su aprovechamiento (Torres, *et al.*, 2011).

La realidad es que no se puede arrojar un diagnóstico estandarizado sobre la calidad del agua de lluvia que se recolecta, el clima, frecuencia de lluvias, materiales para su captación, vegetación y ubicación geográfica, son algunos de los factores que interactúan dentro de la variabilidad de la calidad del agua. Pero se ponen de manifiesto los estudios que se han ido realizando en diferentes zonas, Tabla 2.1.

De acuerdo con el análisis realizado por (DeBusk & Hunt, 2014), los resultados resumidos en la Tabla 2.1 muestran la influencia del desarrollo humano en el pH presente en la lluvia ácida, por otro lado, el valor de pH más alto, lo tiene la Isla de Kefalonia, Grecia, cuyo valor es de 8.31, los autores Sazali, *et al.*, (2007) atribuyen este valor de pH al estado contaminado de la región, lo cual indica el bajo tráfico y actividad industrial, así como pocas emisiones agrícolas, sin olvidar la influencia que el medio marino tiene sobre éste. A ello se le conoce como condiciones atmosféricas relativamente limpias. Para los SST los estudios realizados en Nigeria por Adeniyi & Olabanji, (2005) produjeron resultados asociados a la quema de arbustos agrícolas y el polvo movilizado por el tráfico de vehículos. En cambio, en Malasia Yaziz, *et al.*, (1989), reportan los SST con referencia en la concentración de contaminantes atmosféricos en las carreteras muy transitadas, el sitio se encontraba confinado geográficamente de tal manera que la dispersión de los contaminantes fue limitada, incluso en presencia de viento.

TABLA 2.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL AGUA DE LLUVIA. VALORES EN mg/L, AL MENOS QUE ESTÉ INDICADO LO CONTRARIO.

FUENTE: TABLA ADAPTADA DE DEBUSK & HUNT, (2014).

| REFERENCIA | UBICACIÓN | pH | CONDUCTIVIDAD (μS) | TURBIEDAD (NTU) | SST | SDT | NITRÓGENO TOTAL | NH ₄ ⁺ - N | NO ₂ ⁻ -N | NO ₃ ⁻ -N | FOSFORO TOTAL | PO ₄ | SO ₄ ²⁻ |
|--------------------------------------|--------------------------------|-------|--------------------|-----------------|------|------|-----------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------|-----------------|-------------------------------|
| Adeniyi & Olanbaji (2005) | Ile-Ife, Nigeria | 6.68 | 10.4 | 6.3 | 20.1 | 19.3 | | 0.05 | | 0.86 | | | 0.5 |
| Avila & Alarcón (1999) ^c | Catalonia, España | 6.4 | 18 | | | | | 0.41 | | 1.28 | | | 2.21 |
| Chang and Crowley (2004) | Nacogdoches, Texas | | | | | | | 0.584* | | | | 0.04* | |
| Chang et al. (2004) | Nacogdoches, Texas | 5.55 | 27.6 | | | | | | | | | | |
| Hamdan (2009) | Alemania | 5.1 | 49.8 | | | | | | | 1.061 | | | 9.6 |
| He et al. (2011) | Singapur | | | | | | 0.643 | 0.19 | | 0.273 | 0.026 | 0.01 | |
| Lee et al. (2010) | Gangneung, Korea del Sur | 5.25 | 25 | | | | | | | | | | |
| Mantovan et al. (1955) | Italia | 5.73 | 36.78 | | | | | 1.61 | | 1.04 | | 0.01 | 7.12 |
| McColl and Bush (1978) | Berkeley, California | 5 | 13.2 | | | | | | | | | | |
| Melidis et al. (2007) | Xanthi, Grecia | | | | | | | 0.41 | | 1.87 | | | 0.02 |
| Olem & Berthouex (1989) ^a | Kentucky/ Tennessee | 4.53 | 17.2 | | | | | | | 1.19 | | 0.01 | 1.97 |
| Peters and Bonelli (1982) | Essex, Nueva York | | 12.3 | | | | | | | | | | |
| Quek & Förter (1993) ^b | Bayreuth, Alemania | 3.88 | | | 17 | | | | | | | | |
| Sazakli et al. (2007) | Isla Kefalonia, Grecia | 8.31* | 103* | | | | | 0.01* | 0.013* | 0.269* | | 0.09* | 8* |
| Smath and Potter (1987) | Greenville, Maine | 4.6 | 22.4 | | | | | | | | | | |
| Thomas & Green (1993) | Armide, Australia (Rural) | 6.9 | 25 | 0.2 | 2 | | | | | 0.23 | | | |
| Thomas & Green (1993) | Armide, Australia (Urbana) | 6.8 | 30 | 0.2 | 3 | | | | | 0.21 | | | |
| Thomas & Green (1993) | Armide, Australia (Industrial) | 6.7 | 20 | 0.8 | 6 | | | | | 0.05 | | | |
| Yaziz et al. (1989) | Selangor, Malasia | 5.9 | 13.7 | 3 | 17 | 7 | | | | | | | |
| Yufen et al. (2008) | Beijing, China | | | | 6.49 | | 3.99 | | | | 0.06 | | |

* valor medio

^areportado como deposición húmeda

^blos valores son el promedio del elemento 1 y el evento 2

^cmedia ponderada por volumen

Por otro lado, los sistemas de almacenamiento de agua lluvia, también pueden verse influenciados en la calidad de la misma. Estudios como el de Despins, *et al.*, (2009), indican que las cisternas frecuentemente son vistas como sistema de tratamiento debido al material del cual fue construido, como lo es el concreto y el hormigón, donde se reporta un incremento en la Alcalinidad de Ca²⁺ y Mg²⁺ en el análisis realizado para el agua localizada en el sistema de almacenamiento, la misma tendencia se mostró para el pH, en dónde se obtuvo un incremento de 4.5 unidades de un pH que inicialmente se encontraba en 5 y posterior al contacto con el sistema de almacenamiento, se concentró en 9.5 unidades, de acuerdo con la

norma NOM-127-SSA1-1994 (Salud ambiental, agua para uso y consumo humano, límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización), el pH adecuado para el agua de consumo debe ser entre 6.5-8.5 unidades de pH.

2.5.1 Contaminantes en el agua de lluvia

Las condiciones ambientales como la presencia de partículas atmosféricas, follaje sobresaliente y restos de aves, pueden contribuir a la contaminación del agua de lluvia; sin embargo, estos factores son específicos del sitio e independientes del diseño del propio sistema de captación (Despins, *et al.*, 2009).

Reportes previos sobre evaluación de la calidad del agua de lluvia han tenido conclusiones diversas sobre la contaminación presente en el agua captada. Algunos hacen referencia a un nivel de contaminación alto, indicando un tren de tratamiento riguroso, algunos otros, se encuentran con un nivel de contaminación lo suficientemente satisfactorio para hacer sencilla su potabilización (Förster, 1996; Sazakli, *et al.*, 2007; Abdulla & Al-Shareef, 2009; Zhang, *et al.*, 2010), citados por DeBusk & Hunt, (2014) . La diversidad de estos estudios radica tanto de la zona de captación como del depósito de almacenamiento, principalmente la composición de los materiales de su construcción, así como la localización geográfica, condiciones meteorológicas y actividades antropogénicas.

La cantidad y tipo de las impurezas en las precipitaciones varían con la localización y la época del año, y pueden afectar tanto a ríos como a lagos. El agua de lluvia en teoría es pura, sin embargo, al caer se escurre a través de superficies, arrastrando así los contaminantes acumulados en los techos que pueden llegar a ser tóxicos a la salud, en el estudio de Rojas, *et al.*, (2012) los microorganismos encontrados son las bacterias *E. coli* y *Enterobacter aerogenes*, Mendez, *et al.*, (2011) mencionan que se han encontrado varios tipos de contaminantes químicos en agua

de lluvia captada incluyendo metales pesados (Förster, 1999; Lee, *et al.*, 2010), hidrocarburos aromáticos policíclicos (Förster , 1999), pesticidas (Zobrist, *et al.*, 2000), y herbicidas (Bucheli, *et al.*, 1998).

III. MARCO DE REFERENCIA

3.1 Sistemas de captación de agua de lluvia

La captación de agua de Lluvia ha sido practicada por más de 4000 años, en zonas arqueológicas de la península de Yucatán, así como en Xochicalco, Morelos, desde el año 300 a.C., se emplearon sistemas de captación, conocidos como *chultus*⁷, también existieron depósitos artificiales conocidos como aguadas, los cuales fueron utilizados en tiempos precolombinos para irrigar cultivos en áreas pequeñas (Anaya, 2004), citado por Garrido, *et al.*, (2006), en Turquía y Marruecos se construyeron cisternas cuya función era almacenar agua de lluvia para su posterior empleo, fueron llamadas “joyas arquitectónicas” (Gutiérrez & Rubio Arias, 2014).

La captación de agua de lluvia se recolecta en los techos debido a dos razones, la primera es que no se requiere de bombeo o energía adicional, ya que es captada por gravedad. Por otro lado, los techos generalmente se les considera limpios, aunque son acumuladores de contaminantes como polvo y heces de aves, se suele considerar que la eliminación de agua captada en los primeros minutos de la precipitación reduzca dicha contaminación⁸ (Gutiérrez & Rubio Arias, 2014).

La lluvia que se recolectada en los techos, de las construcciones permite producir un volumen de escorrentía⁹ cerca al volumen de lluvia, debido a la posición elevada facilita su almacenamiento y así mismo su captación, el techo debe estar compuesto de material impermeable, liso y uniforme. En zonas rurales, los

⁷ Los *chultus*, tenían la función de recolectar el agua de lluvia de los patios y conducirla mediante canales a depósitos, construidos con piedra para ser usada posteriormente (Anaya, 2004).

⁸ Se puede desechar los primeros minutos de la precipitación empleando el uso de una trampa que colecte los primeros minutos y posteriormente el agua pase al sistema de almacenamiento correspondiente, una alternativa a la trampa es un filtro puesto antes del sistema de almacenamiento (Gutiérrez & Rubio Arias, 2014).

⁹ Aguas de escorrentía son las aguas que caen y corren sobre los techos de los edificios, en calles, aceras y en cualquier otra superficie impermeable durante un evento de lluvia, estas aguas no se introducen en el suelo, únicamente corren por las superficies (UPRM, 2018).

materiales constructivos varían bastante, entre los más comunes nos encontramos con: lámina galvanizada, lámina de asbesto¹⁰, y tejas de arcilla o concreto. El techo se debe mantener limpio, libre de hojas y otros detritos, para que el agua recogida sea de buena calidad (FAO, 2013).

3.2 Sistemas de potabilización de agua de lluvia

El agua es un requerimiento básico para la vida y la salud, sin embargo, el consumo de agua en mal estado es una de las principales fuentes de infección y la causa de diversos padecimientos gastrointestinales como el cólera. El tratamiento de agua o potabilización, es una de las alternativas disponibles para adecuar su calidad a las normas propias del uso. La potabilización de agua a escala urbana, se inicia a principios del siglo XX, con la desinfección del agua de suministro para proteger a salud pública frente a las epidemias de cólera y otras infecciones que afectaban a las poblaciones de Europa y América (Morató, *et al.*, 2006).

El suministro del agua potable es un problema que ha ocupado al hombre desde la antigüedad, de tal forma que se ha llevado a cabo la construcción de depósitos subterráneos que recogen las aguas pluviales, la forma de construcción ayuda a que el agua se mantenga fresca y sin luz, evitando así el desarrollo de algas (Romero, 2008).

Para conseguir una gestión integral y sostenible del agua, es fundamental disponer de tecnologías adecuadas tanto para la captación como para el tratamiento (Morató, *et al.*, 2006).

De acuerdo a Romero, (2008), la potabilización del agua consiste en la eliminación de compuestos volátiles seguido de la precipitación de impurezas como floculantes,

¹⁰ Material que puede encontrar restricciones de uso en algunos países.

filtración y desinfección con cloro u ozono, donde, el objetivo de la potabilización es garantizar al consumidor que el tipo de agua captada, alcanzará la calidad indicada en la legislación para un determinado uso.

De manera legal, en México, el agua potable es aquella que cumple con los 48 parámetros de calidad establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM 127-SSA1-1994. El tratamiento que se le da al agua para considerarla potable depende de la calidad de la misma, para agua subterránea, en la mayoría de los casos el único tratamiento de desinfección que recibe son dosis de cloro, ya que se considera que posee una muy buena calidad, no es así para el caso del agua superficial, donde se requiere de un tratamiento previo a su desinfección, a través del cual se puede llevar a cabo la remoción de minerales, sólidos suspendidos y materia orgánica, llevados a cabo en plantas potabilizadoras (Jiménez, *et al.*, 2010).

Fernández & du Mortier, (2005) mencionan que el agua potable consiste en proporcionar una lista de compuestos y asociarlos con un nivel tolerable para cumplir con las normas de potabilización, no nos asegura la inexistencia de contaminantes en el agua.

De acuerdo a con la *American Water Works Association* (AWWA), (2002), la clasificación de los tipos de contaminantes y la operación a llevar a cabo en función de sus componentes se muestra en la Tabla 3.1

TABLA 3.1. PROCESOS UNITARIOS POSIBLES A LLEVAR A CABO EN FUNCIÓN DE LOS CONTAMINANTES PRESENTES.
FUENTE: CALIDAD Y TRATAMIENTO DEL AGUA, 2002. *AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION*.

| TIPO DE CONTAMINANTE | OPERACIÓN UNITARIA |
|-----------------------------|---------------------------|
| Sólidos gruesos | Desbaste |
| Partículas coloidales | Coagulación |
| | Floculación |
| | Decantación |

| | |
|---|-------------------------------|
| Sólidos en suspensión | Filtración |
| Materia orgánica | Adsorción con carbón activado |
| Amoniaco | Cloración al punto de quiebre |
| Gérmenes patógenos | Desinfección |
| Metales no deseados (Fe, Mn) | Precipitación por oxidación |
| Sólidos disueltos (Cl ⁻ , Na ⁺ , K ⁺) | Ósmosis inversa |

Seguendo este esquema, Romero, (2008) menciona que los tratamientos para potabilizar el agua se pueden clasificar como:

- Los componentes o impurezas a eliminar
- Parámetros de calidad
- Grados de tratamientos de agua

3.2.1 Sistemas de pretratamiento

Aunado a la discusión en el subcapítulo anterior, en general, es necesario someter el agua a múltiples etapas de tratamiento para retirar o disminuir contaminantes existentes y organismos patógenos, entre los sistemas comúnmente usados se encuentran la coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección (OMS, 1995).

Para este caso particular, se ha propuesto un tren compuesto por dos barreras de pretratamiento, que tiene por objeto remover, reducir o modificar sólidos gruesos, medios y finos (CONAGUA, 2018) y tres barreras de desinfección, proceso de oxidación que conlleva a la eliminación o desactivación de microorganismos presentes en el agua, con objetivo de prevenir epidemias de infecciones

gastrointestinales como el cólera, disentería, tifoidea, entre otras (CONAGUA, 2012).

3.2.1.1 Filtro de arena

Medio filtrante de arena sobre un lecho de grava como soporte, en el cual el agua que aún contiene materia en suspensión, pasa a través de él, las partículas sólidas quedan retenidas en el medio filtrante, es muy importante hacer la elección adecuada del tamaño del grano del lecho filtrante, para evitar obstrucciones, ya que la retención de partículas deberá llevarse a cabo en el interior del lecho filtrante y no en la superficie (Romero, 2008). Las partículas en suspensión que trae consigo el agua son retenidas durante su paso en el medio filtrante de arena, por ello, una vez que el filtro se encuentre saturado (haya alcanzado la carga prefijada), es posible regenera el filtro por lavado a contracorriente (SEFILTRA, 2018).

La calidad de la filtración depende de diversos parámetros, como son; la forma del filtro, altura del lecho filtrante, características y granulometría de la masa filtrante, velocidad de filtración (SEFILTRA, 2018), caudal, presión, entre otros. Los filtros de arena no eliminan normalmente las bacterias o los virus, pero sí la turbiedad, (CONAGUA, 2012).

Las ventajas de estos filtros es que son fáciles de operar y no requieren de supervisión constante. Sin embargo, solo deben ser aplicados cuando el agua tiene una turbiedad menor a 10 NTU, y color menor a 15 unidades escala Pt/Co (CONAGUA, 2015).

3.2.1.2 Filtro de carbón activado granular

El carbón activo es un material adsorbente que provee una superficie en la cual los iones o moléculas pueden concentrarse (CONAGUA, 2015). Permite la disminución de la materia orgánica, color, olor y sabor presente, así como la eliminación de cloro libre del agua, eliminación de amoníaco y controlar el crecimiento biológico, se trata de un lecho fijo en columna, el carbón encontrado en forma granular (Romero, 2008). Se posiciona como un adsorbente dada su estructura porosa y la interacción con adsorbatos polares y no polares, donde los electrones desapareados y las valencias insaturadas del carbón, presentan mayor energía potencial, posee un área de adsorción¹¹ muy grande, alcanzando los 1500 m² /g (US, 2009). Se deben considerar algunos factores para que la eliminación de contaminantes en el aire se lleve a cabo de manera satisfactoria (ver Tabla 3.2).

TABLA 2.2. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ADSORCIÓN DE COMPUESTOS PRESENTES EN EL AIRE.
FUENTE: MANUAL DEL CARBÓN ACTIVO, S.F., UNIVERSIDAD DE SEVILLA.

| FACTOR | DESCRIPCIÓN |
|--------------------------------|---|
| Tipo de compuesto a eliminarse | En general, los compuestos de alto peso molecular, baja presión de vapor/alto punto de ebullición y alto índice de refracción son mejor adsorbidos. |
| Concentración | Cuanto mayor sea la concentración, mayor será el desgaste de carbón y mayor cantidad se requerirá. |
| Temperatura | Cuanto más baja sea la temperatura, mejor será la capacidad de adsorción. |
| Presión | Cuanto mayor sea la presión, mayor será la capacidad de adsorción. |

¹¹ En términos generales, el proceso de adsorción consiste en la captación de sustancias solubles presentes en la interface de una solución, pudiendo constituirse dicha interface entre un líquido y un gas, un sólido o entre dos líquidos diferentes (US, 2009).

| | |
|---------|---|
| Humedad | Cuanto más baja sea la humedad, mayor será la capacidad de adsorción. |
|---------|---|

3.2.2 *Sistemas de desinfección*

3.2.2.1 *Filtro de carbón activado granular impregnado con plata coloidal*

También llamado carbón bacteriostático, el filtro contiene un lecho de carbón vegetal granulado impregnado de plata coloidal para eliminar olor, sabor y color del agua, reteniendo materiales orgánicos e inorgánicos, al tiempo que inhibe bacterias (PROFECO, 2000). La construcción del filtro en columna permite que el agua ingrese por un extremo y pase por toda la longitud del lecho de carbón (PENTAIR, 2018) .

La plata coloidal es obtenida por procesos químicos o eléctricos, constituida por pequeñas partículas a cargarse eléctricamente por la pérdida de iones, la plata en su forma coloidal no elimina a los virus, pero se considera eficaz para la destrucción de bacterias *Escherichia coli*, *Staphilococcus aureus*, *Pseudomonas spp.*, *Aspergillus spp.*, y fecales. Se requieren de tiempos muy largos, lo que hace difícil determinar su poder germinicida, debido a su lentitud en las reacciones de eliminación de materia orgánica, se considera que la plata coloidal no posee un buen poder residual (CONAGUA, 2012). Según con los ensayos reportados por Aguamarket, (2008), el cartucho de carbón activo impregnado de plata es capaz de retener por arriba del 98% de las bacterias presentes en el agua, y más del 95% de otros contaminantes presentes en la misma.

3.2.2.2 Filtro KDF (Kinetic Degradation Fluxion)

Es un medio filtrante que está constituido por gránulos de gran pureza de cobre-zinc, cuya función es la reducción de contaminantes en el agua usando reacciones oxidación-reducción (REDOX), es usado en la eliminación o reducción de cloro, hierro, sulfuro de hidrógeno, plomo, mercurio, carbonato de calcio, magnesio, cromo, bacterias, algas y hongos. (LENNTECH, 2018).

Es de gran utilidad en los sistemas de pretratamiento, tratamiento primario, y tratamiento en aguas residuales para alargar la vida útil de los sistemas de tratamiento (LENNTECH, 2018).

3.2.2.3 Sistema de luz ultravioleta

La luz ultravioleta es una radiación electromagnética que está presente en el espectro natural de la radiación solar, tiene una longitud de onda a la luz visible de 400 nm, fue utilizada a principios de 1900 en agua de suministro, pero se abandonó debido a su alto costo de operación y manutención, hoy en día es un proceso que está ganando terreno frente a la cloración, se ha implementado incluso en plantas de tratamiento de agua residual debido a que desinfecta el agua sin la necesidad de almacenar o manejar reactivos químicos peligrosos y gracias a sus cortos periodos de contacto (del orden de segundos o minutos), reduce el tamaño de los tanques de tratamiento y con ello, el costo (CONAGUA, 2018).

La radiación de luz ultravioleta penetra la pared celular de los organismos y es absorbida por el ADN y el ARN dimerizando dos bases (las que une entre sí con un doble enlace), lo cual impide la reproducción o produce la muerte de la célula (Metcalf & Eddy, 2014). La formación de muchos dímeros a lo largo de la cadena de ADN hace que la duplicación sea muy difícil pues la estructura helicoidal se

encuentra distorsionada, una célula que no se puede duplicar o reproducir se considera muerta, aunque en este caso se acostumbra a decir que ha sido "inactivada", debido a que es incapaz de multiplicarse e infectar el huésped. Existe la posibilidad de que los microorganismos puedan llegar a reactivarse (esto no ocurre para los virus), depende de tres condiciones; la dosis inicial de radiación UV para la inactivación, la dosis de la radiación foto-reactivante y el tipo de organismo (CONAGUA, 2018).

EL objetivo de la potabilización es garantizar al consumidor que el tipo de agua captada, alcanzará la calidad indicada en la legislación por la cual se regule, para el determinado uso, para este caso, la NOM-127-SSA1-1994 (Romero, 2008).

3.3 Legislación aplicable

Con base en las reformas constitucionales en materia de derechos humanos del 10 de junio de 2011, del artículo 4º. de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, también se advierte que el derecho al agua potable y al saneamiento es fundamental e indispensable para la realización, goce y disfrute de los demás derechos humanos, cuya preservación en cantidad, calidad y sustentabilidad es tarea fundamental tanto del Estado como de la sociedad, por cuanto a que tal derecho está basado en las premisas de un acceso al bienestar de toda la población, sustentando por los principios de igualdad y no discriminación, independientemente de las circunstancias sociales, de género, políticas, económicas o culturales propias de la comunidad en la que opera (CPEUM, 2011).

En México se cuenta con un marco jurídico desde 1996 para controlar en forma gradual la contaminación y establecer metas de tratamiento en función del reúso del agua tratada o su disposición final, ha sido gracias a dicha norma, que el agua tratada se duplicó a partir de ésta fecha, además de ésta norma, existen otras que son responsabilidad de la CONAGUA, de la Secretaria del Medio Ambiente y

Recursos Naturales y de la Secretaría de Salud. Éstas son referidas a la calidad de los cuerpos de agua y del agua potable (Jiménez, *et al.*, 2010), entre las más importantes, se encuentran la NOM-011-CONAGUA-2015 sobre la conservación del recurso del agua, que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, NOM-015-CONAGUA-2007 que es sobre la infiltración artificial de agua a los acuíferos (CONAGUA, 2018), o bien la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

Esta última norma considera que se necesita que el agua posea una calidad adecuada para el uso y consumo humano, siendo posible el establecimiento de los límites máximos de calidad y los tratamientos de potabilización del agua. Se aplica a todos los sistemas de abastecimiento públicos y privados.

En las legislaciones de algunos países se consideran entre 80 y 130 los contaminantes presentes, a pesar de que se sabe que el número de compuestos sintéticos que el hombre maneja es mayor a 70,000 y para muchos de ellos se desconoce el grado de toxicidad y los efectos, los criterios de calidad para agua potable han sido desarrollados tomando en cuenta el empleo de agua de primer uso o sin contaminantes tóxicos o sintéticos (Fernández & du Mortier, 2005).

3.4 Contaminantes en el agua

La contaminación de las fuentes de agua proviene de la inadecuada disposición de las aguas residuales y residuos sólidos, así como los drenados de la agricultura y de minas, la erosión, los derrames de sustancias tóxicas, la ruptura de drenajes, los efluentes de las plantas, y muchos más (Jiménez, 2005), el agua para consumo humano puede contaminarse cuando entra al sistema de distribución, a través de conexiones cruzadas, rotura de las tuberías del sistema de distribución, conexiones

domiciliarias, cisternas y reservorios defectuosos, grifos dañados y durante el tendido de nuevas tuberías y reparaciones realizadas sin las mínimas medidas de seguridad (OMS, 1995; Vargas, *et al.*, 1996), citado por Arcos, *et al.*, (2005). El término contaminación, se refiere a la introducción de cualquier agente; químico, físico, o biológico, cuya presencia o acumulación tiene efectos nocivos en el entorno natural, la salud y el bienestar de las personas (FCEA, 2018).

Un contaminante es aquel exceso de materia o energía que provoque daño a los humanos, animales, plantas y bienes nacionales, o bien que perturbe negativamente las actividades que normalmente se desarrollan cerca o dentro del agua, el agua es una molécula muy pura y de composición definida, volviendo sencillo identificar los compuestos ajenos a ella (Jiménez, 2005).

Al ser una molécula polar, tiene gran capacidad de establecer enlaces de hidrógeno con otras moléculas. Debido a esto puede diluir un gran número de sustancias por lo que es considerada como el “disolvente universal” (FCEA, 2018), éste no sólo disuelve, sino que además arrastra y emulsiona a compuestos con los que entra en contacto a lo largo de todo su ciclo, modificando su calidad (Jiménez, 2005).

La clasificación de los contaminantes presentes en el agua es diversa, pues no hay una forma correcta de hacerlo, pueden ser clasificados por su naturaleza, por pertenecer a un grupo, por su convencionalismo e incluso por su tamaño. Entre todas éstas clasificaciones, la más usada por practicidad es la clasificación convencional (Tabla 3.3), en donde se muestra la naturaleza del contaminante y el parámetro que lo puede medir, hay que resaltar que existe una delgada línea entre ser un contaminante en agua y por el contrario, ser un compuesto benéfico, la diferencia entre uno y otro, muchas veces es la cantidad presente de la sustancia ajena al medio (Jiménez, 2005).

TABLA 3.3. CONTAMINANTES CONVENCIONALES EN AGUA.
 FUENTE: LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN MÉXICO, (Jiménez, 2005); NOM-127-SSA1-1994;
 CONTAMINACIÓN DEL AGUA, (FCEA, 2018).

| Contaminante | Parámetro | Descripción | LMP SEGÚN NOM-127-SSA1-1994 |
|---------------------|------------------|--|--|
| Físicos | Color | Alteraciones de las propiedades físicas del agua, sólidos o materiales en suspensión cuyos impactos en los ecosistemas son consecuencia de la construcción de la luz que generan, así como calor proveniente de las industrias al enfriar equipos o descargar líquidos a altas temperaturas. | 20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto. |
| | Olor y sabor | | Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultados de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico). |
| | Temperatura | | - |
| | Turbiedad | | 5 unidades nefelométricas (NTU) o su equivalente en otro método. |
| | Sólidos | | 1000.00 mg/L para sólidos disueltos totales |
| | Conductividad | | - |
| Químicos | Alcalinidad | Provenientes de los drenados de minas, desechos solubilizados de agricultura, derrames de | - |
| | Oxígeno disuelto | | - |
| | pH | | 6.5-8.5 |

| Contaminante | Parámetro | Descripción | LMP SEGÚN NOM-127-SSA1-1994 |
|-------------------------|---|--|------------------------------------|
| | No metales | sustancias, compuestos reactivos, metales en cuerpos de agua, residuos de plaguicidas o insecticida, disolventes, etc. | Varía según el contaminante |
| | Metales | | Varía según el contaminante |
| | Nutrientes Nitrógeno y Fósforo (N y P) | | - |
| | Dureza | | 500 mg/L en dureza total |
| | Cloro residual | | 0.2-1.5 mg/L |
| | | | |
| Materia Orgánica | Demanda química de oxígeno (DQO) | Procedente de desechos de alimentos, de aguas negras domésticas y de fábricas, es descompuesta por bacterias, protozoarios y diversos organismos mayores, se lleva a cabo mediante reacciones químicas que requieren oxígeno para transformar sustancias ricas en energía en sustancias pobres en energía. | - |
| | Demanda biológica de oxígeno (DBO) | | - |
| | Carbono orgánico total (COT) | | - |
| | Extractables con cloroformo | | - |
| | Sustancias activas al azul de metileno (SAAM) | | 0.50 mg/L |

| Contaminante | Parámetro | Descripción | LMP SEGÚN NOM-127-SSA1-1994 |
|------------------------|------------------------|--|------------------------------------|
| | Grasas y aceites | | - |
| | Fenoles | | - |
| Bacteriológicos | Coliformes fecales | Son seres vivos que algunos de ellos provocan enfermedades en el hombre u otras especies. Las más comunes son la tifoidea, la salmonelosis, la disentería, cólera y helmintiasis. Los agentes que las causan entran al agua a través de las heces fecales de humanos o animales. | No detectable NMP/100 mL. |
| | | | Cero UFC/100 mL. |
| | <i>Vibrio cholerae</i> | | - |
| | <i>Shigella sp.</i> | | - |
| | <i>Giardia lamblia</i> | | - |

- No se encuentra indicado

Éstos contaminantes se tienen la capacidad de pasar por diferentes procesos de tal manera que la calidad del agua sea referida a los límites máximos permisibles presentados en la Tabla 3.3, la complejidad de los procesos que constituyen el tratamiento del agua dependerá de las características que presente esta (Chulluncuy, 2011).

Los agentes contaminantes provenientes de una determinada fuente, pueden traer daños severos a la salud, que van desde enfermedades respiratorias y problemas digestivos, hasta efectos cancerígenos como lo aborda el estudio de (Oller & Sanz,

2012), entre los más frecuentes en el agua se encuentran los contaminantes químicos como son la acrilamida cloruro de vinilo, arsénico, boro, epidohidrina, fluoruro, nitratos, plaguicidas, plomo y trihalometanos (Vargas, 2005).

3.5 Partículas en agua para consumo humano

Actualmente no existen estudios sobre las partículas existentes en agua para consumo humano, sólo se cuentan con estudios para agua residual en los que se clasifican los posibles contaminantes existentes de acuerdo a su tamaño, como lo presentan Levine, *et al.*, (1991); Neis & Tiehm, (1997); Chávez, *et al.*, (2008); García, (2010) en su trabajo. Sin embargo en el agua destinada para consumo humano, existen partículas ajenas a la composición química del agua, el agua se compone de dos moléculas de Hidrógeno y una molécula de Oxígeno, pero debido a la gran polaridad¹² que posee, es posible que la molécula de agua arrastre partículas que se encuentren a su paso. La permanencia de un compuesto en el agua está determinada por distintos factores, entre ellos se encuentran su presión de vapor, temperatura, pH así como la naturaleza de la sustancia (LENNTECH, 2017).

Las definiciones de lo que es una partícula son diversas, por un lado haciendo referencia a la física moderna, se considera una partícula como una unidad subatómica de la materia, la cual existe en determinado medio y se le asocia con una pequeña esfera (Allen, 1997). Chávez, (2004) cita a Levine *et al.*, (1991), quien describe a la partícula como una subunidad de la materia, también hace mención sobre los autores Riyad & Clayton, (1963) quienes definen a una partícula de una sustancia como el estado de subdivisión de la materia cuya forma depende

¹² El agua se considera una sustancia polar, lo que significa que el átomo de oxígeno atrae a los electrones de los átomos de hidrógeno, de forma que estos desarrollan cargas parciales positivas y el átomo de oxígeno crea una carga parcial negativa, de tal forma que puede atraer átomos de otras moléculas de agua y formar puentes de hidrógeno (LENNTECH, 2017), la formación de los puentes de hidrógeno con otras moléculas, permite que las sustancias ajenas al agua sean disueltas cuando entran en contacto con las moléculas polares del agua (Concha, 2013).

del proceso por el cual ha sido formada y sobre las fuerzas cohesivas intermoleculares presentes, ésta definición fue trabajada para el estudio de la distribución de tamaño de partícula en agua residual, sin embargo, Cadle, (1955) menciona que la definición más aceptada de lo que es una partícula, dependerá del caso de estudio, de tal manera que la definición dada por Riyad & Clayton, (1963) será la más aceptada para éste estudio.

3.6 Tamaño de partícula

De acuerdo con Riyad & Clayton, (1963), el diámetro de una partícula es la representación que mejor describe la dimensión del grado de conminución¹³, es decir a la forma mínima en la que se puede subdividir una partícula después de varios procesos de reducción, autores como, Cadle, (1955), Riyad & Clayton, (1963), Allen, (1997), PS, (2009), HORIBA, (2017) consideran que el tamaño que las partículas poseen en determinados procesos, tienden a afectar algunas propiedades como son: adsorción, área superficial, consistencia de los lodos, densidad, dispersión de la luz, flujo másico, propiedades magnéticas, propiedades ópticas, reactividad química, solubilidad entre otras, de tal manera que el tamaño de partícula influye sobre éstas propiedades y es un valioso indicador de calidad y rendimiento. Es importante destacar entonces que las propiedades que cualquier sustancia particulada posee son referenciadas a la distribución de tamaño que sus partículas tienen.

La descripción de tamaño de partícula, viene asociada a la forma que cada una tiene (Cadle, 1955), el comportamiento y las propiedades de la materia particulada están asociadas por su morfología (forma, textura, y distribución de tamaño) (Allen, 1997). El tamaño mínimo va desde átomos, neutrones, protones, etc., pero

¹³ Conminución: Proceso por el que se produce la reducción de las partículas de un material, por trituración o molienda (RAI, 2018)

también se habla de partículas cuyo diámetro oscila en las 1000 μm que son importantes en el control de procesos industriales (Cadle, 1955).

Jiménez, (2005) clasifica a los contaminantes¹⁴ existentes en agua de acuerdo con su tamaño de partícula, esta separación permite seleccionar el método apropiado para su destrucción, eliminación o inactivación de los mismos, y así mismo los divide en:

- **Materia disuelta.** Son moléculas o iones disueltos con diámetro equivalente (d_{eq}) entre $10^{-5} \leq d_{\text{eq}} \leq 10^{-3} \mu\text{m}$.
- **Materia coloidal.** Es materia suspendida con características similares a la materia disuelta. Tiene diámetro equivalente entre $10^{-3} \leq d_{\text{eq}} \leq 1 \mu\text{m}$ y se caracteriza por ser de sedimentación muy lenta.
- **Materia suspendida.** Corresponde a moléculas en fase dispersa con diámetro equivalente entre $1 \leq d_{\text{eq}} \leq 100 \mu\text{m}$.

Por otro lado, Levine *et al.*, (1985 y 1991) muestran que las partículas pueden clasificarse como solubles ($<0.08 \mu\text{m}$), coloidales ($0.08 \leq d_{\text{eq}} \leq 1.0 \mu\text{m}$), supra-coloidales ($1 \leq d_{\text{eq}} \leq 100 \mu\text{m}$) y sedimentables ($>100 \mu\text{m}$). El diagrama siguiente, se muestra una distribución de los contaminantes presentes en el agua de acuerdo con su tamaño de partícula, y obedece a la clasificación de Levine, *et al.*, (1985, 1991). Figura 3.1

¹⁴ En general, la dificultad para eliminar los contaminantes es de mayor a menor en el orden de: disueltos, coloidales y suspendidos (Jiménez, 2005).

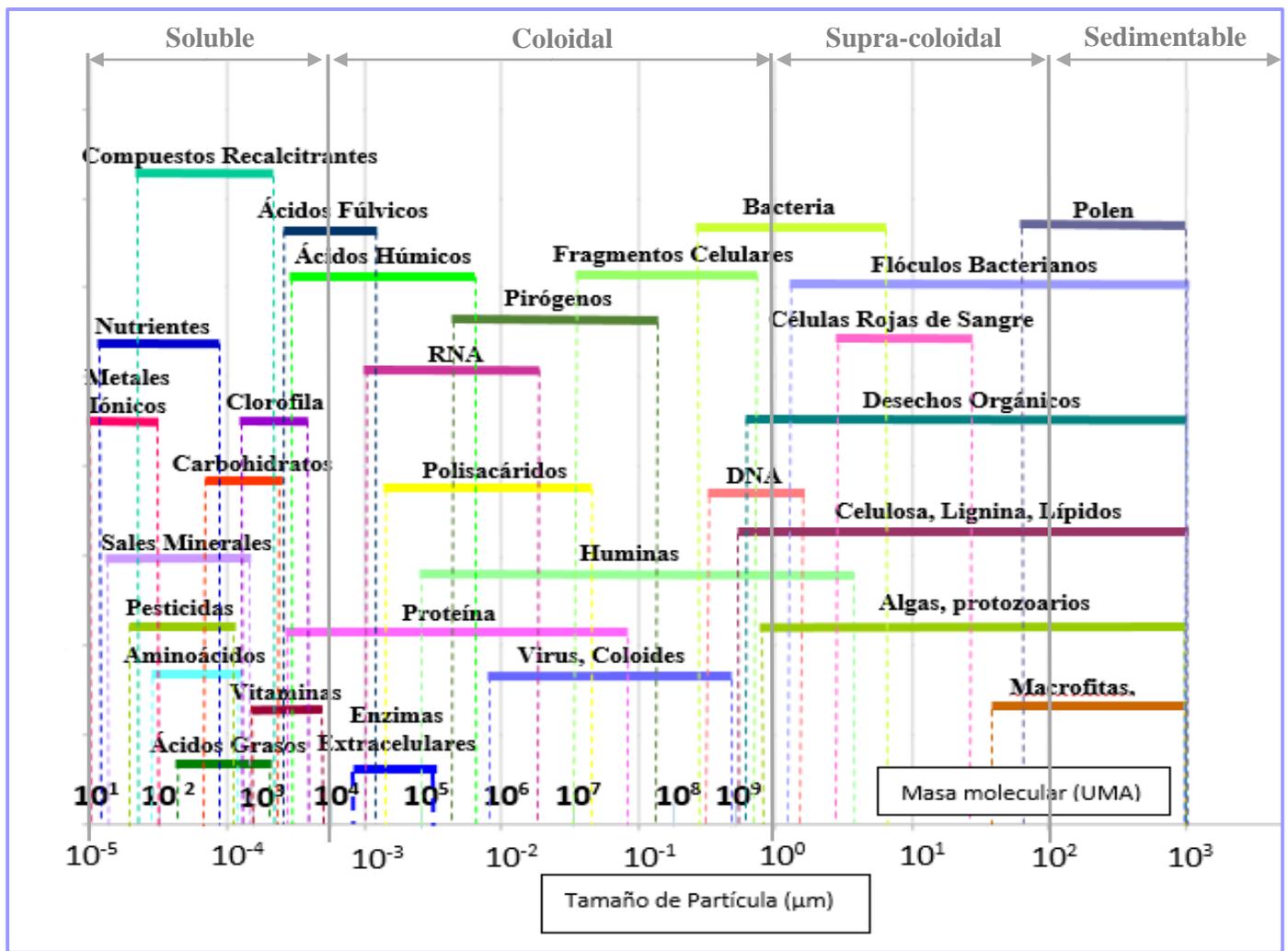


FIGURA 3.1. CONSTITUYENTES ORGÁNICOS TÍPICOS EN AGUA SUPERFICIAL Y SUS RANGOS DE TAMAÑO. FUENTE: ADAPTADO DE HO-KYONG, *et al.*, (2006), SCHAFFER, (2001), LEVINE, *et al.*, (1985) Y THURMAN, (1985).

3.7 Medición de la distribución del tamaño de partícula (DTP)

La medición de la DTP es un tema cuestionable, hablar de un tamaño para una forma específica implica que se conoce la forma y la ecuación que permite determinarlo. Para las partículas, su forma no se encuentra definida por ninguna ecuación aún, debido a que, existen partículas con diversas formas, diámetros, volúmenes y áreas, entonces, no se habla sólo del volumen de una sola partícula, sino de su distribución que ocupa en el medio en el que se encuentra.

Para conocer el tamaño que las partículas poseen, autores como, Cadle, (1955), Riyad & Clayton, (1963), Allen, (1997), PS, (2009), HORIBA, (2017), sugieren considerar a la partícula (cualquiera que sea) como una esfera, la razón de ésta suposición es la simplicidad con la que se puede trabajar con ellas.

Si tomamos de referencia un plano cartesiano con coordenadas X, Y y Z, hacia cualquier dirección, el cuerpo esférico proporciona sólo un dato para obtener la información que se necesita (el diámetro). Sin embargo, si posicionamos a un cuerpo de forma irregular, el estudio se haría sumamente complejo, debido a las formas distintas e indefinidas, y el número de datos que necesitaríamos sería diferente para cada de ellas, por lo que conocer un diámetro no basta, también tendríamos que conocer su altura, área, distancia, espesor, volumen, e incluso sería necesario fragmentar la partícula para conocer con detalle su tamaño.

Si se habla de las formas definidas conocidas, como un cubo, tetraedro, cilindro, etc., su estudio también se complica, pues las dimensiones y los datos que necesitamos para conocer su tamaño incrementan según la complejidad de la forma de la partícula, Figura 3.2.

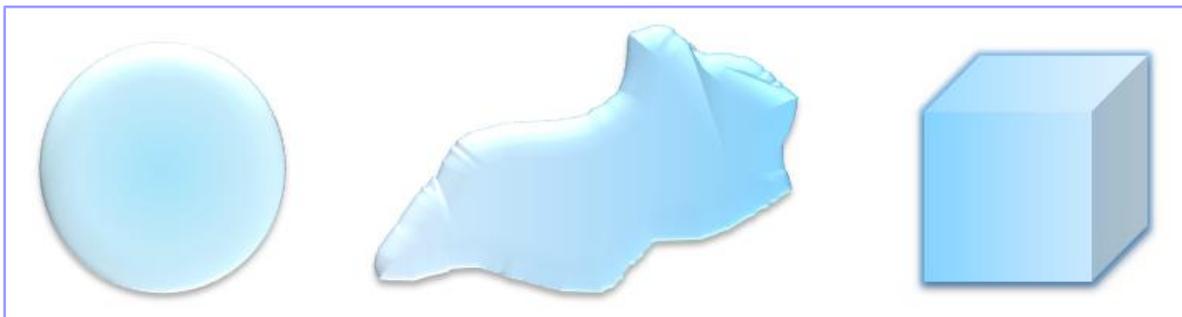


FIGURA 3.2. EJEMPLOS DE PARTÍCULAS SIMULADAS.
FUENTE: ADAPTADO DE HORIBA (2017), Y EDICIÓN PROPIA.

Para las formas esféricas, la distribución de los diámetros entre el límite superior e inferior es continua, sin embargo, para las formas irregulares esto no se cumple,

el tamaño de cualquier partícula irregular es el promedio estadístico de todos estos diámetros nano equivalentes al volumen de éstas partículas (Riyad & Clayton, 1963), siendo llamados tamaños de diámetros estadísticos, porque generalmente son medidas todas las dimensiones de un amplio número de partículas (Herdan, 1953), citado por Cadle (1955).

La determinación de la distribución de tamaño de partículas es, actualmente un problema que adquiere cada vez más importancia para la industria de procesos, ya que en la práctica no existe un tamaño o diámetro único de partícula, sino una representación de un conjunto de partículas similares (Salinas, et al., 2005).

Existen diversas técnicas para la medición del tamaño de partículas. Levine *et al.* (1991), se encargaron de referenciar la existencia de técnicas variadas para la caracterización de la distribución del tamaño de partículas. Para lograr su objetivo, emplearon filtración secuencial con filtros de membrana de policarbonato con un tamaño de poro que va de 0.1 μm a 12 μm , determinando la masa del material retenido en cada filtro y el contenido orgánico de las muestras no filtradas. El tamaño de partícula fue evaluado con ayuda de un balance de materia en los sólidos filtrados y el carbono orgánico total de los sólidos retenidos en cada fracción (García, 2010).

Eventualmente las técnicas para el estudio del tamaño de partícula han ido evolucionando al paso del tiempo, y la técnica a emplear, es seleccionada según las propiedades de las muestras a estudiar tal y como se representa en la Figura 3.3.

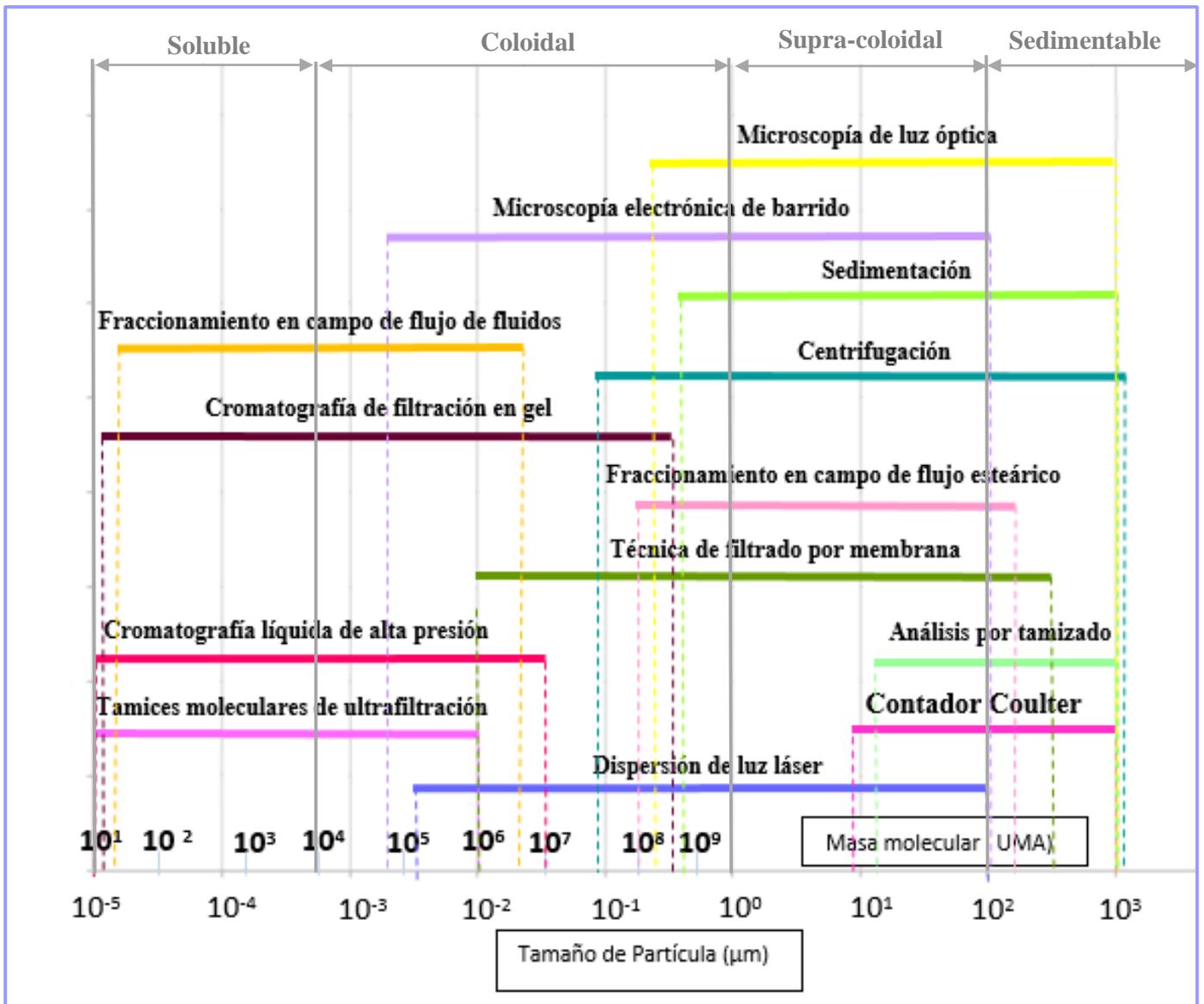


FIGURA 3.3. TÉCNICAS ANALÍTICAS USADAS PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA EN AGUA. FUENTE: ADAPTADO DE HO-KYONG, *et al.*, (2006), SCHAFFER, (2001), LEVINE, *et al.*, (1985) Y THURMAN, (1985).

Entre las técnicas más conocidas, se mencionan las siguientes, referenciadas en los Métodos Estándar para el Análisis de Agua y Agua Residual (1998).

3.7.1 Método de zona de detección eléctrica (Principio Coulter)

En los instrumentos de la zona de detección eléctrica, las partículas se suspenden en una solución electrolítica y pasan a través de un pequeño orificio. Se aplica una corriente o potencial constante entre los electrodos a cada lado del orificio; el cambio en la resistencia causado por la toma de partículas y el volumen en el orificio causa un cambio en el potencial o la corriente (lo que no se esté reteniendo de forma constante electrónicamente). El pulso es proporcional al volumen de la partícula.

Los impulsos de voltaje o corriente se amplifican y clasifican en clases de tamaño o canales basados en su altura máxima. Algunos instrumentos tienen canales fijos; otros permiten la selección de número de clases de tamaño, ancho de tamaño de cada canal y / o el tamaño más bajo para medir (Clesceri, *et al.*, 1998).

3.7.2 Método de bloqueo de luz

En instrumentos de bloqueo de la luz, un haz de luz enfocado brilla desde un lado de la zona de medición hacia una célula fotovoltaica en el otro lado. El volumen iluminado del líquido constituye la zona de detección. Las partículas pasan a través de la zona de detección a una velocidad conocida. El bloqueo de la luz por la partícula crea un cambio en el voltaje en la célula fotovoltaica. En diferentes instrumentos, diferentes características de la señal resultante se utilizan para determinar el tamaño: los instrumentos de oscurecimiento de la luz utilizan la altura del pulso (relacionada con el área de la sección transversal de la partícula) mientras que los instrumentos de tiempo de transición usan el ancho de pulso (proporcional a una longitud característica de la partícula). En todos los casos, las mediciones generalmente se informan en términos de esféricos equivalentes de diámetro.

Los dispositivos de tiempo de transición típicamente utilizan un rayo láser como fuente de luz. La viga puede escanear una muestra estacionaria a una velocidad fija mientras barre una zona de detección óptica. Alternativamente, se puede pasar una suspensión a través de una zona de detección óptica fija. En este último caso, el tamaño de partícula medido es sensible al caudal a través del sensor.

Los dispositivos que usan principios de bloqueo de luz varían en la cantidad de canales (clases de tamaño) en qué partículas están ordenadas. En algunos casos, estos son preestablecidos por el fabricante; en otros, pueden ser establecido por el analista. Diferentes sensores (intercambiables) están disponibles para medir diferentes rangos de tamaño y diferentes concentraciones de partículas (Clesceri, *et al.*, 1998).

3.7.3 Método de dispersión de luz

Los instrumentos de dispersión de luz pueden ser dispositivos de flujo o estáticos. En instrumentos de flujo, la ruta directa del haz de luz a través de la celda de flujo está bloqueada por una partícula, ya que fluye a través de la zona de medición con el fluido y la luz se dispersa en un intervalo fijo de los ángulos que se recogen y se miden. El tamaño de partícula se determina a partir del ángulo y la intensidad de dispersión basada en los principios de difracción de Fraunhofer y / o dispersión de Mie. En instrumentos estáticos, las partículas permanecen quietas y un haz de luz láser escanea parte de la suspensión.

La luz dispersada es recogida por una célula fotovoltaica y la respuesta resultante de todas las partículas escaneados es matemáticamente desplegada para generar la distribución de tamaño.

Los contadores de partículas disponibles varían en el ángulo o intervalo de ángulos en los que se encuentra la luz dispersa medido y en el número de canales (clases de tamaño) en que se ordenan las partículas. Por instrumentos de flujo, diferentes sensores (intercambiables) están disponibles para medir diferentes rangos de tamaños y diferentes concentraciones de partículas. Los tamaños de partículas determinados por estos instrumentos son diámetros esféricos equivalentes, es decir, se determinan a partir de la cantidad de luz que se han dispersado en los ángulos incorporados al instrumento por una esfera de calibración de ese diámetro (Clesceri, *et al.*, 1998).

3.8 Reseña histórica sobre el método Coulter

Se dice que el método fue desarrollado por Wallace H. Coulter a finales de 1940, quién se encontraba trabajando para la marina de los Estados Unidos bajo un contrato. La tecnología se desarrolló con el objetivo de contar células sanguíneas rápidamente al medir los cambios de conductancia eléctrica como células suspendidas en un fluido conductor que atravesaba un pequeño orificio (COULTER, 2019), obteniendo de manera simultánea el tamaño y conteo de células en la sangre. Wallace desarrolló el principio Coulter® como medio para contar y dimensionar partículas microscópicas suspendidas en un fluido. Dicho principio, fue el más importante de sus 85 patentes, y dio lugar a importantes avances en la ciencia, la medicina y la industria (Allen, 1997).

Los primeros intentos de Wallace de patentar su invención fueron rechazados por más de un abogado, los cuales decían; *"usted no puede patentar un agujero"*. Persistente como siempre, Wallace solicitó la patente en 1949 y se emitió el 20 de octubre de 1953. Ese mismo año, se enviaron dos prototipos a los Institutos Nacionales de Salud para su evaluación. Poco después, el NIH¹⁵ publicó sus

¹⁵ NIH (National Institutes of Health), (WHCF, 2019).

hallazgos en dos artículos clave, citando una mayor precisión y conveniencia del método Coulter para el recuento de células sanguíneas. Ese mismo año, Wallace divulgó públicamente su invento en la Conferencia Nacional de Electrónica en su documento técnico, "Contador automático de células sanguíneas de alta velocidad y analizador de tamaño celular". En 1958, Wallace y su hermano, Joseph Coulter, Jr., incorporaron Coulter Electronics en Chicago para fabricar, comercializar y distribuir sus contadores Coulter. La compañía se mudó más tarde a Miami, Florida y el nombre se cambió a *Coulter Corporation*. Wallace y Joe dirigieron esta empresa durante más de 40 años (WHCF, 2019).

La inspiración necesaria para el hallazgo de ésta tecnología, provino de sus visitas a hospitales, donde observó que los trabajadores de laboratorio se inclinaban sobre los microscopios contando manualmente las células sanguíneas que se habían manchado sobre el vidrio, Wallace centró la primera aplicación en el recuento de glóbulos rojos. Este instrumento se conoció como el *Coulter® Counter*™.

Este simple dispositivo, contó en exceso de 6000 celdas por segundo con un intervalo de conteo de 15 segundos. El número de células fue aproximadamente 100 veces mayor que el conteo de microscopio habitual y redujo el error estadístico en un factor de aproximadamente 10 veces, este dispositivo se conoció como: "Contador automático de células sanguíneas de alta velocidad y analizador de tamaño celular ", por W.H. Coulter, el 3 de octubre de 1956 (WHCF, 2019).

A pesar de que Wallace Coulter recibió muchos elogios críticos a lo largo de los años por sus contribuciones a la salud y la industria, evitó la publicidad y el protagonismo personal. En 1997, la compañía fue vendida a *Beckman Instruments* y se le conoció como *Beckman Coulter, Inc.* Tras la venta de *Coulter Corporation*, Wallace se aseguró de que su familia de empleados fuera "atendida" al reservar un fondo total de \$ 100 millones, una parte de la cual se pagó a todos y cada uno de los empleados del mundo en función de sus años de servicio (WHCF, 2019).

El principio de Coulter, también conocido como la zona de detección eléctrica, se hace referencia en muchas normas nacionales e internacionales, y los análisis. Los instrumentos analíticos basados en el principio de Coulter a menudo sirven como referencias en la evaluación de otros analizadores de tamaño de partículas y técnicas de dimensionamiento (Coulter, 2009).

3.9 Mecanismo de funcionamiento del Método Coulter

Este método se puede utilizar para medir cualquier material particulado que pueda suspenderse en una solución de electrolito. El intervalo de medición es muy amplio, ya que pueden encontrarse partículas de tan sólo 0.4 μm y hasta 1600 μm (COULTER, 2019).

En un sistema *COULTER COUNTER*, un tubo con una pequeña abertura en la pared se sumerge en un vaso de precipitados en el que las partículas están suspendidas en un electrolito de baja concentración. Se colocan dos electrodos, uno dentro del tubo con abertura y otro fuera del tubo, y el electrolito crea una trayectoria de corriente cuando se aplica un campo eléctrico, ver Figura 3.4.

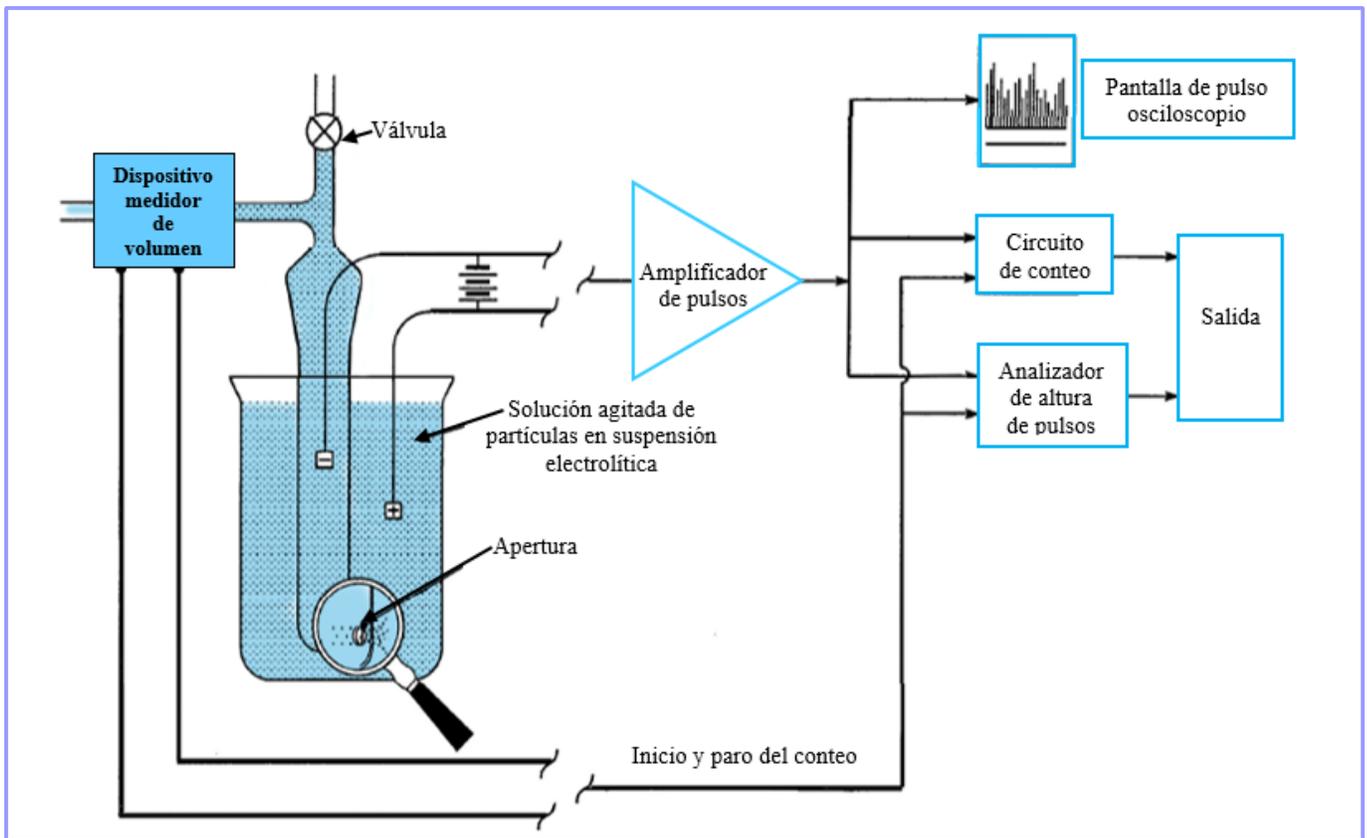


FIGURA 3.4. DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DEL *COULTER COUNTER*.
 FUENTE: IMAGEN ADAPTADA DE COULTER, (2009).

Luego se mide la impedancia entre los electrodos. La abertura crea lo que se denomina "zona de detección". Las partículas a baja concentración, suspendidas en el electrolito equivalente al volumen sumergido de la partícula se desplaza a la zona de detección (Coulter, 2009).

Esto produce un cambio a corto plazo en la impedancia de la abertura. Este cambio puede medirse como pulso de voltaje o pulso de corriente, Figura 3.5 a). La altura del pulso es proporcional al volumen de la partícula detectada. Si se supone una densidad de partícula constante, la altura del pulso también es proporcional a la masa de la partícula, Figura 3.5 b). Esta tecnología también denominada tecnología de abertura (WHCF, 2019).

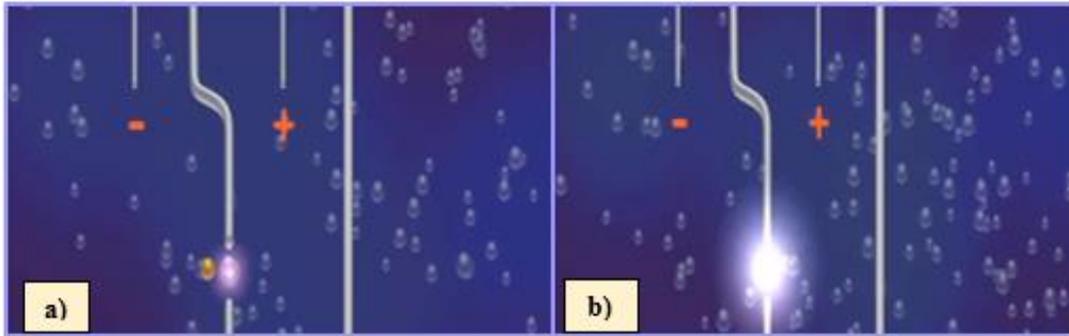


FIGURA 3.5. REPRESENTACIÓN DE EL PASO DE LAS PARTÍCULAS A TRAVÉS DE LA APERTURA Y LA GENERACIÓN DE PULSOS ELÉCTRICOS, SEGÚN EL TAMAÑO DE LA PARTÍCULA.
FUENTE: IMÁGENES TOMADAS DE (WHCF, 2019).

Usando circuitos de analizador de altura de pulsos y recuento, es posible medir la cantidad y el volumen de cada partícula que atraviesa la abertura. Si el volumen del líquido que atraviesa la abertura puede controlarse y medirse de manera precisa, también se puede determinar la concentración de la muestra (Coulter, 2009).

En el equipo *Multisizer™ 3*, los pulsos se digitalizan y guardan con varios parámetros clave que describen cada pulso. Estos parámetros permiten que el instrumento discrimine entre los pulsos de ruido y señal, así como entre los pulsos normales y distorsionados por diferentes motivos cuando las partículas atraviesan la abertura (WHCF, 2019).

Con tasas de recuento y determinación de tamaño de hasta 10, 000 partículas por segundo, lleva menos de un minuto realizar una medición típica con este equipo. El tamaño de la abertura generalmente oscila de 20 a 2000 μm . Cada apertura puede usarse para medir partículas dentro de un intervalo de tamaño del 2 al 80% del diámetro nominal. La capacidad de la tecnología de analizar partículas se limita a aquellas partículas que pueden suspenderse correctamente en una solución de electrolito. Además, el límite del tamaño inferior está limitado por el ruido electrónico generado principalmente dentro de la abertura en sí (COULTER, 2019).

Durante la medición del principio Coulter, a medida que una partícula atraviesa la zona de detección cuando el líquido se extrae del recipiente, un volumen del electrolito equivalente al volumen sumergido de la partícula se desplaza de la zona de detección. Esto produce un cambio a corto plazo en la resistencia de la abertura. Este cambio de resistencia puede medirse como voltaje o pulso de corriente. Al medir la cantidad de pulsos y sus amplitudes, se puede obtener información sobre la cantidad de partículas y el volumen de cada partícula individual (Clesceri, *et al.*, 1998).

La cantidad de pulsos detectados durante la medición es la cantidad de partículas medidas y la amplitud del pulso es proporcional al volumen de la partícula (Clesceri, *et al.*, 1998). El diámetro de la partícula puede determinarse como la resolución de la medición de voltaje o corriente que puede ser muy exacta usando la tecnología electrónica actual. La amplitud de distribución puede determinarse en relación con la exactitud de una sola partícula (Coulter, 2009).

Sin importar la técnica usada para la medición de la DTP, la información proporcionada es tabulada y presentada en gráficas, necesarias para llevar a cabo un análisis detallado. En este caso, se requirió de un contador de partículas para el uso de Método Coulter. Para comodidad y reducción del tiempo del usuario éstas gráficas ya son presentadas en el software, se encuentra una gráfica cuyo análisis muestra la relación del porcentaje de masa, volumen, área o número de partículas por mL de muestra con respecto al incremento de su tamaño y generalmente se presenta en forma de distribución estadística normal, o a través de histograma mostrando una curva continua para aproximar la distribución obtenida, éste tipo de análisis es llamado análisis diferencial y es común encontrarlo en éste tipo de estudios (González, 2017), Figura 3.6.

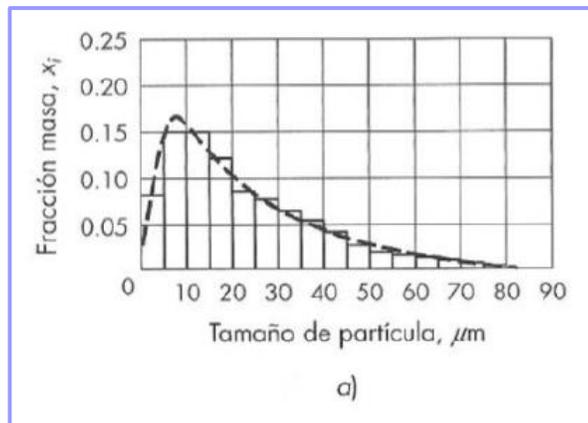


FIGURA 3.6. EJEMPLO DE GRÁFICA DE ANÁLISIS DE DATOS (A).
FUENTE: IMAGEN TOMADA DE (McCabe, *et al.*, 1991).

Una segunda forma de presentar la información es a través de un análisis acumulativo, donde se agrega consecutivamente los incrementos individuales, comenzando por el que contiene partículas más pequeñas y graficando las sumas acumuladas frente al diámetro máximo de partícula en el incremento (González, 2017), Figura 3.7.

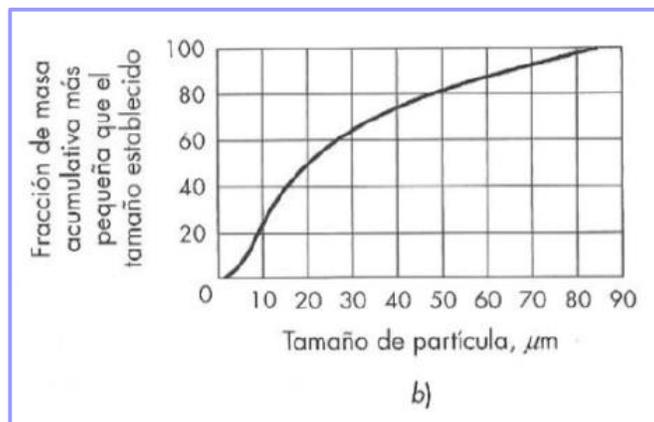


FIGURA 7. EJEMPLO DE GRÁFICA DE ANÁLISIS DE DATOS (B).
FUENTE: IMAGEN TOMADA DE (McCabe, *et al.*, 1991).

La selección del instrumento correcto para un estudio de partículas debe ser consistente con el empleo del análisis esperado de tamaño de partícula (Clesceri, *et al.*, 1998). Se han estudiado algunos de los métodos existentes para analizar la distribución de partículas en muestras de agua, las técnicas a usar y un poco sobre los datos necesarios para su análisis, en este trabajo se busca que la técnica

seleccionada para un análisis detallado sobre la DTP cumpla con características que lo lleven a ser un método empleado de manera regular, facilitando la obtención de resultados en la caracterización de diversas muestras de agua.

De entre los diversos métodos estudiados, se tomó la decisión de emplear el Método Coulter o bien llamado Método de detección eléctrica, éste método se destaca por las siguientes ventajas: las mediciones son llevadas a cabo en tiempo real de 60 segundos por muestra, el volumen ocupado para el análisis de partículas es de 50 μL y los datos son arrojados en gráficas que son generadas por el software propio de la compañía *beakman coulter*, mismas que permiten elaborar un reporte estadístico de manera detallada y en menor tiempo, sin olvidar que se pueden obtener diversos datos de acuerdo con el tipo de análisis que se requiera.

Es conocido que se prefieren las técnicas basadas en la luz para el análisis de partículas en agua debido a su facilidad para trabajar y el bajo costo que representa, sin embargo, los contadores que funcionan por conductividad eléctrica, nos ofrecen opciones cómodas de trabajo y tiempo, así como la exactitud al momento de analizar cada muestra. Frecuentemente, los contadores de partículas basados en la luz son usados para el análisis de tratamiento de agua residual, en cambio, los contadores partículas por conductividad eléctrica se enfocan más en el estudio de las partículas resultantes de las plantas de tratamiento de agua, así como la investigación en agua potable. El cambio de conductividad de la solución en la zona de sensibilidad es directamente proporcional al volumen de la partícula (Allen, 1997).

El contador Coulter es capaz de tener gran precisión, al medir el volumen de una partícula. Los instrumentos basados en la luz se enfocan en la medición de área y generalmente presentan problemas al encontrarse con partículas compuestas por diferentes materiales un ejemplo de ello son el acero y el carbón, cuando estas pasan simultáneamente por un instrumento de luz, la partícula de acero refleja más luz que la partícula de carbono y parece más grande en el sensor de esparcimiento.

El sensor no mide propiamente los tamaños de partículas sino la luz refractada la cual pasa a través de la partícula. Otra interferencia de los contadores basados en la luz hace referencia a las partículas orgánicas debido a su bajo índice de refracción, es difícil su análisis, son prácticamente transparentes (Clesceri, *et al.*, 1998). Un equipo que use el método Coulter es capaz de trabajar con intervalos muy abiertos de tamaño de partículas y adaptarse para el tipo de material particulado presente.

La importancia de contar con una técnica de fácil empleo y alta precisión en la obtención de datos radica en la ambición por conocer con mayor detalle el comportamiento del material particulado que se encuentra presente en el agua, el cual es diferente para cada muestra y cada tipo de agua que se estudie. Un acercamiento a esto figura en la medición de la turbiedad, la cual tiene similitud con los análisis de partículas, principalmente los que son trabajados con luz. Ambos instrumentos emplean una fuente fija de luz para iluminar las partículas suspendida en el agua. La cantidad de luz que interactúa con las partículas es medida mediante un circuito detector, el cual convierte la energía radiante a una señal electrónica (Allen, 1997). Sin embargo, existen desventajas al usar sólo la turbiedad como parámetro para elaborar un análisis con material particulado, ver Tabla 3.4.

TABLA 3.4. COMPARACIÓN ENTRE UN CONTADOR DE PARTÍCULAS Y UN TURBIDÍMETRO.
FUENTE: ADAPTADO DE (Clesceri, *et al.*, 1998).

| CONTADORES DE PARTÍCULAS | TURBIDÍMETROS |
|---|---|
| Cuentan partículas individuales de acuerdo a su tamaño. | No pueden distinguir la cantidad o tamaño de las partículas. |
| Proporcionan una medición cuantitativa o absoluta de las partículas presentes | Proporcionan una medición cualitativa o relativa de las partículas presentes |
| Son sensibles a los cambios pequeños de la concentración de las partículas | Son poco sensibles a los cambios pequeños de la concentración de las partículas |
| Proveen una medición más exacta por encima de los rangos límites de tamaño y concentraciones. | Proporciona una medición aproximada de la concentración de partículas por encima de |

| CONTADORES DE PARTÍCULAS | TURBIDÍMETROS |
|--|--|
| | un ancho rango de tamaños de la partículas y concentraciones. |
| Emplean una fuente de luz diodo láser la cual no se degrada con el tiempo | Emplean una bombilla incandescente como fuente, estas bombillas tienen un filamento que pasado un tiempo se quemará, disminuyendo la luz y afectando la alineación óptica del instrumento. |
| Partículas idénticas pero constituidas de diferente material, son se ven afectadas en su medición. | Partículas idénticas pero constituidas de diferente material esparce cantidades diferentes de luz. |

Finalmente, es destacable que los turbidímetros y los contadores de partículas son complementarios en los análisis, que, usándose conjuntamente, pueden proporcionar un panorama del contenido de partículas a lo largo del proceso de tratamiento de agua. Pero también hay que considerar que dado el detalle de datos que se obtiene con un contador de partículas, es necesario comenzar a cuestionarse si realmente son necesarias tantas técnicas para el análisis de agua.

IV. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El agua se considera apta para el consumo humano cuando no contiene ningún tipo de microorganismo o sustancia, en una cantidad o concentración que pueda suponer un riesgo para la salud humana (Durand, *et al.*, 2005). En diversas partes del país y del mundo no es posible tener acceso al agua potable, ante esta situación, se han propuesto algunas alternativas como lo son la captación de agua de lluvia en diversos países del mundo con buenos resultados, de tal forma que su implementación se ha expandido, recuperando así la práctica antigua de abastecer agua mediante su captación, ya que las canalizaciones de agua que invadieron pueblos y villas a principios del Siglo XX, dieron paso a que el agua de lluvia pasara a segundo plano.

La problemática de abastecimiento de agua es mundial, por ello ha ido incrementado el estudio y comportamiento para los sistemas de captación de aguas lluvias, proporcionando así una fuente alterna de abastecimiento. Sin embargo, la calidad de agua que cada sistema de captación arroje, debe ser estudiada de forma particular según se tengan las condiciones donde se está llevando la captación (Rodríguez, 2009).

Es cierto que en algunos países ya se cuenta con éstos sistemas de captación y que su calidad de agua arrojada, es adecuada para su consumo, sin embargo, no en todos los lugares la calidad de agua de lluvia se ha estudiado a fondo, se desconocen en varias localidades urbanas sus condiciones físicas, químicas y microbiológicas, que dependen de diversos componentes presentes en el aire por actividades antrópicas y condiciones naturales (Ospina & Ramírez, 2014). A pesar de los progresos hechos en los últimos años, en América Latina y el Caribe es posible observar problemas de calidad del agua en la mayoría de los países, en general consecuencia de deficiencias en la operación y mantenimiento de los servicios (Fernández & du Mortier, 2005).

En México, la demanda de agua de agua cada vez es mayor, ya sea por el aumento de la población o porque las fuentes de abastecimiento naturales son contaminadas día con día, y la búsqueda por obtener agua limpia es cada vez más preocupante, y va desde encontrar una fuente que puede abastecer toda esa demanda, hasta tener agua con la calidad necesaria para su empleo.

Los métodos de caracterización del agua captada, varían según los reglamentos y normas establecidos por cada país o ciudad. Para el caso de México, se encuentra regido por las disposiciones de la NOM-127-SSA1-1994, cuyos estándares, aseguran la calidad requerida para agua de uso y consumo humano. No obstante, los métodos señalados para determinar si existe una buena calidad o no, llegan a ser tardados e incluso bastante costosos, en efecto, en la actualidad el costo de cuantificación de la normatividad de agua potable es de aproximadamente \$16,000 por muestra en un laboratorio certificado.

Por ello, es necesario contar con una técnica como la medición y determinación de la DTP, como un método alternativo con mediciones en tiempo real y a menor costo para el análisis de la calidad de agua requerida, según las necesidades existentes. En estudios previos como los de Levine, *et al.*, (1991), Neis & Tiehm, (1997), Chávez, *et al.*, (2008), García, (2010), la técnica analítica ha permitido clasificar algunos contaminantes en distintos efluentes tratados, según su tamaño y número de partículas, pero ninguno de éstos efluentes para el caso de la potabilización de agua de lluvia, por lo que los datos son limitados.

El suministro de agua para consumo humano debe garantizarse tanto en cantidad como en calidad según las necesidades de la población, las aguas procedentes de ríos, lagos, acuíferos y cuencas, necesitan de un tratamiento complejo y caro antes de ser suministradas a los consumidores, debido a que las precipitaciones traen cantidades apreciables de materiales sólidos a la tierra como las bacterias, esporas, polen, polvo, e incluso, organismos mayores (Romero, 2008).

El abastecimiento de agua potable en diversas partes del país es de suma importancia y urgencia pues cubre prácticamente todas las necesidades que día con día se presentan. Por ello es necesario contar con un método analítico cuya sensibilidad en su análisis brinde la confiabilidad de los datos arrojados, y cuyos resultados dados, se obtengan un menor periodo de tiempo en comparación con los análisis ya conocidos en la práctica (COT, DQO, Turbiedad, etc.), dando así la seguridad de que la fuente de abastecimiento propuesta cuenta con los estándares de calidad para su uso y consumo.

En diferentes estudios revisados, la evaluación de la calidad del agua se establece con base en parámetros tradicionales, sin embargo, el comportamiento de las partículas antes y después de que el agua ha sido sometida a un proceso de potabilización es limitada o nula, de ahí la importancia de dicha investigación.

4.1 Objetivo general

Evaluar la calidad del agua de lluvia previo y posterior a su potabilización, empleando la técnica de Distribución del Tamaño de Partícula (DTP) como parámetro indicador.

4.2 Objetivos particulares

- ◇ Establecer la variabilidad de la calidad del agua de lluvia con base en el número y diámetro de partícula.
- ◇ Analizar la calidad presente del agua de lluvia captada y después de pasar por un sistema de barreras múltiples, usando la DTP en número y diámetro como parámetro de evaluación para determinar la mejor barrera de potabilización.
- ◇ Establecer la relación entre el tamaño de partícula y la presencia de contaminantes en agua de lluvia y tratada, usando como base, los datos obtenidos del análisis de muestras durante la cuantificación de diversos parámetros.

V. METODOLOGÍA

La metodología seguida para el desarrollo de este trabajo fue construida mediante cinco etapas, las cuales, son descritas brevemente en la Figura 5.1.

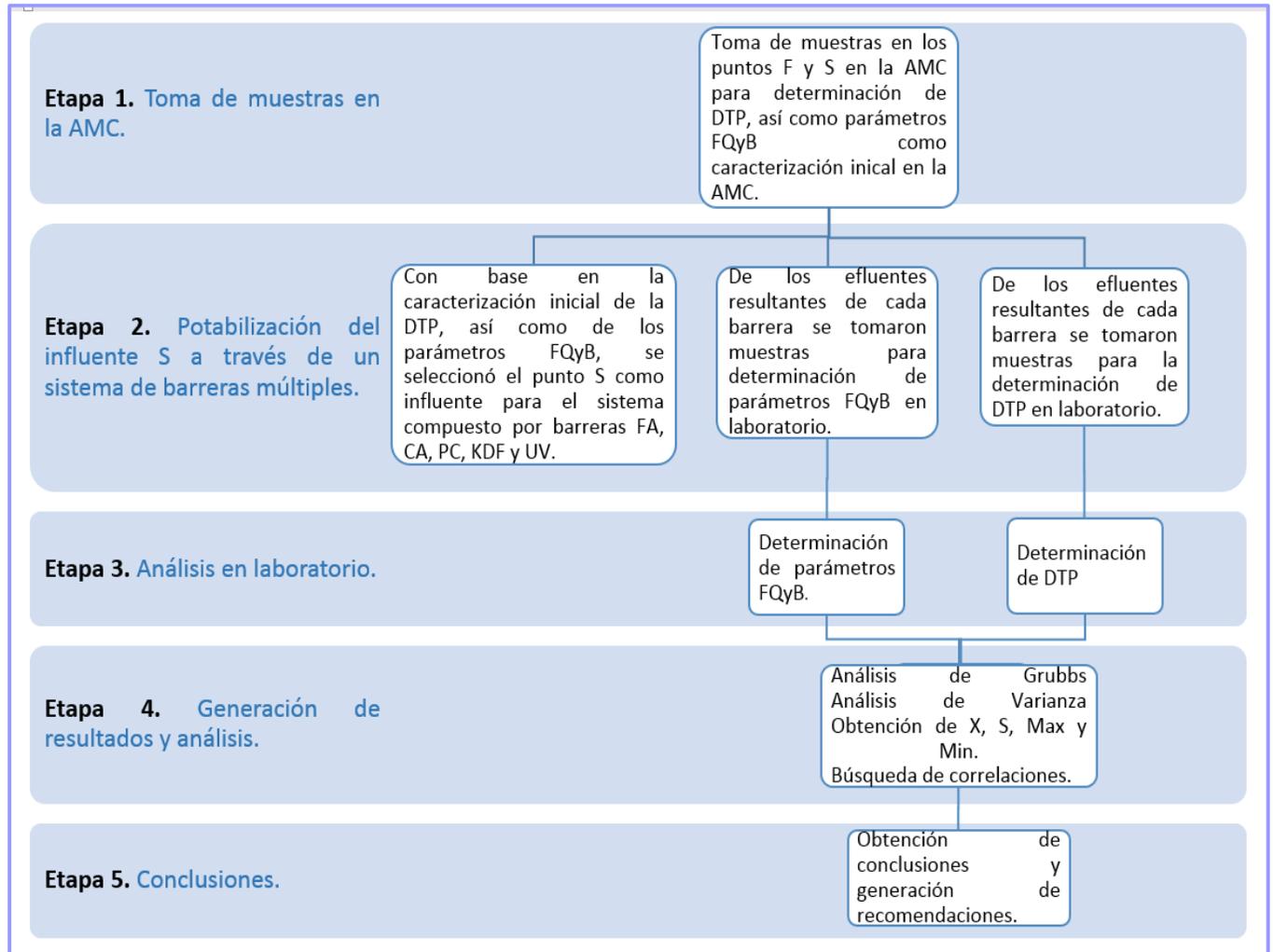


FIGURA 8. DIAGRAMA DE TRABAJO (F: FONDO, S: SUPERFICIE, AMC: ACADEMIA MEXICANA DE CIENCIA, FQYB: FÍSICOS QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS, FA: FILTRO DE ARENA, CA: CARBÓN ACTIVADO, PC: PLATA COLOIDAL, KDF: *KINETIC DEGRADATION FLUXION*, UV: ULTRAVIOLETA, DTP: DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA, \bar{X} : MEDIA, S: DESVIACIÓN ESTÁNDAR, MAX: MÁXIMO, MIN: MÍNIMO.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

5.1 Sitio de muestreo

El caso de estudio fue realizado en la Ciudad de México, en una zona donde la mayor parte del territorio está regido por un clima templado subhúmedo, cuya la temperatura más alta es de 25 °C, mientras que la temperatura mínima que presenta es de 5°C, las lluvias se presentan en verano y la precipitación anual es variable según la zona en la que nos encontremos la cual puede variar de 600 a 1 200 mm/año (INEGI, 2018), Figura 5.2.



FIGURA 9. CLIMA CIUDAD DE MÉXICO, MÉXICO.

FUENTE: ADAPTADO DE INEGI, CARTA DE CLIMAS 1:1 000 000 Y EDICIÓN PROPIA.

El muestro se realizó en el Auditorio Galileo Galilei dentro de las instalaciones de la Academia Mexicana de Ciencias (AMC), ubicada en la Carretera federal México-Cuernavaca, calle Cipreses S/N, Colonia San Andrés Totoltepec, Tlalpan, 14400. Ver figura 5.2 y cuyas coordenadas geográficas son: 19°14'30.32" Latitud N y 99°10'26.42" Longitud O, Figura 5.3.



FIGURA 10. AUDITORIO "GALILEO GALILEI", UBICADO EN LA ACADEMIA MEXICANA DE CIENCIAS.
FUENTE: IMAGEN TOMADA DEL SOFTWARE GOOGLE EARTH Y EDICIÓN PROPIA.

5.2 Toma de muestras realizada en la Academia Mexicana de Ciencias

La toma de muestras se llevó a cabo en el reservorio ubicado en el interior del Auditorio "Galileo Galilei", cuyo volumen se aproxima a los 42 m^3 , Figura 5.4.



FIGURA 11. RESERVORIO DEL AUDITORIO "GALILEO GALILEI".
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Se tomaron muestras considerando dos puntos de muestreo denominados como "Fondo (F) y Superficie (S)", donde el fondo corresponde al sitio más profundo del reservorio.

El volumen de muestra tomado fue, de 40 a 60 L para S (agua empleada para potabilizar) y 1 L para F, por día de muestreo. El periodo de muestro se reserva a una toma por semana durante los meses de julio de 2017 a enero de 2018, realizando un total de 24 muestreos. Figura 5.5.



FIGURA 12. MUESTREO DE AGUA DE LLUVIA EN EL PUNTO S, UBICADO EN EL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE LA AMC.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

El muestreo correspondiente para el análisis de partículas fue realizado de acuerdo con el método estándar 2560 Conteo y distribución de tamaño de partícula (Clesceri, *et al.*, 1998). La toma de muestras se llevó a cabo en botes de plástico previamente lavados con agua destilada Tipo I y totalmente secos, la exposición entre el fluido a tomar y el aire fue mínima, así como la velocidad de entrada del fluido al recipiente cuidando no propiciar la generación de turbulencia y burbujas dentro del recipiente y evitando así un cambio en la distribución de las partículas, Figura 5.6.



FIGURA 13. TOMA DE MUESTRAS PARA DTP EN FONDO Y SUPERFICIE DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE AGUA DE LLUVIA EN LA AMC.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Para la toma de muestras destinada al análisis microbiológico (coliformes fecales y totales), se tuvo un control especial para tomar muestras en un medio estéril, se empleó alcohol isopropílico en las manos para impedir la contaminación externa de las muestras con otras partículas y evitar destruir la posible presencia de coliformes presentes en las mismas.

Las muestras fueron tomadas en bolsas estándar de 100 ml con 10 mg de tiosulfato de sodio activo en pastilla, Figura 5.7.

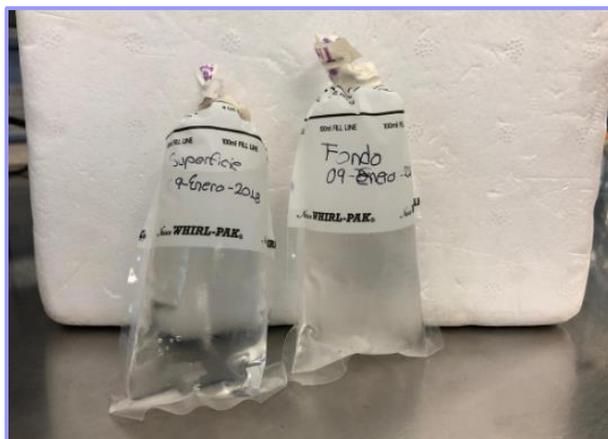


FIGURA 14. TOMA DE MUESTRAS DE LOS PUNTOS "F Y S" EN EL SITIO DE MUESTREO, PARA LA DETERMINACIÓN DE COLIFORMES FECALES Y TOTALES.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Al terminar la toma, las muestras fueron selladas y llevadas al laboratorio ubicado en el Instituto de Ingeniería. El agua muestreada fue almacenada a una temperatura de 4 °C en la cámara fría de las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Ambiental (LIA), Edificio 5, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán Ciudad de México, México.

5.3 Sistema de tratamiento

Las muestras tomadas de la AMC fueron analizadas en las Instalaciones del LIA, para ambos puntos muestreados (F y S), se llevó a cabo su caracterización el mismo día a su llegada, y conforme a los resultados reportados por Romero, (2017); Bello, (2018); Molina, (2019), que tuvieron evento en el mismo sitio de muestreo, se asignó un tren de potabilización para la muestra S, el cual cuenta con el diseño de un sistema de potabilización piloto para el tratamiento del agua de lluvia captada, mostrada en la Figura 5.8.

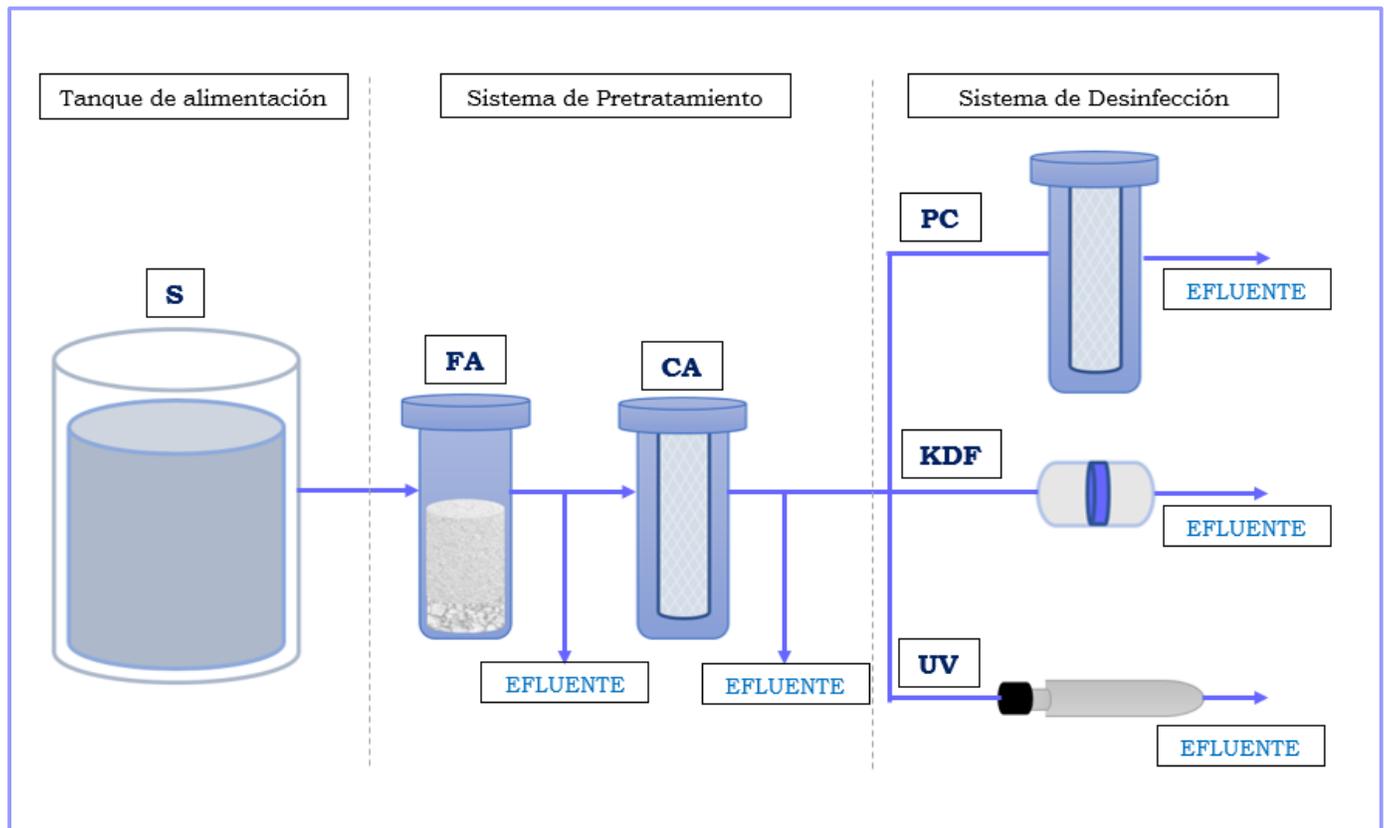


FIGURA 15. DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO (DFP) DEL SISTEMA DE POTABILIZACIÓN PROPUESTO.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

El sistema de potabilización consta de una bomba peristáltica y un controlador de flujo para la entrada del sistema. El agua muestreada en la AMC del punto S, recorría una serie de filtros, encargados de llevar un pretratamiento del agua, el cual consta de un Filtro de Arena (FA) y un Filtro de Carbón Activado (CA) ubicados a la entrada del sistema, y posteriormente, el flujo inicial, es subdividido en tres líneas de desinfección¹⁶, a saber; un filtro de Plata Coloidal, o bien plata impregnada

¹⁶ De acuerdo con LENNTECH, (2018), el término de desinfección, implica la extracción, inactivación o eliminación de los microorganismos patógenos que existen en el agua. La destrucción y/o desactivación de los microorganismos supone el final de la reproducción y crecimiento de estos microorganismos. Si estos microorganismos no son eliminados, el agua no es potable y es susceptible de causar enfermedades. La desinfección se logra mediante desinfectantes químicos y/o físicos, estos agentes también extraen contaminantes orgánicos del agua, que son nutrientes o cobijo para los microorganismos, y que tienen un efecto residual, lo cual significa que se mantienen como agentes activos en el agua después de la desinfección para prevenir el crecimiento de los microorganismos en las tuberías, provocando la recontaminación del agua.

con carbón, un sistema de *Kinetic Degradation Fluxion* (KDF) y un sistema de Luz Ultravioleta (UV), Figura 5.9.

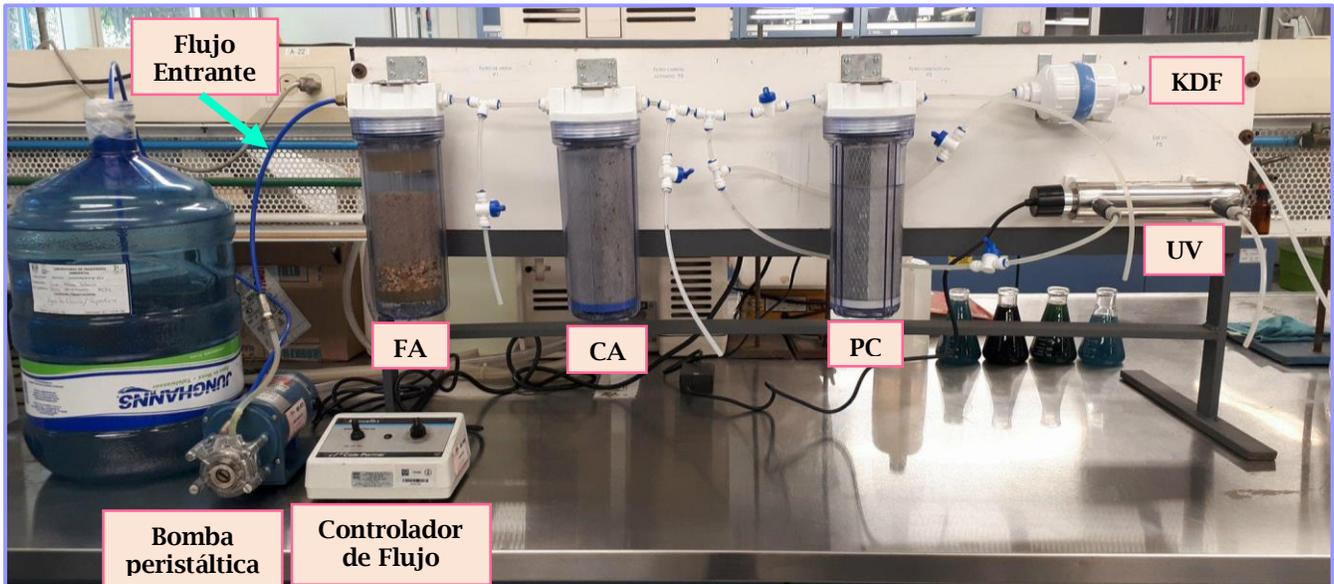


FIGURA 169. SISTEMA DE POTABILIZACIÓN PILOTO.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Se llevó a cabo la medición de flujos a la de salida de cada línea de desinfección, lo cual permitió tener un control del flujo diario durante la operación, ver Figura 5.10.

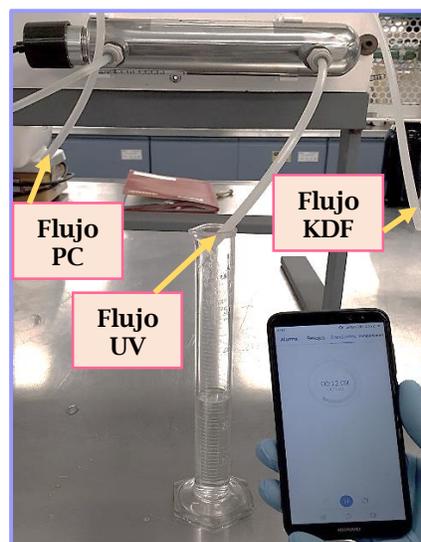


FIGURA 17. MEDICIÓN DE FLUJO EN CADA SISTEMA DE DESINFECCIÓN.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

La planta operó durante 20 min. hasta lograr una estabilización en la velocidad de flujo y un previo lavado con el influente a analizar. Se alimentó un flujo de 20 L/d durante cinco días a la semana, el cual recorrió cada barrera del tratamiento propuesto, y finalmente se procedió a la toma de muestras en cada salida de los filtros o sistemas, Figura 5.11. Las muestras tomadas del sistema de potabilización posteriormente se caracterizaron para su evaluación.

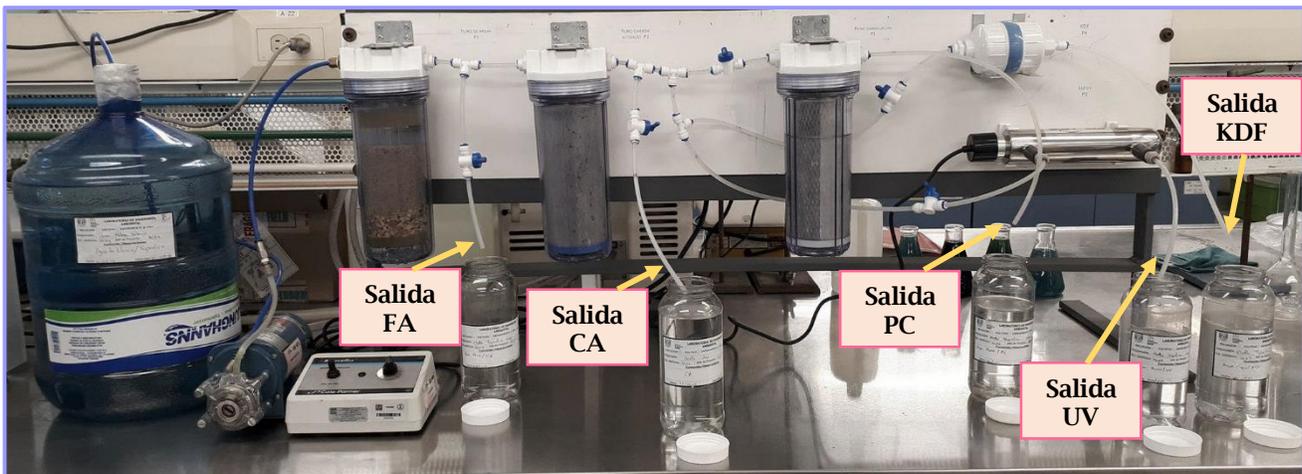


FIGURA 18. TOMA DE MUESTRAS DE CADA SISTEMA DE TRATAMIENTO.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Se llevó a cabo la toma de muestras para la DTP, siguiendo las indicaciones del método estándar 2560 Conteo y distribución de tamaño de partícula (Clesceri, *et al.*, 1998), donde se emplearon 10 mL de muestra en cada contenedor *Acuvette*. Los cuales, se recabaron de las muestras guardadas previamente de cada punto efluente del sistema de tratamiento, así como los puntos F y S, Figura 5.12.

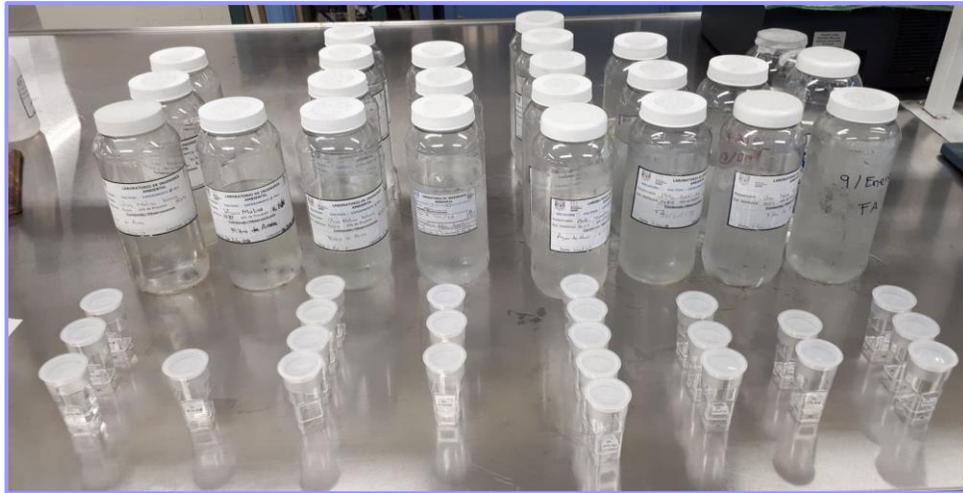


FIGURA 19. TOTALIDAD DE MUESTRA TOMADAS DE UNA BARRERA DE TRATAMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Al igual que en la AMC, se llevó a cabo la toma de muestras a la salida de cada uno de los puntos de muestreo (Figura 5.9), efluentes resultantes del sistema de potabilización para determinación de coliformes fecales y totales, Figura 5.13.



FIGURA 203. TOMA DE MUESTRAS DE LOS EFLUENTES PARA LA DETERMINACIÓN DE COLIFORMES FECALES Y TOTALES.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Como parte final de la operación del sistema de potabilización, las salidas de cada flujo se cubrieron con papel aluminio, disminuyendo la interacción de los contaminantes presentes en el aire, con los puntos de salida.

5.4 Técnicas y métodos analíticos usados en la determinación de la calidad de agua.

Como objeto principal de esta investigación, se llevó a cabo la determinación de la Distribución de Tamaño de Partícula tanto para las muestras tomadas en la AMC, como de los efluentes resultantes del sistema de potabilización experimental. Así mismo, la caracterización de la calidad inicial y a la salida de cada efluente potabilizado, se realizó conforme a las disposiciones de la NOM-127-SSA1-1994. "SALUD AMBIENTAL, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO-LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION". La metodología para llevar a cabo estas pruebas, es descrita en los siguientes apartados.

5.4.1 Distribución del tamaño de partícula (DTP)

La medición correspondiente al tamaño de partícula fue realizada con ayuda de un contador de partículas Multisizer™ 3 Coulter Counter ® de la marca *BECKMAN COULTER* con disposición de una celda *BECKMAN COULTER* cuyo diámetro de apertura¹⁷ seleccionado corresponde a 30 µm, que evalúa intervalos de medición de 0.6 a 18 µm, el tamaño fue seleccionado con base en la experiencia de Chávez (2004), y Romero (2017), quienes se encargaron de evaluar la DTP en distintos intervalos de tamaño de partícula que corresponden a celdas de diferente diámetro de apertura, tanto en agua residual como en agua potable, respectivamente. Y de

¹⁷ El término apertura, hace referencia al orificio que contiene la celda usada para la medición de DTP, a través del cual, pasa la luz y las partículas que son menores al tamaño de diámetro que tenga (COULTER, 2019).

las cuales, la mejor celda para trabajar, corresponde a la ya mencionada en este trabajo.

Para su operación fue necesario preparar solución isotónica al 0.9% (m/V) de NaCl según Allen (1997), y de acuerdo con el número de muestras a analizar. El compuesto salino es puesto a secar a 85 °C por lo menos durante cinco días debido a que la humedad de la sal puede afectar la pureza de la solución electrolítica. Esta solución se hizo pasar por un sistema de filtración usando un tamaño de poro de 0.20 μm basándose en el documento técnico *Aperture Instrument CC Calibrator L3* © 2016 Beckman Coulter, Inc. del fabricante usando membranas poliméricas de 47 mm de diámetro, marca *Whatman™*, filtrando la solución tres veces como mínimo Figura 5.14.



FIGURA 21. FILTRACIÓN DE LA SOLUCIÓN ISOTÓNICA 0.9% m/v.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Para llevar a cabo el análisis de DTP en el contador de partículas, se tomaron 10 mL de muestra y a cada una de ellas se le adicionaron 10 mL de solución isotónica preparada y filtrada, estas fueron depositadas en contenedores *Acuvette*, Figura 5.15.

En las muestras correspondientes a los puntos de muestreo “Fondo y Superficie (influyente)”, se tomaron 10 mL de cada muestra, que se hicieron pasar por membranas de malla de nylon de 20 μm con 25 mm de diámetro marca *Merck Millipore*, usando acrodiscos (debido al diámetro de la membrana) que favorecieron el tiempo empleado en la filtración. En lo que respecta a los efluentes provenientes de las barreras del sistema de potabilización no fue necesario emplear esta operación.

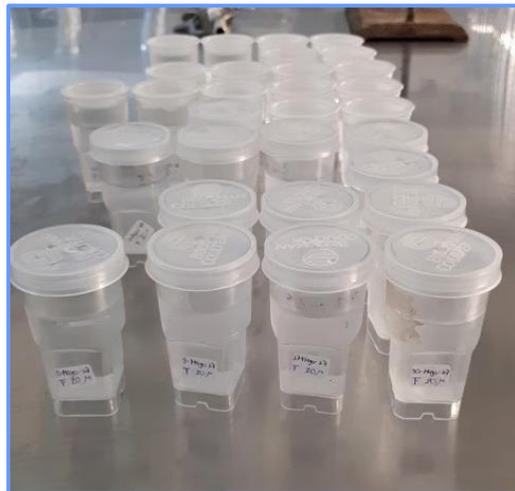


FIGURA 22. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS PARA SU ANÁLISIS.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Para el análisis de las muestras preparadas, se elaboró una curva de calibración correspondiente a la celda de apertura 30 μm , usando un estándar de referencia L3, *Nominal 3um, Latex Particle, Nist Traceable*, 1 x 15ml, marca *Beckman Coulter*, el cual es suministrado por la misma compañía, y corresponde al establecido en el en el manual¹⁸ cargado en el *Software* del equipo.

Se establecieron las condiciones de operación durante el proceso experimental, tomando como referencia la medición de la concentración de un blanco (NaCl como solución electrolítica en este proceso), de tal manera que la curva arrojada en el software sirva como referencia para el análisis de DTP. Figura 5.16.

¹⁸ *Multisizer 3 Operator's Manual*

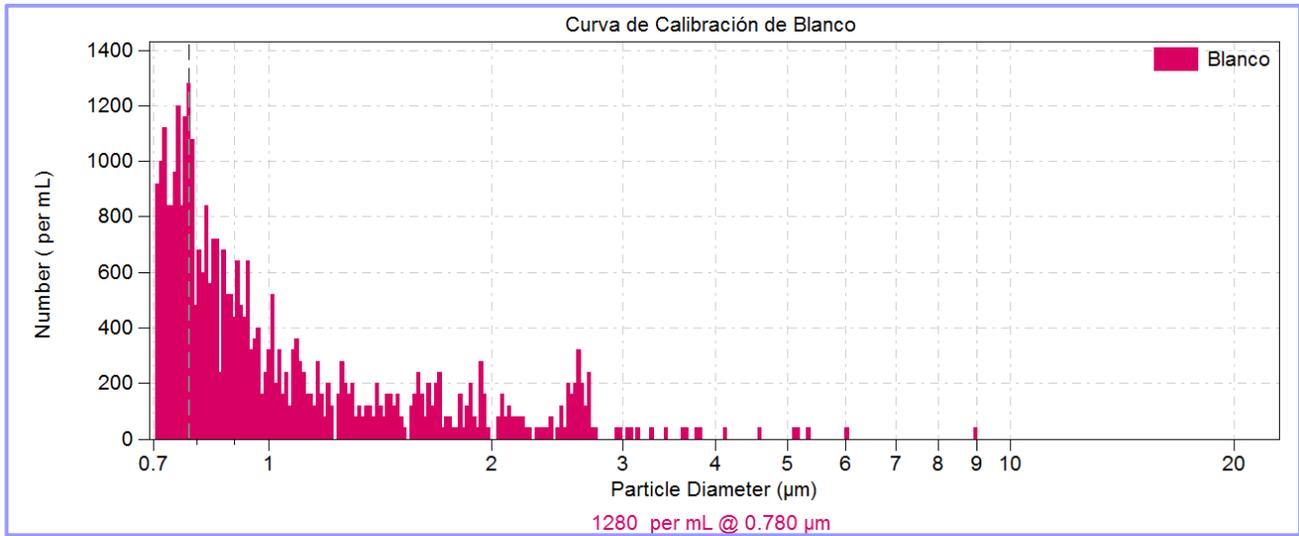


FIGURA 23. CURVA DE CALIBRACIÓN DEL BLANCO.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, SOFTWARE MULTISIZER 3, VERSION 3.53, COPYRIGHT © 1990-2008 BECKMAN COULTER, INC.

La figura anterior muestra la disposición de un determinado número de partículas, divididas en canales que corresponden a los tamaños en diámetro encontrados en el blanco (solución isotónica), donde, el máximo número obtenido por L fue de 1.28, y cuyo diámetro en el 90% de los casos analizados es menor o igual que 0.780 µm.

Las muestras analizadas se referenciaron a esta curva obtenida, considerando que la concentración de contaminantes de la solución isotón, es prácticamente despreciable. Es importante mencionar que el contador de partículas trabaja con muestras de 50s µL, y el programa se encarga de escalar esta cantidad a mL.

Con la ayuda de la curva de calibración, fue posible establecer condiciones de operación para obtener el número y volumen que las partículas ocupan en las muestras a analizar (Chávez, *et al.*, 2008). Las condiciones de operación se muestran en la Tabla 5.1.

TABLA 5.1. CONDICIONES DE OPERACIÓN ESTABLECIDAS DESPUÉS DE LA CALIBRACIÓN EN LA APERTURA DE 30 μm .
 FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, DATOS TOMADOS DEL SOFTWARE DE OPERACIÓN.

| CONDICIÓN DE OPERACIÓN | VALOR ARROJADO | UNIDAD DE MEDIDA |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Modo de control | 50 (Volumétrico) | μL |
| Apertura | 30 | μm |
| Kd | 41.548 | - |
| Corriente | 400 | μA |
| Ganancia | 8 | - |
| Corridas | 1 | - |
| Tamaño de la señal | 0.738 | μm |
| Tasa de flujo | 3.4 | $\mu\text{L/s}$ |
| Resistencia | 56.3 | K ohms |

- Sin unidades

Kd Constante de calibración

Cada muestra previamente preparada fue analizada en el contador de partículas, donde un volumen de 50 μL fue pasado a través de la apertura de 30 μm , con un tiempo de 60 s como máximo en cada corrida. Ver Figura 5.17.

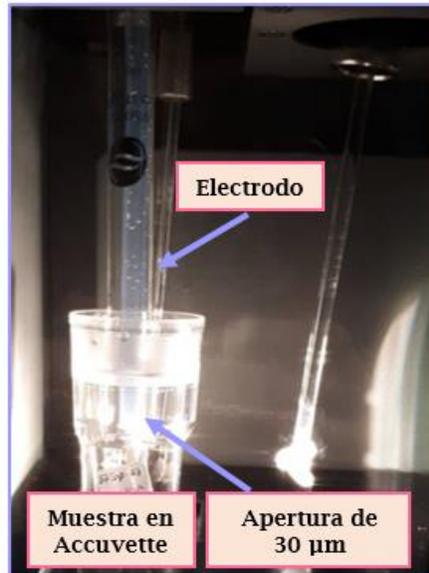


FIGURA 24. MEDICIÓN DE LAS MUESTRAS EN EL EQUIPO.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Con ayuda del *Software Multisizer 3, Version 3.53, Copyright® 1990-2008 Beckman Coulter, Inc.*, es posible llevar a cabo la operación del equipo, los datos obtenidos son registrados en la computadora y guardados para su posterior análisis, Figura 5.18.



FIGURA 25. MEDICIÓN DE LAS MUESTRAS EN EL EQUIPO Y GRÁFICA GENERADA POR EL SOFTWARE.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Es importante mencionar que en algunas muestras fue necesario llevar a cabo diluciones para ayudar al sistema a analizar la muestra, particularmente en aquellas que pertenecen al sistema de pretratamiento y a los meses de sequía, es decir, disminuir el número de partículas presentes en el medio impidiendo la saturación en la apertura de la celda al intentar pasar un gran número de partículas. En la Tabla 5.2 se muestran las diluciones llevadas a cabo para mayor detalle sobre el cálculo de las diluciones, consultar ANEXO A1.

TABLA 5.2. DILUCIONES REALIZADAS DURANTE EL ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

| VOLÚMEN TOTAL EXTRAIDO (mL) | VOLÚMEN AGREGADO DE ISOTÓN (mL) | VOLÚMEN DE ISOTÓN EN LA MUESTRA (mL) | VOLÚMEN DE MUESTRA PRESENTE (mL) | VOLÚMEN ELECTROLÍTICO REGISTRADO EN EL SOFTWARE (mL) |
|---|---|--|--|--|
| 0 | 0 | 10 | 10 | 10 |
| 10 | 10 | 15 | 5 | 15 |
| 5 | 5 | 17.5 | 2.5 | 17.5 |
| 2.5 | 2.5 | 18.75 | 1.25 | 18.75 |
| 0.625 | 0.625 | 19.375 | 0.625 | 19.375 |

Una vez finalizada la medición de muestras, es posible mantener la apertura dentro del equipo, siempre y cuando se encuentre sumergida en una solución limpiadora *Coulter Cleanz*, hasta su posterior uso del equipo, Figura 5.19.



FIGURA 26. CELDA PUESTA EN SOLUCIÓN LIMPIADORA.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

También se recomiendan sesiones de limpieza y mantenimiento del equipo por lo menos cada mes, esto ayudará a que el equipo se encuentre en condiciones óptimas de operación y listo en cuanto se requiera un nuevo análisis de partículas. Ver ANEXO A2.

5.4.2 Absorbancia UV 254 nm (Abs UV_{254 nm})

Se midió mediante el empleo de un espectrofotómetro DR 5000 marca Hach usando una longitud de onda correspondiente a 254 nm, para ello fue necesario contar con una celda de cuarzo dentro de la cual, un haz de luz atravesó la muestra para su medición. Figura 5.20.



FIGURA 27. DETERMINACIÓN DE ABSORBANCIA UV_{254nm} .
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

5.4.3 *Carbón orgánico total (COT)*

Para este parámetro se empleó el método 10128 de medición directa Hach. Dicho método consiste en poner un volumen apropiado de muestra en un tubo de ensaye que cuenta con reactivo provisto de fabricación, la muestra es acidificada (H_3PO_4) hasta tener un pH de 2 unidades. Dentro del tubo de ensaye se coloca una ampolleta de azul de metileno, la cual se abre una vez dentro del vial, Figura 5.21 A. Se colocan los viales a 105 °C durante 20 minutos, Figura 5.21 B y pasado el tiempo se deja enfriar y se procede a la lectura en un espectrofotómetro.

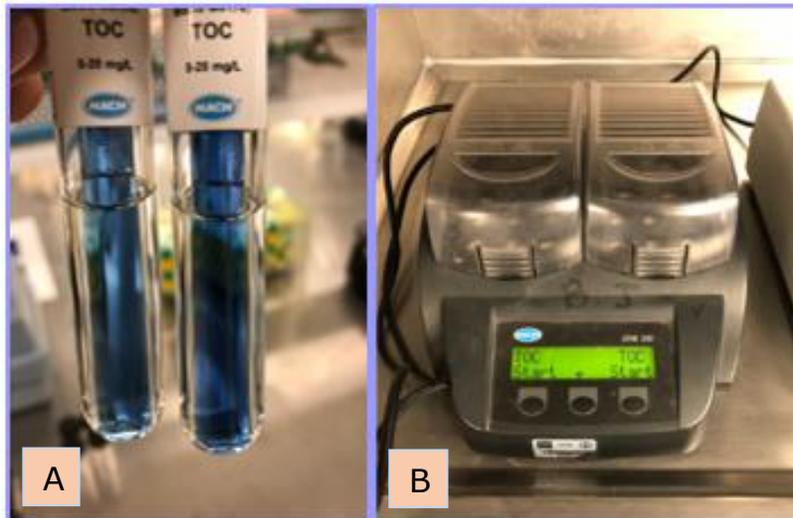


FIGURA 28. DETERMINACIÓN DE COT.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

5.4.4 Coliformes fecales y totales

Como parámetro biológico, se cuantificaron con ayuda del Kit de pruebas *Simplate® Total Plate Count Color Indicator*, siguiendo las instrucciones de fabricación recomendadas, Figura 5.22. Se basa en una técnica colorimétrica donde la presencia de coliformes totales se muestran en los pocillos pintados de rosa fluorescente, mientras que los coliformes fecales son encontrados con ayuda de una lámpara de luz UV de 366 nm, cuya tinción es la fluorescencia en color azul.

Como muestra la Figura 5.22 A, la muestra es adicionada en un vial que contiene reactivo de fabricación, la muestra se vierte sobre platillos preparados con medio en cada pocillo, Figura 5.22 B y el exceso se retira sobre la almohadilla Figura 5.22 C. La muestra se incuba durante 24 a 35 °C.

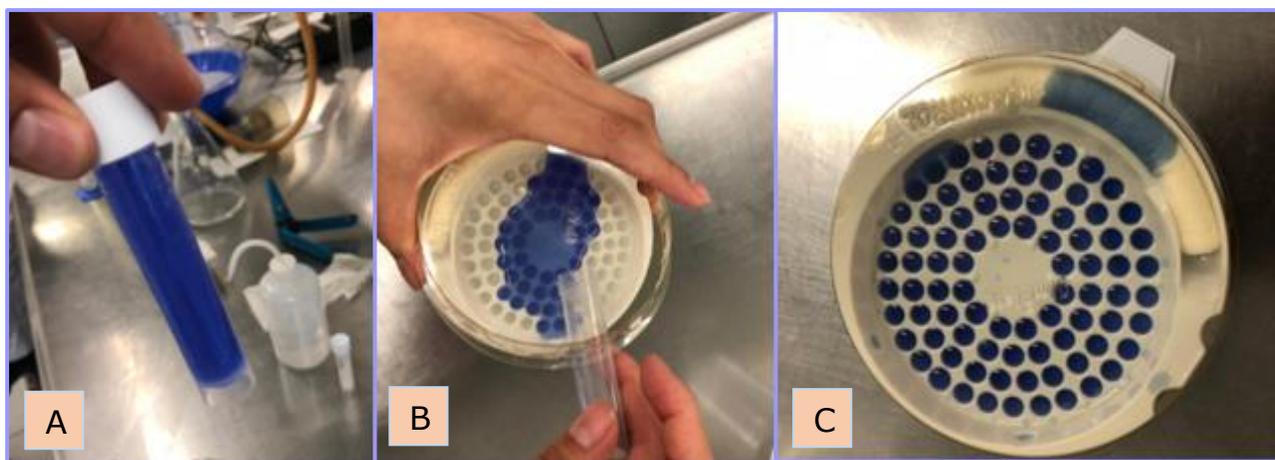


FIGURA 29. DETERMINACIÓN DE COLIFORMES FECALES Y TOTALES.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

5.4.5 Color

Se midió color aparente, así como verdadero usando una comparación visual con una escala estandarizada de escala platino-cobalto 8025 y siguiendo los lineamientos de la Norma Mexicana NMX-AA-045-SCFI-2001, "Análisis de agua- determinación de color platino cobalto en aguas nacionales, residuales y residuales tratadas- método de prueba", Figura 5.23. Se empleó el método espectrofotométrico depositando muestra en una celda de plástico, se toma lectura del espectrofotómetro DR 5000.

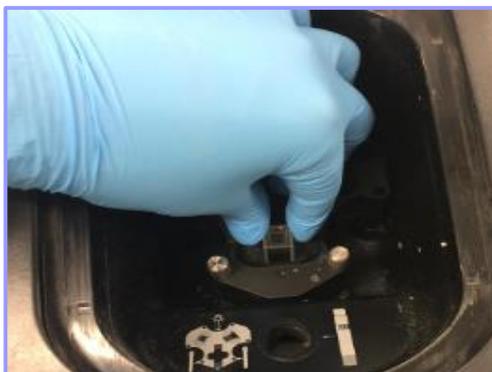


FIGURA 30. DETERMINACIÓN DE COLOR.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

5.4.6 Demanda química de oxígeno (DQO)

Al igual que para el COT, se empleó una técnica de Hach usando el método 8000 de digestión. Se coloca un volumen adecuado de muestra dentro un vial previamente provisto con reactivo desde fabricación, Figura 5.24 A se lleva a cabo el mismo proceso para el agua destilada que funciona como un blanco, Figura 5.24 B. Finalmente se lleva a digestión durante 120 minutos a 150 °C, Figura 5.24 C al terminar la digestión y una vez que los ensayos se encuentren a temperatura ambiente se toma lectura mediante un espectrofotómetro.

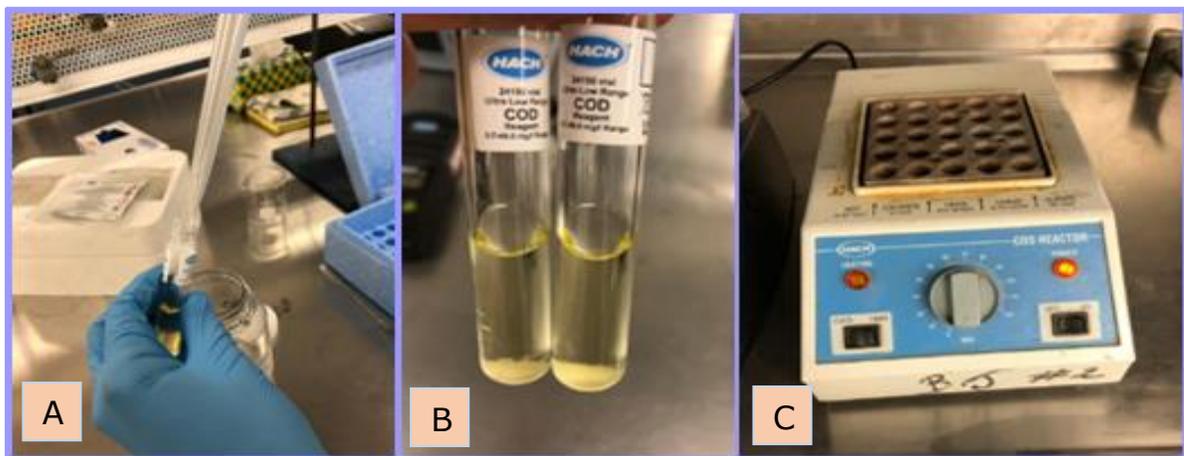


FIGURA 31. DETERMINACIÓN DE DQO.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

5.4.7 Potencial de hidrógeno (pH)

El pH fue medido con ayuda de un multiparámetro marca OAKTON PC 450 previamente calibrado, y siguiendo los lineamientos de la Norma Mexicana NMX-AA-08-SCFI-2016, "Análisis de agua-medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba". Se usó la técnica electrométrica determinando la actividad de los iones hidrógeno por medidas potenciométricas usando un electrodo. Figura 5.25.



FIGURA 32. DETERMINACIÓN DE PH.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

5.4.8 Sólidos disueltos totales (SDT)

La cuantificación de este parámetro fue realizada mediante dos técnicas, la primera corresponde nuevamente al uso del multiparámetro OAKTON PC 450, de la misma forma que en el pH, se midió la actividad de los SDT usando un electrodo. Figura 5.26.



FIGURA 33. DETERMINACIÓN DE SDT USANDO UN MULTIPARÁMETRO.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

La segunda técnica se ajusta a los lineamientos de la Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015, "Análisis de agua-medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba". Este método de prueba consiste en la filtración de un volumen de muestra de acuerdo a la cantidad de sólidos probables a través de una membrana de 45 μm , Figura 5.27 A, la alícuota que atraviesa la membrana corresponde a la cantidad total de sólidos disueltos, la cual, es puesta en una capsula de porcelana, Figura 5.27 B, las capsulas son llevadas a evaporación a sequedad a 105 $^{\circ}\text{C}$, Figura 5.27 C. Por diferencia de pesos se conoce en mg/L los SDT.



FIGURA 34. DETERMINACIÓN DE SDT USANDO NMX-AA-034-SCFI-2015.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

5.4.9 Sólidos suspendidos totales (SST)

Al igual que los SDT, la técnica analítica corresponde a los lineamientos de Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015, donde los filtros previamente enjugados con agua destilada y secados en la estufa a 105 $^{\circ}\text{C}$, Figura 5.28 A son usados para pasar un volumen de muestra en función de la cantidad de sólidos presentes, Figura 5.28 B, la materia retenida en la membrana corresponde a la cantidad de SST, Figura 5.28 C, estos son llevados a secar a 105 $^{\circ}\text{C}$, Figura 5.28 D.

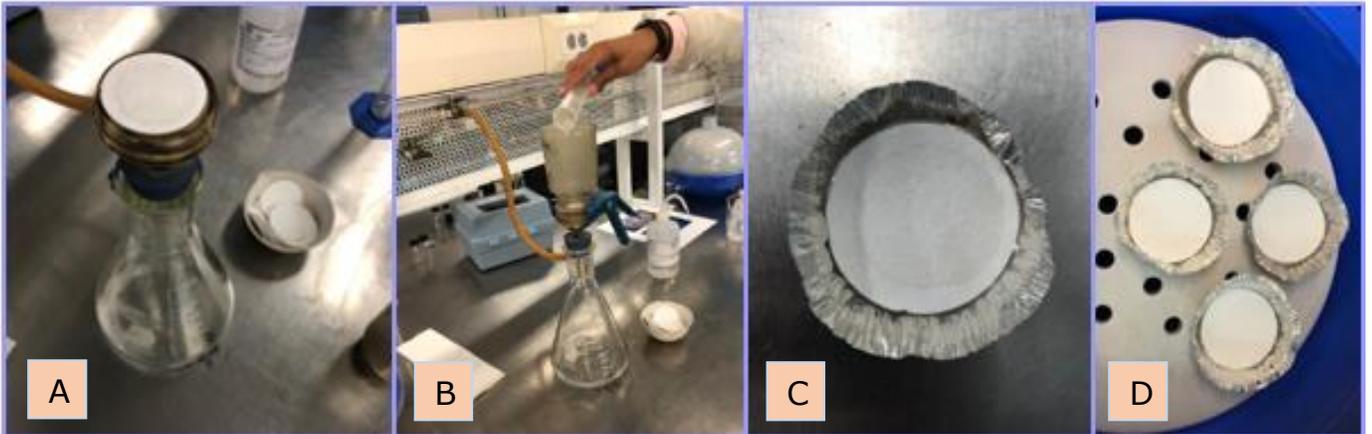


FIGURA 35. DETERMINACIÓN DE SST USANDO NMX-AA-034-SCFI-2015.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

5.4.9.1 *Turbiedad*

La turbiedad fue medida usando un turbidímetro marca Hach 2100N con previa calibración y siguiendo los lineamientos de la Norma Mexicana NMX-AA-038-SCFI, "Análisis de agua-determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- método de prueba", la cual se basa en la comparación entre la intensidad de la luz dispersada por la muestra bajo condiciones definidas y la intensidad de la luz dispersada por una suspensión de referencia bajo las mismas condiciones, a mayor dispersión de luz corresponde una mayor turbiedad, Figura 5.29.



FIGURA 36. DETERMINACIÓN DE TURBIEDAD.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

5.5 Análisis estadístico

Posterior a la obtención de datos, se llevaron a cabo dos pruebas de análisis estadístico, que hicieron descripción a su comportamiento. El primer análisis; Prueba de Grubbs hace referencia a los datos anómalos o atípicos, que pueden presentarse en un conjunto de datos. La anterior es útil para tomar decisiones estadísticas en el caso de discrepantes (Amón, 2010). La segunda, Análisis de Varianza (ANOVA), se enfoca en la comparación entre las medias de al menos dos grupos de datos, y su objetivo es analizar la variabilidad entre los grupos (UCLM, 2019).

Durante la experimentación realizada, se llevó a cabo la recopilación de datos arrojados de acuerdo determinación de partículas o parámetro físico-químico y biológico. El análisis estadístico realizado tuvo la finalidad de obtener gráficas que describen el comportamiento experimental durante los meses de junio 2017 a enero 2018.

5.5.1 Prueba de Grubbs

Se llevó a cabo la prueba de análisis de datos usando la prueba de Grubbs, que utiliza una estadística de prueba denominado "G", que es la diferencia absoluta entre el valor atípico, X_o , y el promedio de la muestra (X) dividida entre la desviación estándar de la muestra, S . La siguiente ecuación muestra la relación antes descrita.

$$G = \frac{|X_o - X|}{S} \quad Ec. (1)$$

El análisis se llevó a cabo para una $n=20$ datos, y un nivel de significancia del 95% de confiabilidad, cuya $G=2.56$, valor previamente reportado en tablas, ANEXO A3.

5.5.2 Análisis de Varianza (ANOVA)

Para cada uno de los parámetros medidos, incluyendo la DTP, se llevó a cabo el análisis de varianza correspondiente, donde las medias aritméticas de los procesos involucrados son comparadas de tal forma que, se evalúan los datos de interés para corroborar si alguno de ellos difiere significativamente del resto.

En este trabajo, se plantea la **Hipótesis** siguiente:

- Existen diferencias estadísticamente significativas que muestren la variabilidad entre los procesos o tratamientos estudiados como lo son F y S, PC y UV, S y UV.

Se cuenta con una **Hipótesis nula**, la cual se supone, no existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos mencionados, es decir, no existe variabilidad, por lo tanto;

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \quad Ec. (2)$$

En contraparte, se genera una **Hipótesis alterna**, donde se establece que existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos estudiados, lo que quiere decir que existe variabilidad, de tal forma que se tenga;

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \quad Ec. (3)$$

El ANOVA se realizó bajo las consideraciones siguientes:

- El número de datos analizados fue diferido según el parámetro de análisis, en su mayoría, se trabajó con un $n=20$.
- Se trabajó con un nivel de confianza del 95%.
- Si el valor de *p value* es mayor que 0.05, entonces se rechaza (H_0).

VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 Análisis de la distribución de tamaño de partículas (DTP), en agua de lluvia

Se analiza la técnica de DTP con los resultados obtenidos de la evaluación a lo largo de todo el periodo de estudio. El análisis se muestra en una serie de gráficos (acumulativos) creados a través del software usado en la medición de DTP, cuyo análisis estadístico generado, permite llevar a cabo la evaluación en cada etapa del sistema de potabilización y muestra la incertidumbre típica de medida tipo A, como una desviación estándar (Ruiz, *et al.*, 2010). También se elaboró un análisis gráfico que evalúa la variabilidad existente en cada etapa del sistema para la técnica de DTP, sin embargo, no se tratará en este capítulo, pero es posible consultarlo en el ANEXO A5, al igual que la estadística de los resultados obtenidos.

Se muestran los resultados arrojados en la DTP separando las etapas de experimentación por las que se fue desarrollando este trabajo, de tal forma que, cada una de estas etapas, muestra el análisis a detalle sobre el comportamiento que la DTP tuvo en cada fase experimental.

6.1.1 DTP en los puntos de muestreo Fondo y Superficie (F y S)

Fueron analizadas las muestras tomadas en la AMC, cuyos puntos de referencia fueron F y S, donde F representa el punto más profundo en el reservorio del auditorio Galileo Galilei y S el punto cuyo acceso al agua captada es fácil de obtener, fue importante conocer la calidad de dos distintos puntos del reservorio, en los que se analiza si existe o no variabilidad que pueda afectar la toma de agua para los diversos usos que se le pueda llegar a dar.

La Figura 6.1 muestra las mediciones obtenidas para Fondo (F) y Superficie (S), a lo largo de toda la temporada donde se consideró la lluvia y el estiaje, periodo que comprendió de julio 2017 a enero 2018, cumpliendo con los lineamientos para muestreo de captación pluvial que indican la toma de muestras tanto en ambos periodos. La gráfica fue construida obteniendo la media aritmética para cada punto de muestreo. En relación a F, se encontró que tiene un tamaño de partícula de $0.828 \mu\text{m}$, respecto a S, cuyo tamaño promedio es de $0.855 \mu\text{m}$, respecto a F. Por otra parte, el 90% de ellas se presentan un tamaño menor a $0.914 \mu\text{m}$ y $0.976 \mu\text{m}$ para S, lo que indica que S presentó un tamaño mayor a lo largo de toda la temporada de estudio, estos diámetros pueden llegar a indicar la posible existencia de partículas como bacterias ($0.31\text{-}6.3 \mu\text{m}$), fragmentos celulares ($0.0316\text{-}1 \mu\text{m}$), desechos orgánicos ($0.63\text{-}1000 \mu\text{m}$), huminas ($0.00316\text{-}3.16 \mu\text{m}$), en su mayoría materia orgánica clasificada como material coloidal ($0.001\text{-}1 \mu\text{m}$) (Levine, *et al.*, 1985).

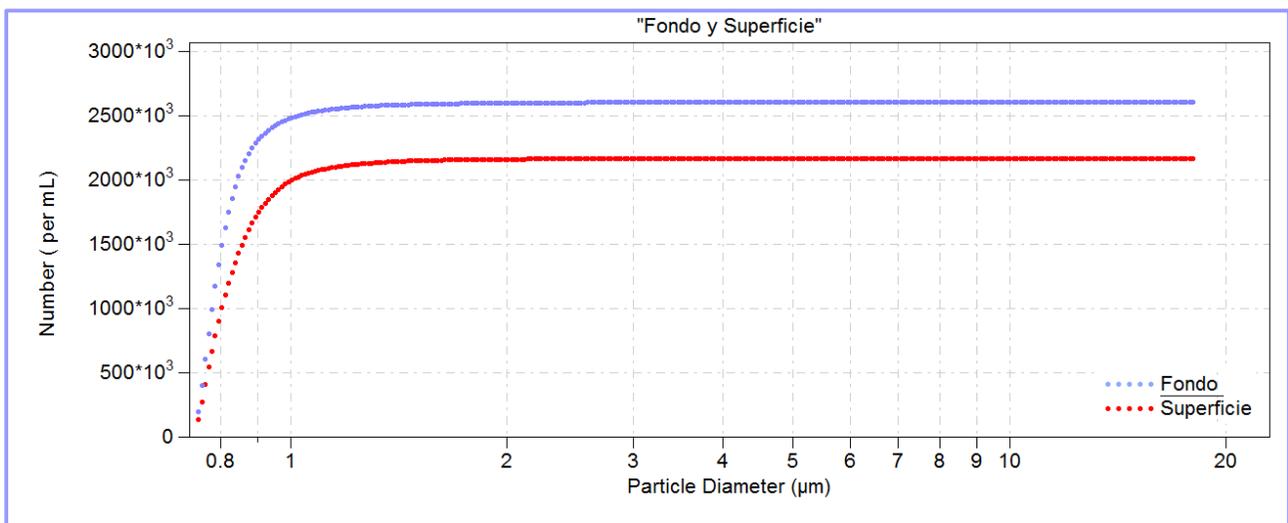


FIGURA 37. DTP PROMEDIO EN LOS PUNTOS DE MUESTREO "FONDO Y SUPERFICIE" (JULIO 2017- ENERO 2018). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, SOFTWARE MULTISIZER 3, VERSION 3.53, COPYRIGHT © 1990-2008 BECKMAN COULTER, INC.

Sin embargo, si se toma en cuenta el número de partículas existentes, para F se tuvieron 2 604 partículas (N°/L) respecto de S, cuyo número corresponde a 2 167

partículas (N°/L), representando de esta forma que F es un 16.78% mayor que la cantidad de partículas presentes en S. Al llevar a cabo una relación entre tamaño (μm) y el número de partículas presentes para estos tamaños, se encontró que F representa un mayor número de contaminantes a remover que el punto S. La variabilidad de la concentración de contaminantes en el fondo de un reservorio es mayor, atribuida a la sedimentación que se presente al no tener mezcla continua en sistema de almacenamiento, se encuentran principalmente partículas discretas sedimentadas, así como el material del cual está construido dicho almacenamiento, propicia la acumulación de los contaminantes en el fondo.

En contraparte, para la superficie, el número de partículas es menor gracias a las partículas ya sedimentadas en el fondo, que, debido a su densidad, respecto a la densidad del agua captada, son almacenadas en la parte más inferior de este sistema de almacenamiento, así como la continua agitación que se da al tomar agua del reservorio constantemente, permitiendo que exista una mayor homogenización en todos los componentes del agua captada.

La distribución analizada refuerza la decisión de tomar como influente a S en lugar de F, se observó que, en el análisis por número de partículas, el punto F presenta valores altos respecto a S, no siendo así en tamaño de partículas, sin embargo, aun cuando se presente un mayor tamaño en las partículas, no necesariamente es el suficiente para describir el nivel de concentración que se tiene de ellas.

6.1.2 DTP a lo largo de la temporada de lluvia

Se realizó el análisis para la temporada de lluvia que se reflejó en el punto de muestreo "S" a lo largo de cada semana durante un periodo de 7 meses, y cuyo muestreo corresponde al influente que pasó por el sistema de potabilización. En el

análisis de DTP los resultados muestran el comportamiento obtenido a lo largo de los meses de muestreo.

En la Figura 6.2 se muestra el comportamiento presentado por mes en número de partículas que existen por mililitro de muestra analizada, así como al tamaño promedio obtenido para cada mes. Para toda la temporada observada, el tamaño promedio que las partículas presentan, se encuentra en un intervalo que va de 0.818 a 0.940 μm , y su tamaño encontrado en el 90% de ellas es menor de 0.901 a 1.14 μm presentado en los meses de julio y septiembre, respectivamente. De la misma forma, la variabilidad para el número de partículas existentes, indica que el mes de septiembre presenta el menor número de partículas por mililitro (310 partículas/L), mientras que, en el mes de diciembre, se encuentra la mayor concentración de partículas en un mililitro de muestra, cuyo valor es 7 634 partículas (Nº/L).

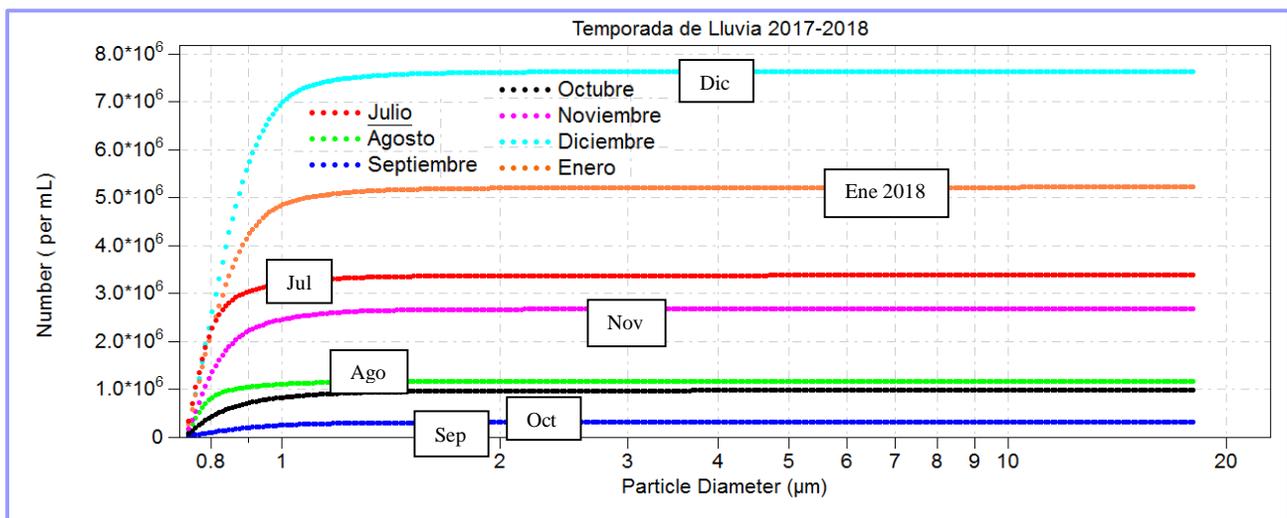


FIGURA 38. DTP A LO LARGO DE TODA LA TEMPORADA DE LLUVIA (JULIO 2017- ENERO 2018).

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, SOFTWARE MULTISIZER 3, VERSION 3.53, COPYRIGHT © 1990-2008 BECKMAN COULTER, INC.

Al comienzo de la temporada de lluvia, el número de partículas por L de muestra, presenta un descenso (julio 2017- septiembre 2017), indicando que conforme incrementa la frecuencia de lluvias para estos meses, la cantidad de contaminantes

concentrados en el ambiente son arrastrados, de tal forma que el número de partículas se ve disminuido de 3 375 a 310 partículas (Nº/L), correspondientes a estos tres meses. Sin embargo, el seguimiento del análisis de partículas muestra que, para el mes de octubre, comienza un aumento en el número de partículas, y es continuo hasta llegar al mes de diciembre, el cual, fue el mes que mayor número de partículas presentó por mililitro, de tal forma que, se tuvo un incremento de hasta 24 veces en número respecto del mes de septiembre.

Lo anterior indica que, conforme la frecuencia con la cual se presentaron las lluvias al día y en promedio, al mes, la concentración de contaminantes tanto en el ambiente como en el sistema de almacenamiento fue aumentando, al disminuir la frecuencia y cantidad de lluvias, el arrastre de partículas y contaminantes ya no fue frecuente, y al no haber disponibilidad de agua por precipitación, el sistema de almacenamiento de agua de lluvia cumplía su función (almacenar agua en caso de escasez). Esto condujo a que el nulo movimiento de agua en el reservorio incrementara una mayor cantidad de contaminantes, cuyo tamaño de partícula se vio disminuido, conforme el comienzo de la temporada de estiaje.

Finalmente, el descenso de partículas para el mes de enero no fue posible relacionarlo con la tendencia observada, debido a que, para el mes de enero el muestreo no fue realizado de forma constante.

6.1.3 DTP en el sistema de pretratamiento

La DTP corresponde al inicio del sistema de potabilización, en donde la primera etapa hace referencia a un pretratamiento, descrito en el marco de referencia y en la metodología experimental, compuesto por un lecho filtrante de arena y grava y un lecho de adsorción de carbón activado, los cuales serán comentados para los resultados de DTP siguientes. En general, las muestras estudiadas, corresponden

a los efluentes que el sistema de potabilización adoptó para su evaluación y correcto funcionamiento, como se mostró en la Figura 5.9.

El análisis estudiado, muestra la evolución en cada uno de los sistemas, de acuerdo con el periodo de muestreo contemplado, el cual corresponde a la temporada de lluvia.

6.1.3.1 Filtro de arena (FA)

El comportamiento que el lecho filtrante de grava y arena presentó, las condiciones sobre las cuales se operó en cada mes, donde el influente que era pasado a través del sistema de potabilización, se considera que no presenta características constantes respecto a su calidad.

Tomando en cuenta lo anterior, en la DTP (Figura 6.3), se muestra que el tamaño de partícula correspondiente a esta barrera, presenta un intervalo que va de 0.81 a 1.09 μm , meses de diciembre y julio, respectivamente, Por otro lado, para estos meses se tienen que para el 90% de los casos, el intervalo en diámetro va de 0.87 a 1.52 μm . Durante los meses de agosto a noviembre, el tamaño de partícula presenta una tendencia de 0.8 μm , la cual, no es soportable debido al escaso número de datos presentes, teniendo así los tamaños siguientes; 0.85, 0.818, 0.83, y 0.84 μm en tamaño promedio, y en 90% de los casos, sus tamaños son menor a; 0.97, 0.89, 0.91, y 0.94 μm . En lo que respecta al mes de enero, se tuvo un tamaño de partícula promedio de 0.825 μm y el 90% de sus partículas presentó un tamaño menor que 0.901 μm . El rango que el tamaño de partícula presenta, indica la presencia de bacterias (0.31-6.3 μm) y huminas (0.00316-3.16 μm), véase Figura 3.1.

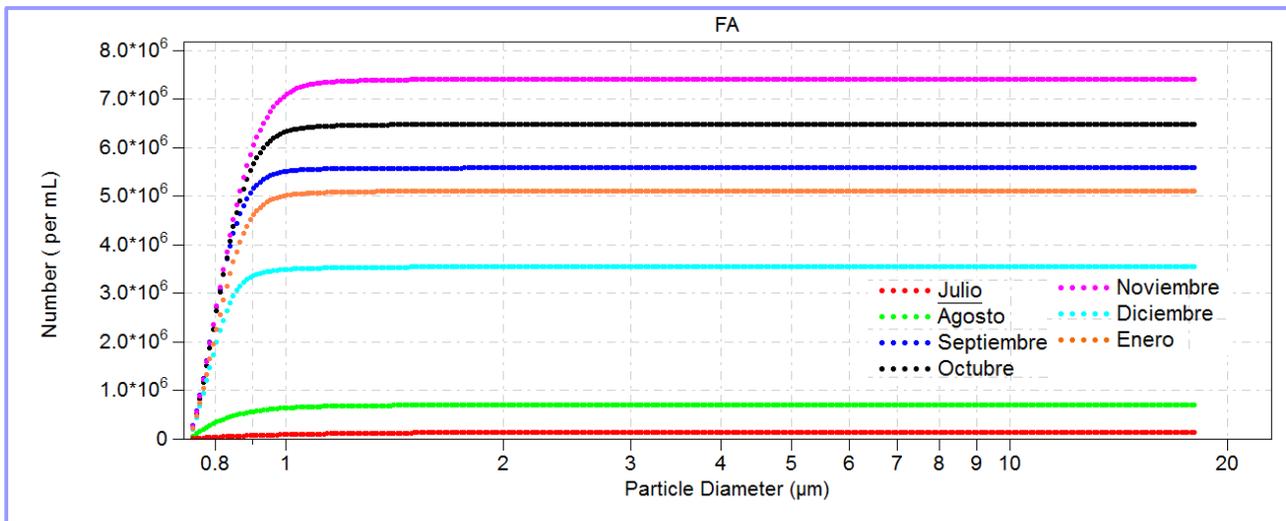


FIGURA 39. COMPORTAMIENTO DE LA DTP EN EL FILTRO DE ARENA (FILTRO DE ARENA) Y GRAVA (JULIO 2017-ENERO 2018).

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, *SOFTWARE MULTISIZER 3, VERSION 3.53, COPYRIGHT © 1990-2008 BECKMAN COULTER, INC.*

Por otro lado, la Figura anterior, muestra que el número de partículas al transcurso de los meses presenta un aumento que va de julio 2017 a noviembre 2017 (135 a 7 412 partículas/L), dadas las características del lecho filtrante, se esperaría una disminución de partículas al paso del tiempo, o en su defecto, la disminución del tamaño de las partículas.

Es posible asumir que la cantidad de materia en el influente se encuentra en menor proporción que la cantidad al efluente para esta barrera, atribuido a una saturación del lecho filtrante causada por su falta de mantenimiento para esta barrera. Para el mes de diciembre, se observa que el número de partículas presentes ha disminuido, se tienen 3 544 partículas por L, registrándose una disminución del 47.81% de noviembre a diciembre.

Sin embargo, el aumento del tamaño de sus partículas, discutido anteriormente, da pie a que no se considere la remoción de contaminantes en este lecho, aun cuando se haga presente la disminución del número de partículas, el tamaño que presentan indica que existe acumulación de materia dentro del lecho, y es posible que sea arrastrada al efluente. Esto puede considerarse válido si se toma en cuenta

que la limpieza de los lechos debe llevarse en un número mayor de periodos. Finalmente, en el mes de enero, se encontró un total promedio de 5 104 partículas (N°/L), y el valor se su tamaño se encuentra dentro del rango establecido en el párrafo anterior.

Dato el tamaño de las partículas presentes y la remoción en número, se asume que, el tipo de contaminantes presentes pertenece a los grupo Coloidal y Supra-coloidal, esto tomando como referencia el aporte realizado por (*Levine, et al., 1985*), ya que la naturaleza del medio de filtración permite la presencia contaminantes como virus, bacterias y una porción muy pequeña de protozoarios (*CONAGUA, 2012*).

6.1.3.2 Filtro de carbón activado (CA)

Como segunda barrera de pretratamiento en un arreglo en serie con FA, se localiza el lecho de adsorción compuesto por carbón activado, en el que, en comparación con la Figura 6.2 (temporada de lluvia), se observa, que el número de partículas presentes, corresponde a valores menores, el número de partículas presentes en toda la temporada de estudio para esta barrera, se encuentra en un intervalo de 397 a 4 539 partículas (N°/L), cuyos meses correspondientes son septiembre y diciembre. El sistema tuvo un comportamiento inestable, tal que, por cada incremento de partículas, al siguiente mes se presentaba un deceso, Figura 6.4.

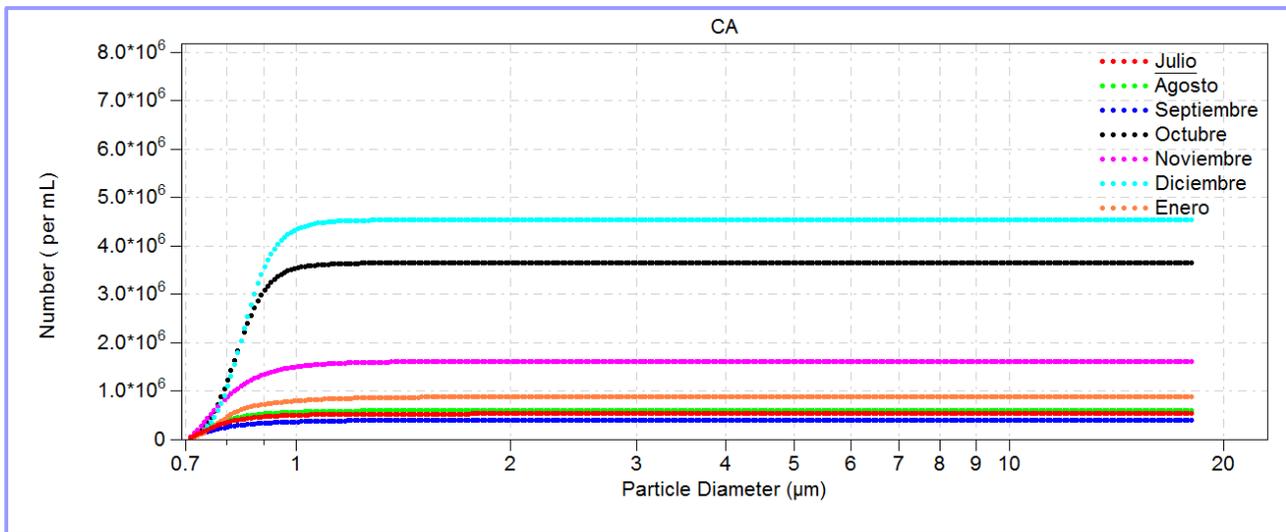


FIGURA 40. COMPORTAMIENTO DE LA DTP EN EL LECHO DE CARBÓN ACTIVADO (JULIO 2017- ENERO 2018).
 FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, SOFTWARE MULTISIZER 3, VERSION 3.53, COPYRIGHT © 1990-2008 BECKMAN
 COULTER, INC.

Para el tamaño de partícula, se encontró que este medio de adsorción presentó diámetros que son menores que $0.992 \mu\text{m}$ en el 90% de las partículas y de 0.806 a $0.856 \mu\text{m}$ como rango promedio, cuyos meses correspondientes son agosto y diciembre para el 90% de las partículas, y julio y enero para el tamaño promedio de las partículas.

Para este caso los valores obtenidos en tamaño promedio y el 90% de las partículas que tienen un diámetro en común, no coinciden los mismos meses en los valores mínimos y máximos. Sin embargo, marcan los puntos de inicio y final del análisis, los primeros dos meses y los últimos dos meses de muestreo. Esto último, podría estar asociado al inicio y final de la temporada de lluvia, ya que la capacidad de retención que la barrera tiene, se comporta conforme la calidad del agua entrante al sistema, es decir, para los primeros meses de lluvia, el agua presenta una calidad con una concentración importante de contaminantes, al igual que en los últimos meses ya que se va acumulando cierta cantidad de contaminantes en el ambiente, que no son arrastrados por la escasez de lluvias.

Las observaciones realizadas a este sistema, discuten su gran capacidad de adsorción y su comportamiento o cambio en la DTP, dado que no hay una tendencia que pueda marcar cuando es correcto que los valores del número de partículas presentes y los tamaños de estas partículas puedan incrementar o decaer, según el comportamiento del sistema.

En el análisis realizado, se encontró que para el medio de adsorción con carbón activo, existen contaminantes como lo son crecimiento bacteriano (0.31-6.3 μm) y materia orgánica (0.001-1 μm) respecto al análisis de su tamaño, esto es ampliamente discutido en los estudios de (Levine, *et al.*, 1985).

Por otra parte, dada la composición de los componentes, y el incremento de partículas respecto del filtro FA, se asocia que el bajo peso molecular de los contaminantes y la su baja concentración, pueden repercutir sobre la eficiencia de este tipo de sistemas. La US, 2009 reporta que entre las condiciones para que este tipo de sistemas tenga un efecto satisfactorio y los compuestos sean mejor adsorbidos, deben poseer características como alto peso molecular, baja presión de vapor, alto punto de ebullición y alto índice de refracción.

Así también, la temperatura juega un papel importante, el sistema fue tratado a temperatura ambiente, lo que impide que el rendimiento del lecho adsorbente, cumpla al 100% de su capacidad, pues la misma US reporta que este tipo de sistemas funciona mejor a bajas temperaturas.

6.1.4 DTP en el sistema de desinfección

Esta parte del análisis se centra en el sistema de desinfección propuesto para el sistema de potabilización, que consta de un filtro de carbón impregnado con plata coloidal, un sistema KDF y un sistema de luz UV, cada uno de estos sistemas

trabajaron en serie a la barrera de pretratamiento CA, y en paralelo entre ellos. La distribución de partículas busca mostrar la eficiencia que cada uno de estos sistemas tiene como medio desinfectante en agua potable.

6.1.4.1 Filtro de carbón activado granular impregnado con plata coloidal (PC)

La evaluación realizada para la barrera de desinfección PC (Figura 6.5), muestra que el intervalo del tamaño de las partículas presentes, se encuentra entre 0.814 y 0.881 μm , siendo los meses de noviembre y septiembre aquellos con el menor y mayor tamaño promedio encontrado, respectivamente. Y se encontró para los mismos meses, que el 90% de las partículas que componen estas muestras, tienen un tamaño de partícula menor que 0.979 μm , estos diámetros corresponden al rango presentado para este sistema de desinfección. En lo que respecta al detalle de los meses de agosto, octubre, diciembre y enero, se encontraron tamaños en el 90% de los casos menores que 0.91, 0.909, 0.891 y 0.894 μm , respectivamente, y un tamaño promedio de 0.82, 0.819, 0.817 y 0.816 μm , respectivamente.

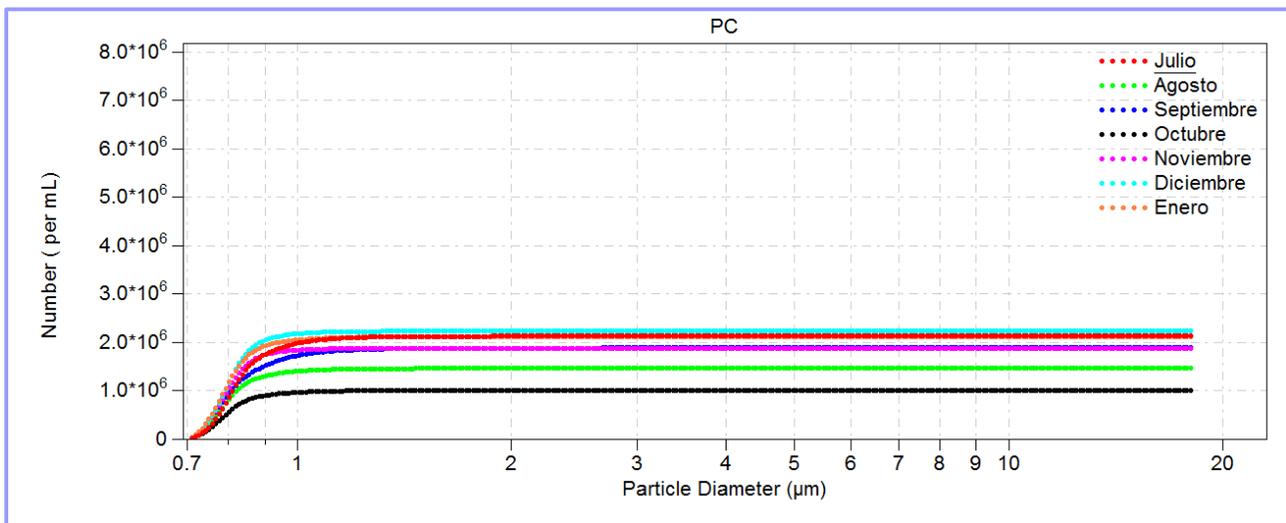


FIGURA 41. COMPORTAMIENTO DE LA DTP EN EL FILTRO DE PLATA COLOIDAL (JULIO 2017- ENERO 2018).
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, SOFTWARE MULTISIZER 3, VERSION 3.53, COPYRIGHT © 1990-2008 BECKMAN COULTER, INC.

En la Figura 6.5, visualmente se aprecia una disminución en número de partículas en comparación con la Figura 6.1 (DTP en Influyente). El análisis generado en el software muestra que, al promediar el número de partículas de los días muestreados, estas se presentaron entre 1 005 y 2 233 partículas (Nº/L), presentándose durante los meses de octubre y diciembre, respectivamente, teniendo un incremento de un 54.99% de partículas en diciembre, respecto de octubre.

En la Figura 6.2 se observó un incremento en el número de partículas, mostrando que la frecuencia de lluvias comenzaba a disminuir, aumentando el número de contaminantes en el ambiente, para este sistema (Figura 6.5), se observa una tendencia similar, donde a partir del mes de octubre, el número de partículas aumenta, y para el mes de enero, existe una disminución, esto puede atribuirse al muestreo que no fue constante para este mes, como se discutió en la Figura 6.2, teniendo en cuenta esto, en el mes de noviembre se presentó un número promedio de 1 877 partículas (Nº/L), cumpliendo con la tendencia de la Figura 6.2 ya mencionada.

Por otro lado, al considerar que el mes de octubre tiene el menor número de partículas existentes en el efluente de este sistema, es claro que previamente hubo un descenso que, debería involucrar a los meses de julio al mismo octubre. Sin embargo, esto no se cumple para el mes de septiembre, ya que, para los meses de julio y agosto, existe una disminución de partículas (2 126 a 1 462 partículas/L), rompiéndose esto para el siguiente mes, teniendo 1 882 partículas por litro de muestra, y finalmente llegar al mes de octubre, que como ya se mencionó, presentó el comportamiento más deseable en cuanto a desinfección del sistema de potabilización.

El incremento en el número de partículas presentes en el mes de septiembre, podría indicar un cambio de cartucho en el sistema PC, debido a una saturación de materia retenida. CONAGUA, (2012) menciona que la plata coloidal no posee un buen poder residual debido al tiempo que invierte en las reacciones óxido-reducción de eliminación de materia orgánica, tomando en cuenta este reporte, se encontró que, debido al tamaño de partícula presentado en este tipo de sistema, puede haber presencia de partículas como virus y materia orgánica ubicada en la clasificación como Coloidal (Levine, *et al.*, 1985).

6.1.4.2 Filtro KDF (Kinetic Degradation Fluxion)

El sistema de desinfección KDF (Figura 6.6) arrojó tamaños de partícula localizados en un rango que va de 0.895 a 1.02 μm que corresponden al 90% de los casos durante las mediciones, y estos tamaños son asociados a los meses de octubre y diciembre (comportamiento similar al sistema PC), presentando así un diámetro promedio de 0.822 a 0.861 μm . En lo que respecta al resto de los meses evaluados, se encontró que el tamaño de partícula no sigue ninguna tendencia de ascenso o descenso y su variabilidad no permite predecir algún comportamiento en cuanto a los contaminantes que pudiese haber. Para los meses evaluados como son julio, agosto, septiembre, noviembre y enero, para el 90% de las partículas medidas en cada muestra, se observa un diámetro menor que 0.907, 0.918, 0.913, 0.974 y 0.987 μm , respectivamente. Sin embargo, los tamaños promediados de las partículas, corresponden a 0.824, 0.835, 0.831, 0.852, y 0.833 μm , respectivamente.

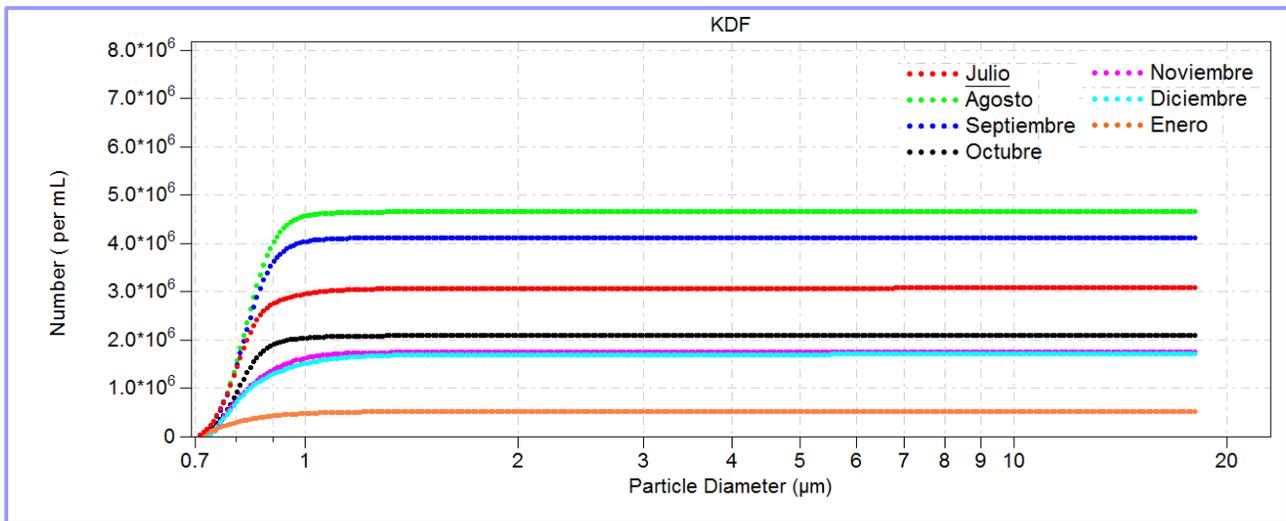


FIGURA 42. COMPORTAMIENTO DE LA DTP EN EL SISTEMA KDF (JULIO 2017- ENERO 2018).

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, *SOFTWARE MULTISIZER 3, VERSION 3.53, COPYRIGHT © 1990-2008 BECKMAN COULTER, INC.*

El perfil obtenido para este sistema de desinfección, se muestra en la Figura 6.6, donde visualmente se puede apreciar que se tuvo un incremento significativo de partículas respecto del primer sistema de desinfección compuesto por PC del 70.94% de tal forma que el número de partículas encontradas al paso del tiempo constituyó un rango que va de 520 a 4 655 partículas (Nº/L), valores que fueron encontrados en los meses de enero y agosto, respectivamente. El comportamiento que las partículas muestra un ascenso de julio a agosto, y disminución de agosto a enero, presentando los siguientes valores tomando en cuenta los meses de septiembre a diciembre: 4 122, 2 089, 1 754, 4 698 partículas (Nº/L), respectivamente.

A pesar de que el KDF fue la barrera de desinfección que tuvo los valores más altos respecto del resto de las barreras, revisado en la Figura 6.8, su análisis individual parece comportarse más estable durante ambas temporadas, es decir, los valores obtenidos obedecen al aumento del nivel de contaminación en sequía y disminuyen en temporada de lluvia.

Por otro lado, el tamaño de partícula y el incremento en número de partículas muestra que por sí solo, no funciona como medio de desinfección, sin embargo, es muy usado para alargar la vida útil de otros sistemas de tratamiento usados en conjunto (LENNTECH, 2018). La ubicación en el tamaño de arroja a suponer que tenemos partículas contaminantes tales como bacterias y algas (Levine, *et al.*, 1985).

6.1.4.3 Sistema de luz ultravioleta (UV)

En general, el tamaño de partícula presente en todo el periodo de este sistema, presentó un tamaño promedio de 0.838 μm , con un mínimo de 0.814 a un máximo de 0.881 μm , para los meses de septiembre y enero, respectivamente. En lo que concierne al inicio de la temporada de muestreo, en los meses de julio y agosto se tuvo un tamaño de partícula promedio de 0.833 y 0.845 μm , en cambio para los meses de octubre a diciembre los tamaños correspondientes fueron 0.823, 0.83 y 0.843 μm .

El comportamiento en la Figura 6.7 muestra que a partir de mes de septiembre el número de partículas disminuye y para los meses de octubre, noviembre, diciembre y enero, la cantidad existente de partículas permanece prácticamente constante. Por otro lado, el análisis realizado en la medición de tamaños de las partículas presentes, muestra que en el 90% de los casos evaluados de las partículas, se presenta un tamaño cuyo rango se estima, va de 0.77 a 0.82 μm , esto ocurre para los meses de noviembre y enero, pero para el resto de los meses cuyo tamaño está dentro de este rango, se presentaron valores similares, por debajo del tamaño promedio obtenido, de julio a octubre, se encontró un tamaño de 0.782, 0.817, 0,793, y 0,795 μm , respectivamente. Finalmente, el mes de diciembre ocupó un tamaño de 0.787 μm , como se puede observar, el tamaño entre las partículas al paso del tiempo, no presenta una variabilidad significativa, lo que indica que aun

cuando la frecuencia de las lluvias comience a escasear, el sistema de luz ultravioleta presenta niveles de contaminación bastante homogéneos, esto hablando de tamaños presentes en ellos efluentes del sistema UV.

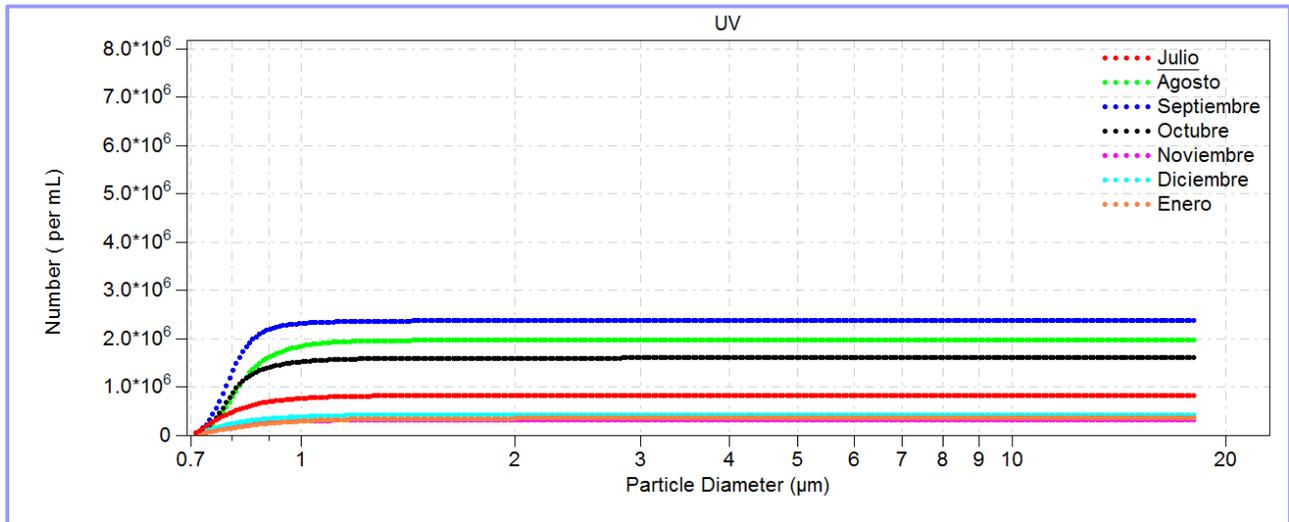


FIGURA 43. COMPORTAMIENTO DE LA DTP EN EL SISTEMA DE LUZ ULTRAVIOLETA (JULIO 2017- ENERO 2018). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, *SOFTWARE MULTISIZER 3, VERSION 3.53, COPYRIGHT © 1990-2008 BECKMAN COULTER, INC.*

La Figura 6.7 muestra el promedio obtenido del número de partículas presentes en cada mes, en donde, al inicio de la temporada (julio), se tienen presentes un total de 826 partículas (Nº/L), para los meses siguientes (agosto y septiembre) el número de partículas incrementa a 1 973 y 2 374 partículas (Nº/L), respectivamente, y para los meses de octubre a enero, el número de partículas parece inestable, sin obedecer alguna tendencia (1 598, 318, 423, 345 partículas/L).

En general, nos encontramos posicionados en un rango obtenido de 318 a 2 374 partículas (Nº/L), las cuales son encontradas en los meses de noviembre y septiembre respectivamente. Visualmente, esta figura muestra que se obtuvo una disminución de partículas respecto al sistema KDF, del 43.88%. Es importante destacar esta disminución de partículas, y recordar que los sistemas de desinfección

dado que funcionan en paralelo, los resultados obtenidos en la DTP, son independientes de cada sistema.

El número tan bajo de partículas encontradas a lo largo de la temporada, así como su tamaño presente en el 90% que arroja resultados mucho menores y homogéneos en comparación con los sistemas PC y KDF, puede ser un indicador de la eficiencia sobre la que el sistema estudiado trabaja.

En este caso, el análisis de partículas muestra que para los tamaños de partícula encontrados, se puede suponer que hay presencia de fragmentos celulares y moléculas dimerizadas de ADN y ARN (Levine, *et al.*, 1985), esto debido a que la luz ultravioleta penetra la pared celular de los organismos, dividiendo la célula en dos bases y evitando la reproducción de la célula (Metcalf & Eddy, 2014).

6.1.5 DTP promedio en el influente y las barreras de potabilización

Como etapa final sobre el análisis para la técnica de distribución de partículas, se llevó a cabo una comparación entre cada barrera de tratamiento presente en el sistema de potabilización, mostrando los resultados en la Figura 6.8, en donde se observó que el tamaño de partícula promedio del influente fue de 0.855 μm , y un tamaño menor que 0.976 μm para el 90% de los casos analizados, siendo este el valor más alto presentado respecto al resto de las barreras que componen el pretratamiento y el sistema de desinfección, este último compuesto por tres sistemas independientes uno del otro, como se discutió en secciones anteriores.

La siguiente barrera posicionada en el tren de potabilización, hace referencia a FA, cuyo tamaño promedio es de 0.829 μm , y 0.913 μm encontrados en el 90% de los

casos, el cual, para este rubro se encuentra el tamaño más pequeño de todo el sistema de potabilización, no siendo así en el tamaño promedio obtenido.

La parte final del sistema de barrera múltiples es analizada de forma simultánea, pues corresponde a los sistemas de desinfección, de tal forma que, para PC, KDF y UV, se obtuvieron tamaños promedio de 0.823, 0.835 y 0.833 μm , ocupando el tamaño más pequeño de todo el sistema la barrera PC, en lo que respecta al 90% de las partículas analizadas, se obtuvieron tamaños de partícula menores que 0.916, 0.929 y 0.945 μm , respectivamente. Los tamaños resultantes para este análisis, indican la presencia de materia coloidal, teniendo como principal composición concentraciones de Fragmentos celulares, bacterias, DNA, ácidos húmicos, virus, desechos orgánicos, entre otros, Figura 3.1.

De esto último se puede inferir que, el tamaño que las partículas presentan en el 90% de los casos analizados, S presenta el tamaño más grande, indicando que el efluente analizado está compuesto por contaminantes cuyo diámetro es retenido al pasar a través del sistema de potabilización propuesto, sin embargo se esperaría una disminución de tamaño al paso del influente por sistema, no cumpliéndose así en CA, donde se incrementa el tamaño de las partículas respecto de FA, lo cual podría indicar que para esta sección es necesario remplazar el lecho de adsorción, barrera sobre la cual, se está permitiendo el aumento del tamaño de las posibles partículas contaminantes.

Para la etapa de desinfección, se encuentra que el tamaño obtenido es menor en cada sistema de desinfección al correspondiente después de la barrera CA, pero no después de la barrera FA, sin embargo, de acuerdo a su funcionamiento de forma independiente, para ambos análisis de tamaño, se encontró que el sistema PC presentó el valor más bajo, pero para KDF y UV, fue diferente, por un lado, UV ocupó la posición dos en cuanto a menor tamaño, esto respecto al promedio obtenido de tamaño, pero por el otro lado que hace referencia al tamaño que el 90% partículas tienen, KDF, reportó ocupar la segunda posición.

Los tamaños de partículas como se ha venido estudiando, es un parámetro que por sí solo no indica el nivel estimado de contaminación en una muestra, es necesario evaluar la cantidad de partículas presentes que ocupan ese mismo tamaño, esto respecto a otras partículas que quizá pudieran ser más grandes, pero estar en menor proporción.

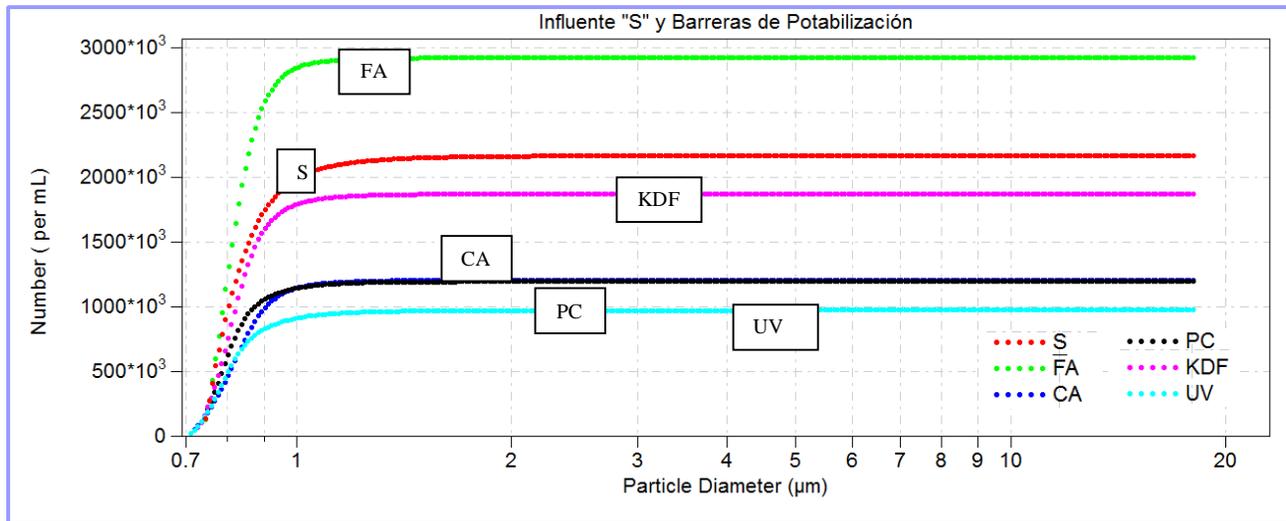


FIGURA 44. DTP EN EL INFLUENTE S, RESPECTO A LOS EFLUENTES DE LAS BARRERAS DEL SISTEMA DE POTABILIZACIÓN (JULIO 2017- ENERO 2018).

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, *SOFTWARE MULTISIZER 3, VERSION 3.53, COPYRIGHT © 1990-2008 BECKMAN COULTER, INC.*

Finalmente, así como en los análisis anteriores, también es evaluado el número de partículas presentes en cada etapa de potabilización; influente, pretratamiento y desinfección, de tal forma que sea complemento del análisis realizado para el tamaño encontrado que en su mayoría las partículas poseen, de tal forma que pueda referirse el análisis de DTP como un indicador del sistema de potabilización, el cual tenga la responsabilidad de predecir las condiciones sobre las que se encuentra trabajando cada barrera.

La Figura 6.8 muestra, que para el influente S, se encontró que se tiene un promedio de 2 167 partículas (Nº/L), partículas presentes previo al sistema de potabilización, al hacer pasar el influente por el pretratamiento, no encontramos con un aumento de partículas del 25.88%, teniendo un total de 2 924 partículas

(N°/L) en promedio para el lecho de FA, al relacionarse con el tamaño de partícula discutido en los párrafos anteriores, corrobora el hecho de que el sistema necesita un mantenimiento para su correcto funcionamiento. Para la siguiente barrera que se encuentra conectada en serie, se obtuvo un total de partículas de 1 204 por L de muestra, lo representa una disminución del 41.17% respecto de FA y del 55.56% respecto del influente, mostrando que existe remoción de partículas contaminantes presentes y cuyos tamaños podrían no representar una influencia respecto del número de partículas presentes, pues en promedio, existe una remoción del 50% de las partículas que había previo al tratamiento y una disminución de tamaño para esta etapa del sistema, respecto de S.

La siguiente discusión corresponde a un análisis importante de esta investigación, pues se busca determinar la eficiencia de cada sistema de desinfección a través de la distribución de partículas, así para cada sistema de desinfección propuesto en paralelo, se obtuvo que existe en promedio un total de 1 193 en PC, 1 869 en KDF, y 970 en UV, partículas (N°/L), siendo UV la barrera de desinfección que mejor remoción de partículas tuvo respecto de S (remoción del 55.22% de las partículas), para PC se obtuvo una remoción del 44.94%, y para KDF del 13.75 %.

Llevando a cabo la comparación entre la remoción de partículas obtenidas respecto a S y los tamaños encontrados, se encuentra que la barrera que mejor eficiencia presenta es UV, debido al alto porcentaje de remoción encontrada, el tamaño que se encontró en el 90% de sus partículas, no tiene gran relevancia en el sistema de potabilización, seguido de PC, el cual también presentó una alta remoción de partículas y cuyo tamaño, nos indica la remoción de contaminantes cuyos tamaños son significativos previo a su potabilización.

Por otro lado, no se observa lo mismo de KDF, todos los análisis realizados por DTP, muestran que el sistema presenta problemas en su operación, pues la cantidad de partículas contaminantes que es capaz de remover, se encuentra por arriba de los valores obtenidos para PC y UV, por otro lado, los resultados de DTP para CA

corroboran la discusión anterior, pues muestra tener un mejor comportamiento (hablando de disminución en número y tamaño de contaminantes).

Los resultados arrojados por el contador de partículas para el sistema de potabilización muestran el comportamiento que presenta durante todo el proceso, de manera teórica, el proceso fue preparado para analizar la función de cada barrera.

La remoción de contaminantes de cada barrera, no se encuentra reportada en la literatura, y su funcionamiento fue avalado por las especificaciones técnicas de fabricación, la variabilidad resultante del sistema de potabilización, se puede consultar en el ANEXO A6. Su evaluación experimental fue corroborada con la medición de los parámetros de calidad establecidos en el capítulo siguiente. un deceso de 44.94%, KDF 13.75de % y UV de 55.22% de partículas. Cuyos tamaños promedio presentes se encuentran en 0.823. 0.835 y 0.833 μm , respectivamente. Es observable que la barrera con mejor remoción es la barrera de luz ultravioleta (UV) debido al tamaño que tiene y en gran parte la cantidad de partículas, que es mucho menor que la cantidad entrante del sistema, como ya se mencionó en el párrafo anterior.

6.2 Análisis de la calidad del agua de lluvia determinada por los parámetros físicos, químicos y microbiológicos

Como parte de la metodología experimental, se llevó a cabo la evaluación de la calidad del agua de lluvia captada, empleando parámetros tradicionales y conocidos en el análisis de agua, algunos de ellos establecidos en el NOM-127- SSA1-1994, la experimentación y evaluación de los parámetros, se llevó a cabo de acuerdo con la clasificación manejada por esta norma, así como por la clasificación mencionada por (Jiménez, et al., 2010), ubicada como parámetros, físicos, químicos y microbiológicos. Se presentan en primer lugar los valores mínimos y máximos

obtenidos para cada parámetro medido, y de acuerdo con la clasificación ya mencionada, posterior a ello, se presenta la elaboración de gráficas de bigotes, donde se aprecia la variabilidad obtenida para cada barrera que compone al sistema de potabilización estudiado.

6.2.1 Parámetros físicos

En esta sección se muestran los valores obtenidos para los parámetros Absorbancia UV_{254nm}, color aparente, color verdadero, sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales y turbiedad. Los parámetros que no presentan valores y en su lugar se encuentra un espacio, corresponden a las mediciones que no fueron realizadas, esto únicamente aplica para las barrera que componen el sistema de potabilización, ya que al inicio de la caracterización del agua de lluvia, se concentró únicamente en observar la calidad de la que proviene el influente a analizar, de tal forma que las mediciones para las barreras de desinfección no fueron realizadas, pues no se buscaba obtener un seguimiento sobre estos parámetros, únicamente un conocimiento sobre la concentración presente (esto únicamente hablando para color aparente y SST). La Tabla 6.1 muestra estos valores obtenidos en el laboratorio.

TABLA 6.1. VALORES CORRESPONDIENTES A LOS PARÁMETROS FÍSICOS MEDIDOS.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

| PARÁMETRO MEDIDO | UNIDADES | PARÁMETRO ESTADÍSTICO | F | S | FA | CA | PC | KDF | UV |
|---|------------------|-----------------------|------|-------|------|------|------|------|------|
| Absorbancia UV _{254nm} n=20 | cm ⁻¹ | ̄x | 0.26 | 0.27 | 2.49 | 0.74 | 0.18 | 0.46 | 0.28 |
| | | S | 0.05 | 0.05 | 0.56 | 0.60 | 0.16 | 0.30 | 0.18 |
| | | Máximo | 0.36 | 0.39 | 3.65 | 2.85 | 0.65 | 1.15 | 0.7 |
| | | Mínimo | 0.19 | 0.17 | 1.5 | 0.15 | 0 | 0 | 0 |
| Color Aparente n=20 | Pt/Co | ̄x | 8.90 | 10.06 | - | - | - | - | - |
| | | S | 6.59 | 6.49 | - | - | - | - | - |
| | | Máximo | 31.5 | 34.5 | - | - | - | - | - |
| | | Mínimo | 1.5 | 3 | - | - | - | - | - |
| | Pt/Co | ̄x | 6.59 | 6.40 | 9.30 | 6.65 | 4.45 | 5.28 | 4.75 |
| | | S | 3.80 | 3.08 | 4.17 | 4.86 | 3.81 | 3.88 | 4.51 |

| PARÁMETRO MEDIDO | UNIDADES | PARÁMETRO ESTADÍSTICO | F | S | FA | CA | PC | KDF | UV |
|---------------------------------|----------|-----------------------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| Color Verdadero n=20 | | Máximo | 15.00 | 16.00 | 19.50 | 17.50 | 16.00 | 15.50 | 14.50 |
| | | Mínimo | 1.5 | 2.5 | 3.5 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Sólidos Disueltos Totales n=20 | mg/L | \bar{x} | 331 | 303 | 332 | 294 | 271 | 316 | 294 |
| | | S | 94.55 | 95.74 | 91.83 | 97.69 | 80.33 | 112.64 | 103.46 |
| | | Máximo | 523 | 528 | 551 | 523 | 467 | 581 | 524 |
| | | Mínimo | 188.35 | 198 | 200 | 183 | 135 | 173 | 174 |
| Sólidos Suspendidos Totales n=6 | mg/L | \bar{x} | 0.69 | 1.70 | - | - | - | - | - |
| | | S | 0.40 | 0.55 | - | - | - | - | - |
| | | Máximo | 1.17 | 2.17 | - | - | - | - | - |
| | | Mínimo | 0 | 0.83 | - | - | - | - | - |
| Turbiedad n=20 | NTU | \bar{x} | 8.08 | 8.89 | 7.44 | 5.86 | 4.99 | 5.93 | 5.30 |
| | | S | 3.72 | 4.18 | 2.47 | 1.84 | 1.09 | 1.54 | 1.73 |
| | | Máximo | 15.5 | 16.5 | 12.45 | 11.35 | 7.75 | 11.65 | 11.35 |
| | | Mínimo | 0 | 4.82 | 4.81 | 2.93 | 3.16 | 5.27 | 3.77 |

- No hubo mediciones

La tabla anterior, muestra los valores promedio, máximos y mínimos encontrados en cada barrera de tratamiento, únicamente para los parámetros físicos considerados, donde para el color verdadero y los sólidos disueltos totales todos los casos se encuentran dentro del límites máximos permisibles regulados por la norma NOM-127-SSA1-1994. Para el caso de la turbiedad, esto no se lleva a cabo, en los puntos de muestreo F y S, así como en las barreras de tratamiento (FA y CA) y desinfección (KDF), los valores promedio exceden el máximo de 5 NTU establecidas en la mencionada norma, mostrando que los sistemas KDF y UV no es apto para aceptar la calidad del agua potable en este parámetro.

Sin embargo, el sistema PC muestra resultados favorables a este rubro, pues el promedio de los valores medidos a través de la temporada de muestreo, arroja un valor de 4.99 NTU, el cual se encuentra dentro de los límites establecidos por la norma NOM-127-SSA1-1994.

6.2.2 Parámetros químicos

En lo que respecta a los parámetros químicos, se llevó a cabo la evaluación para COT, DQO y pH, estos parámetros fueron seleccionados, debido al interés que se tuvo por encontrar una relación entre el método Coulter y los parámetros químicos tradicionales, que, por su naturaleza, únicamente se enfoca en medición de la materia orgánica, excluyendo parámetros como Alcalinidad y dureza, entre otros. Así en la Tabla 6.2 se presenta la caracterización química para cada punto muestreado, a diferencia de los parámetros físicos, aquí no hubo exclusión de la medición de algún parámetro químico para las barreras que componen el sistema de potabilización, pues se enfocó en la búsqueda de indicadores que predijeran la calidad del agua de lluvia, relacionando DTP y parámetros químicos.

TABLA 6.2. VALORES CORRESPONDIENTES A LOS PARÁMETROS QUÍMICOS MEDIDOS.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

| PARÁMETRO MEDIDO | UNIDADES | PARÁMETRO ESTADÍSTICO | F | S | FA | CA | PC | KDF | UV |
|--------------------------------|----------|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Carbón Orgánico Total n=8 | mg/L | \bar{x} | 2.33 | 2.31 | 2.61 | 1.56 | 3.49 | 1.79 | 1.66 |
| | | S | 0.86 | 0.77 | 2.30 | 1.52 | 4.14 | 1.35 | 1.37 |
| | | Máximo | 3.70 | 3.40 | 8 | 4.5 | 13.8 | 4.47 | 4.5 |
| | | Mínimo | 1.1 | 1 | 0.7 | 0 | 0.9 | 0.6 | 0 |
| Demanda Química de Oxígeno n=9 | mg/L | \bar{x} | 2.45 | 3.04 | 1.57 | 0.18 | 0.11 | 0.80 | 0.08 |
| | | S | 0.62 | 0.87 | 0.77 | 0.53 | 0.21 | 1.01 | 0.16 |
| | | Máximo | 3.5 | 4.2 | 2.6 | 1.6 | 0.6 | 2.6 | 0.4 |
| | | Mínimo | 1.4 | 1.1 | 0.3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| pH n=20 | - | \bar{x} | 7.21 | 7.23 | 7.27 | 7.22 | 7.25 | 7.21 | 7.13 |
| | | S | 0.31 | 0.32 | 0.43 | 0.43 | 0.36 | 0.36 | 0.30 |
| | | Máximo | 7.77 | 7.69 | 8.44 | 8.16 | 8.01 | 8.06 | 7.60 |
| | | Mínimo | 6.72 | 6.69 | 6.7 | 6.38 | 6.64 | 6.59 | 6.69 |

- Sin unidades específicas

En cuanto a los valores de los parámetros químicos, se encontró que el pH en todos los casos se mantuvo dentro de los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-1997, la cual establece valores de 6.5-8.5 unidades de pH, la tendencia de tener 7 unidades en todos los puntos de muestreo muestra que se tiene un agua cuya

concentración de iones H⁺ se encuentran en la neutralidad, lo que quiere decir que para consumo humano es viable ya que no se encuentra en condiciones que llegaran a afectar la salud humana.

En cambio, para los parámetros COT y DQO medidos, no se encuentran especificados límites máximos permisible en esta disposición oficial, sin embargo, se muestra que existió remoción de materia orgánica al paso del sistema de tratamiento, así por ejemplo, para los sistemas KDF y UV se encontró un 22.5 y 28.1 % removidos respecto del influente S en el parámetro COT, no siendo así para PC, en donde se obtuvo un incremento del 51% de materia, lo anterior se atribuye al mantenimiento del lecho, y se recomienda sustituir el lecho por uno nuevo.

En lo que respecta a DQO, en todos los casos de los sistemas de desinfección, se obtuvieron porcentajes de remoción del 96.38 % para KDF, 73.68 % para UV y 97.36 % para PC, siendo este último el sistema que menor cantidad de oxígeno consume debido a la materia orgánica para su oxidación.

6.2.3 Parámetros microbiológicos

Como parte importante en la caracterización del agua, la Tabla 6.3 muestra los parámetros microbiológicos medidos (monitoreo de microorganismos que puedan causar enfermedades intestinales) durante toda la temporada.

TABLA 6.3. VALORES CORRESPONDIENTES A LOS PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS MEDIDOS.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

| PARÁMETRO MEDIDO | UNIDADES | PARÁMETRO ESTADÍSTICO | F | S | FA | CA | PC | KDF | UV |
|------------------------|----------|-----------------------|------|------|------|------|----|-----|----|
| Coliformes Fecales n=6 | UFC | \bar{x} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | S | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | Máximo | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | Mínimo | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | UFC | \bar{x} | 1.43 | 0.67 | 1.00 | 0.67 | 0 | 0 | 0 |

| PARÁMETRO MEDIDO | UNIDADES | PARÁMETRO ESTADÍSTICO | F | S | FA | CA | PC | KDF | UV |
|------------------------|----------|-----------------------|------|------|------|------|----|-----|----|
| Coliformes Totales n=6 | | S | 1.90 | 1.03 | 1.10 | 1.03 | 0 | 0 | 0 |
| | | Máximo | 4 | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | | Mínimo | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

En este trabajo se consideraron únicamente la medición de coliformes fecales y totales. Los resultados encontrados, muestran la ausencia de coliformes en prácticamente todas las muestras trabajadas, estudios de calidad de agua como los de Pérez, *et al.*, (2014) nos dicen que la ausencia de coliformes en sus muestras analizadas se deben principalmente al paso del influente por un lecho filtrante de carbón activado, impregnado con plata coloidal (sistema KDF), además, se pose un sistema de luz ultravioleta que se encarga de inactivar o destruir la presencia de estos microorganismos, considerado como una alternativa a la desinfección de la adición con cloro (Molina, 2019).

6.2.4 Análisis gráfico de la caracterización del agua de lluvia

Este análisis fue realizado con la finalidad facilitar la interpretación visual de los resultados obtenidos en la caracterización del agua de lluvia, se construyeron una serie de gráficas que establecen la variabilidad encontrada para cada barrera de desinfección de acuerdo a los parámetros tradicionales en análisis de agua, para lo cual, se dividió la construcción de graficas según la escala numérica de los valores obtenidos en cada parámetro, de tal forma, que la evolución que el influente S tuvo a lo largo del sistema de potabilización es visible frente a los diversos parámetros medidos.

Las siguientes figuras muestran los resultados de cada uno de los parámetros medidos, y descritos en las anteriores tablas para algunos de los parámetros, se han marcado los límites máximos permisibles, dispuestos en la NOM-127-SSA1-1994.

En primer lugar, se posicionaron los parámetros cuyos valores oscilan de 0 a 4 unidades de medición. En la Figura 6.9, se muestra el LMP (Límite Máximo Permisible) para el parámetro de coliformes totales, regulado por la NOM-127-SSA1-1994, se puede apreciar que dada la ausencia de coliformes en las barreras de desinfección PC, KDF y UV no se detectaron Unidades Formadoras de Colonias por cada 100 mL de muestra (UFC/100 mL), éstos puntos no fueron incluidos en la gráfica. En lo que respecta a los SST, sólo se llevó a cabo la medición de éste parámetro para los puntos "F y S", o bien Fondo y Superficie. Por otra parte, el análisis gráfico de parámetros como DQO, muestra la remoción de materia orgánica en las barreras de desinfección en PC y UV, y un incremento de materia orgánica en KDF, la razón de éste aumento puede ser atribuida al tiempo de vida que éste sistema de desinfección tiene. En lo que respecta a la absorbancia, los valores más destacables de presentaron el punto FA, y es notoria la disminución de la absorbancia conforme el influente pasa a través del sistema de potabilización.

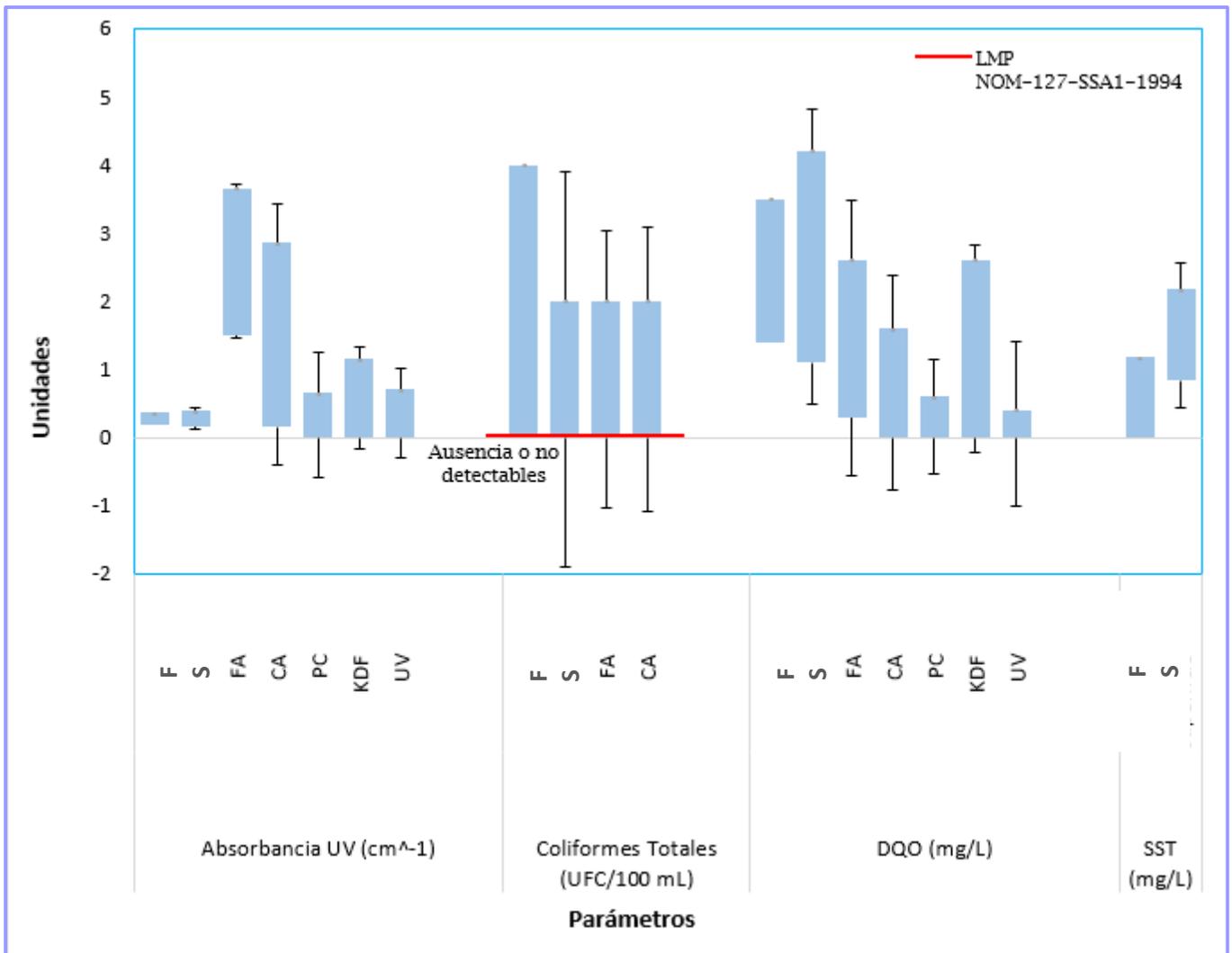


FIGURA 45. EVALUACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS PARA LOS PARÁMETROS; ABSORBANCIA, COLIFORMES TOTALES, DQO Y SST.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

La Figura 6.10, se enfoca en los parámetros cuyas unidades van de 0 a 34, debido al máximo que presentan estos parámetros, no fue posible ponerlos en la Figura 6.9. Se muestra que, en el parámetro color aparente, sólo se tienen analizados los puntos F y S, esto debido a que nos interesó tener una referencia de la calidad del agua de lluvia en ambos puntos de muestreo y su variabilidad entre un punto y otro, sin embargo, para ésta investigación, fue de interés evaluar el color verdadero ya que se encuentra normado como requerimiento para agua potable, el análisis en este caso, mostró ser aceptable como agua potable, encontrándose todas las

mediciones dentro de los límites máximos permisibles para color verdadero. En lo que respecta al pH, que de igual forma se cuentan con valores conocidos que no se deben rebasar, podemos ver que nos encontramos bajo norma, sin embargo, para la turbiedad se encontró que los valores presentes desde el influente hasta lo sistemas de potabilización, no obedece el límite máximo permisible. Finalmente, en lo que respecta al COT, se aprecia que los valores en F y S oscilan entre 1 y 3.7 mg/L, sin embargo, se presenta un aumento en FA y PC con valores que atraviesan los 8 y 13 mg/L respectivamente. La atribución del incremento de unidades, posiblemente de deba a la carga de contaminantes que arrastra el FA (Zani, et al., 2005), dado que es necesario darle mantenimiento para mejorar su eficiencia y poder llevar a cabo una nueva evaluación.

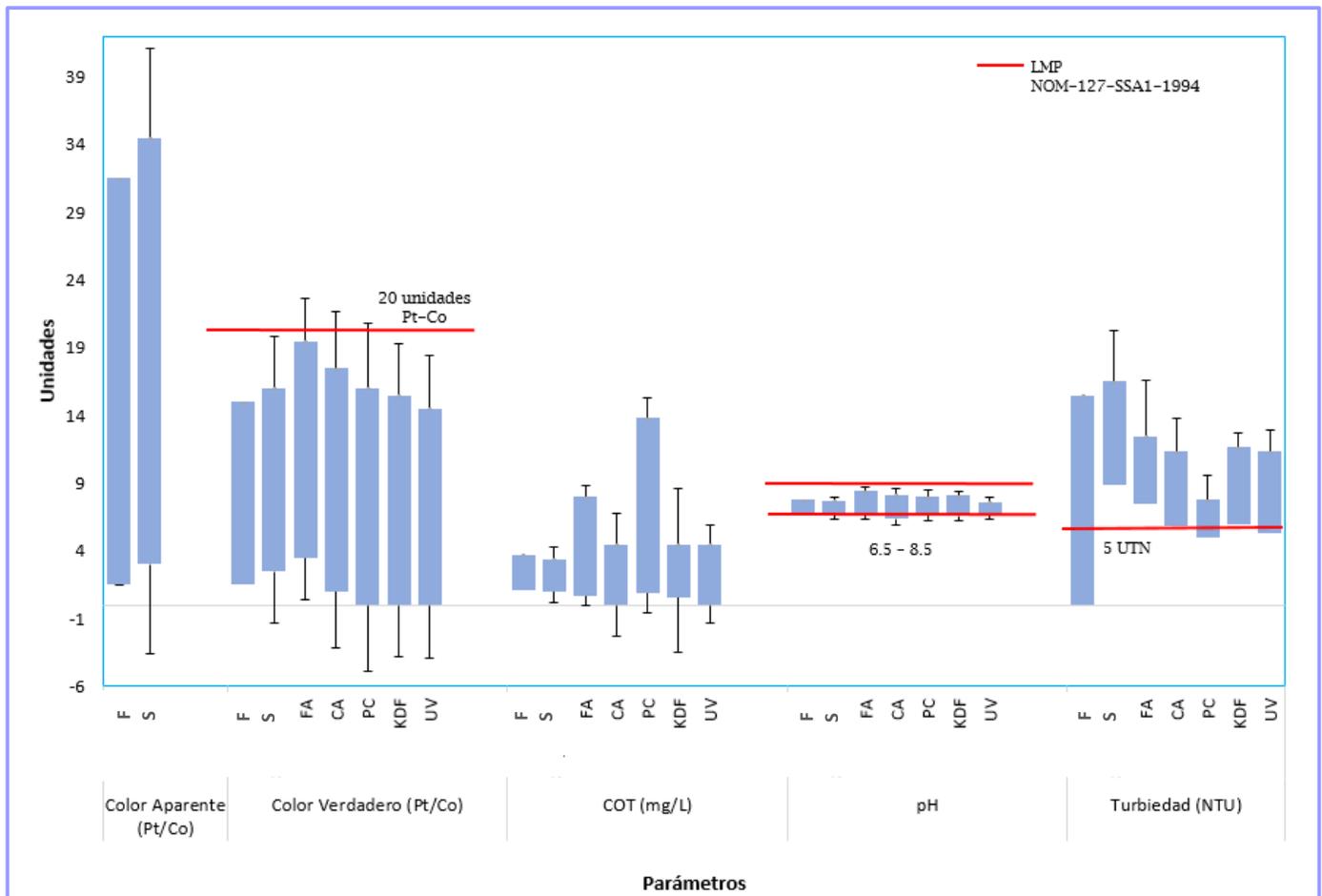


FIGURA 46. EVALUACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS PARA LOS PARÁMETROS; COLOR APARENTE Y VERDADERO, COT, pH Y TURBIEDAD. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

El análisis para SDT (mg/L), se presenta en la Figura 6.11 en donde sólo se encuentra el comportamiento exclusivamente para éste parámetro, la razón de ello es la escala numérica obtenida en los resultados de las mediciones, debido a que no encaja con ninguno otro de los parámetros estudiados. Es destacable que todos los datos obtenidos para el sistema de potabilización caen en un rango mucho menor al establecido por la NOM-127-SSA1-1994.

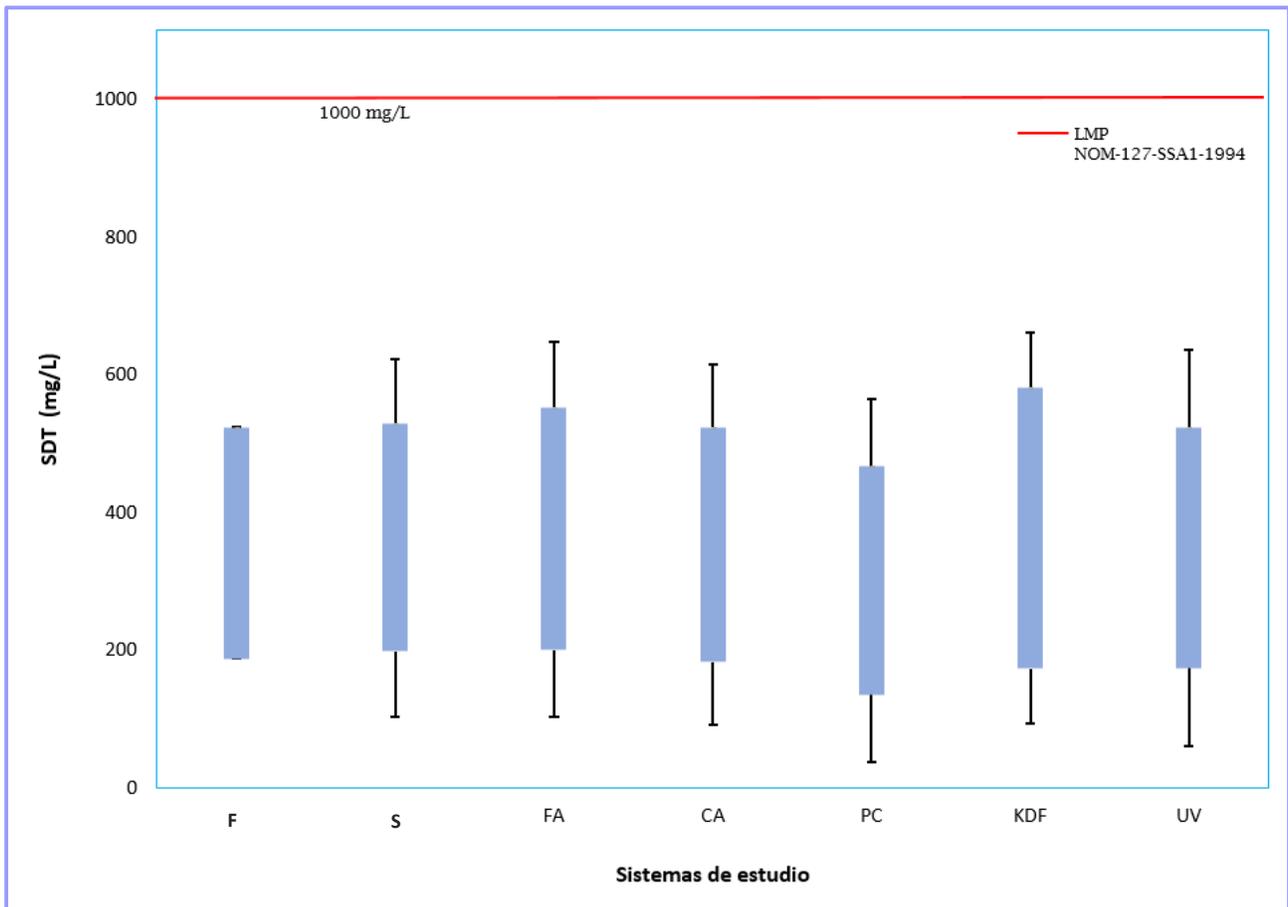


FIGURA 47. EVALUACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS PARA EL PARÁMETRO SDT.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

6.3 Análisis estadístico de los resultados

Este estudio se realizó para el punto de muestreo S, con la finalidad de buscar datos que propiciaran error en la obtención de resultados, también se trabajaron las barreras de desinfección PC, KDF, y UV, de tal forma que se dieran a conocer todos aquellos datos que presentan alguna interferencia en el comportamiento del sistema de potabilización y su análisis conjunto con la DTP.

6.3.1 Prueba de Grubbs

La prueba de Grubbs muestra que los datos obtenidos en para DTP, presentan un total de tres anomalías existentes en la evaluación de un total de 40 datos, resultantes del número de partículas del día 10 de octubre, Tabla 6.4.

TABLA 6.4. ANOMALÍAS ENCONTRADAS EN LA PRUEBA DE GRUBBS PARA DTP.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

| PARÁMETRO ANALIZADO | UNIDADES | RESULTADO | | | |
|-----------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | S | PC | KDF | UV |
| Total de partículas n=20 | Nº/L | 1 | 1 | No existe | 1 |
| Diámetro de partículas n=20 | µm | No existe | No existe | No existe | No existe |

En lo que respecta a los parámetros tradicionales, las anomalías se presentan en su mayoría en las barreras PC para los parámetros absorbancia (16 de agosto), color verdadero (23 de enero), y KDF en color verdadero (23 de enero), turbiedad (09 de agosto), respecto a la barrera UV, no hay presencia de anomalías en comparación con las mediciones para DTP, en S, la anomalía presente corresponde a color verdadero (09 de agosto), Tabla 6.5.

TABLA 6.5. ANOMALÍAS ENCONTRADAS EN LA PRUEBA DE GRUBBS PARA PARÁMETROS TRADICIONALES.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

| PARÁMETRO ANALIZADO | UNIDADES | RESULTADO | | | |
|-----------------------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | S | PC | KDF | UV |
| Absorbancia n=20 | cm ⁻¹ | No existe | 1 | No existe | No existe |
| Color verdadero n=20 | Pt-Co | 1 | 1 | 1 | No existe |
| Carbón orgánico total n=9 | mg/L | No existe | - | - | No existe |
| Sólidos disueltos totales n=20 | mg/L | No existe | No existe | No existe | No existe |
| Turbiedad n=20 | UNT | No existe | No existe | 1 | No existe |

Estas anomalías existentes, son clave para el análisis del comportamiento de cada uno de los parámetros medidos en este estudio, indican desde la falla de equipos, el fallo del sistema de operación, hasta los incrementos y decesos de la composición natural de las muestras, lo último se atribuye a este caso particular.

6.3.2 Análisis de Varianza (ANOVA)

Al igual que en la prueba de Grubbs, el análisis de varianza fue realizado para S, PC, KDF y UV, esta vez el punto de muestreo F también fue parte de la evaluación. La prueba se dividió en tres etapas, la primera analiza la variabilidad entre los puntos de muestreo F y S, necesaria para evaluar la toma de muestra que pasaría por el sistema de potabilización, la segunda parte, corresponde las barreras que presentaron mejor comportamiento en la disminución de contaminantes y la tercera etapa, se enfoca en evaluar la variabilidad entre el influente S y la barrera de desinfección que se consideró más apropiada para este caso de potabilización. Las pruebas ANOVA se realizaron tanto para análisis DTP como para análisis de parámetros tradicionales. Para mayor detalle, consultar ANEXO A4.

6.3.2.1 Variabilidad entre F y S

Como se dijo anteriormente, en esta etapa se evalúa la variabilidad existente o no entre los puntos de muestreo F y S, en el cual, el resultado obtenido, no se muestra variabilidad existente para ninguno de los análisis obtenidos, Tabla 6.6.

TABLA 6.6. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS PUNTOS FONDO (F) Y SUPERFICIE (S) DE LA DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

| PARÁMETRO ANALIZADO | UNIDADES | RESULTADO |
|----------------------------|-----------------|------------------------|
| Total de Partículas | Nº/L | No existe variabilidad |
| Diámetro de Partículas | µm | No existe variabilidad |

Respecto al análisis de algunos parámetros frecuentemente medidos, se encontró la existencia de variabilidad en todas las pruebas mostradas en la Tabla 6.7, a excepción de la DQO y SST. Respecto a las pruebas de coliformes fecales, no se encuentra expuesto el resultado de la prueba ANOVA, debido a que no se detectó su presencia en las pruebas realizadas para su detección. El resultado de la prueba ANOVA para las técnicas analíticas realizadas, muestra que existe variabilidad entre el punto de muestreo Fondo y el punto de muestreo Superficie, esto es importante debido a la selección del influente que pasa al sistema de potabilización.

TABLA 6.7. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS PUNTOS FONDO (F) Y SUPERFICIE (S).
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

| PARÁMETRO ANALIZADO | UNIDADES | RESULTADO |
|----------------------------|------------------|---------------------|
| Absorbancia UV 254nm | cm ⁻¹ | Existe variabilidad |
| Color Aparente | Pt/Co | Existe variabilidad |
| Color Verdadero | Pt/Co | Existe variabilidad |
| Coliformes Totales | UFC/100 mL | Existe variabilidad |

| PARÁMETRO ANALIZADO | UNIDADES | RESULTADO |
|-----------------------------|-----------------|------------------------|
| Coliformes Fecales | UFC/100 mL | - |
| Carbón Orgánico Total | mg/L | Existe variabilidad |
| Demanda Química de Oxígeno | mg/L | No existe variabilidad |
| pH | - | Existe variabilidad |
| Sólidos Disueltos Totales | mg/L | Existe variabilidad |
| Sólidos Suspendidos Totales | mg/L | No existe variabilidad |
| Turbiedad | NTU | Existe variabilidad |

La prueba realizada para el análisis de varianza muestra en la mayoría de los casos la existencia de variabilidad entre un sistema y otro

6.3.2.2 Variabilidad entre PC y UV

El segundo análisis realizado hizo referencia los puntos que presentaron mejor remoción de contaminantes a lo largo de toda la temporada de lluvia, estos puntos, corresponden a las barreras de desinfección propuestas. La Tabla 6.8 muestra el resultado para la prueba ANOVA, para este análisis se encontró que No existe variabilidad para todo el detalle del análisis de DTP.

TABLA 6.8. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS PUNTOS PLATA COLOIDAL (PC) Y LÁMPARA DE LUZ ULTRAVIOLETA (UV) DE LA DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

| PARÁMETRO ANALIZADO | UNIDADES | RESULTADO |
|----------------------------|-----------------|------------------------|
| Total de Partículas | Nº /L | No existe variabilidad |
| Diámetro de Partículas | µm | No existe variabilidad |

Sin embargo, para los parámetros físicos, químicos y biológicos, se encontró que no existe variabilidad para COT y DQO. Se observa que no hay un resultado definido para color aparente, coliformes totales y fecales y SST, la razón de esto es que se decidió no tomar medición del color aparente para las barreras de potabilización, dado que nuestro interés es cuantificar el color verdadero cuyos límites se encuentran en la NOM-127-SSA1-1994 a diferencia del color aparente. En lo que respecta a las pruebas biológicas, dada la ausencia de coliformes totales y fecales en las barreras de desinfección, no fue posible realizar una prueba ANOVA, y para los SST, no fue posible la cuantificación en laboratorio, el interés inicial fue conocer la calidad sobre la que se estaría trabajando y posteriormente incluir los parámetros que podrían influir en la DTP en las barreras de desinfección, no siendo así para S, ya que para el influente si fueron evaluados los SST. Los SST actúan como índice sobre el nivel de contaminación que tenemos y dado que no se obtuvieron valores importantes, se decidió realizar pruebas analíticas más sensibles a la materia que aún podría tener presencia en las barreras de desinfección, Tabla 6.9.

TABLA 6.9. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS PUNTOS PLATA COLOIDAL (PC) Y LÁMPARA DE LUZ ULTRAVIOLETA (UV).

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

| PARÁMETRO ANALIZADO | UNIDADES | RESULTADO |
|-----------------------------|------------------|------------------------|
| Absorbancia UV 254nm | cm ⁻¹ | Existe variabilidad |
| Color Aparente | Pt/Co | - |
| Color Verdadero | Pt/Co | Existe variabilidad |
| Coliformes Totales | UFC | - |
| Coliformes Fecales | UFC | - |
| Carbón Orgánico Total | mg/L | No existe variabilidad |
| Demanda Química de Oxígeno | mg/L | No existe variabilidad |
| pH | - | Existe variabilidad |
| Sólidos Disueltos Totales | mg/L | Existe variabilidad |
| Sólidos Suspendidos Totales | mg/L | - |

| PARÁMETRO ANALIZADO | UNIDADES | RESULTADO |
|----------------------------|-----------------|---------------------|
| Turbiedad | NTU | Existe variabilidad |

6.3.2.3 Variabilidad entre S y UV

Finalmente, se llegó a la etapa 3, en la cual se elaboró un último análisis de datos de varianza, mostrando la existencia o no de la variabilidad entre la entrada y la barrera que presentó mejor remoción de contaminantes, la Tabla 6.10 muestra el análisis realizado para DTP, en la que se indica que al igual que en la etapa 1 y 2, no existe variabilidad entre las barreras seleccionadas.

TABLA 6.10. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS PUNTOS SUPERFICIE (S) Y LÁMPARA DE LUZ ULTRAVIOLETA (UV) DE LA DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

| PARÁMETRO ANALIZADO | UNIDADES | RESULTADO |
|----------------------------|-----------------|------------------------|
| Total de Partículas | Nº/L | No existe variabilidad |
| Diámetro de Partículas | µm | No existe variabilidad |

Para el caso de los parámetros tradicionales, se encontró la existencia de variabilidad únicamente en los SDT, lo cual indica que la cantidad removida de SDT es significativa entre el influente S y la barrera UV, sin embargo, para el resto de los parámetros, no se encuentra una diferencia estadísticamente significativa, Tabla 6.11.

TABLA 6.11. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS PUNTOS SUPERFICIE (S) Y LÁMPARA DE LUZ ULTRAVIOLETA (UV).
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

| PARÁMETRO ANALIZADO | UNIDADES | RESULTADO |
|---------------------------------|------------------|------------------------|
| Absorbancia UV _{254nm} | cm ⁻¹ | No existe variabilidad |

| PARÁMETRO ANALIZADO | UNIDADES | RESULTADO |
|-----------------------------|-----------------|------------------------|
| Color Aparente | Pt/Co | - |
| Color Verdadero | Pt/Co | No existe variabilidad |
| Coliformes Totales | UFC | No existe variabilidad |
| Coliformes Fecales | UFC | - |
| Carbón Orgánico Total | mg/L | No existe variabilidad |
| Demanda Química de Oxígeno | mg/L | No existe variabilidad |
| pH | - | No existe variabilidad |
| Sólidos Disueltos Totales | mg/L | Existe variabilidad |
| Sólidos Suspendidos Totales | mg/L | - |
| Turbiedad | NTU | No existe variabilidad |

Como se observó en los resultados de las pruebas, no muestran una diferencia estadísticamente significativa al realizar la comparación entre los procesos, sin embargo, la no diferencia, conlleva al análisis detallado de los tratamientos, dado que los resultados experimentales obtenidos fueron evaluados uno a uno, es importante replantear qué tan significativa es la remoción o no remoción en cada etapa de potabilización.

En un intento por obtener correlaciones que fueran satisfactorias a los resultados obtenidos, se usó un análisis de Grubbs para el trabajo de datos inconsistentes en el comportamiento de casa sistema (datos anómalos), posterior a ello se llevaron a cabo construcciones de gráficas de las cuales, se consideró como variable dependiente aquella que fuera resultado del comportamiento observado en la distribución de partículas, de tal forma que los parámetros de interés, quedaron registrados en el eje de las abscisas (eje Y) y la DTP en número de partículas y tamaño en el eje de las ordenas (eje X).

La construcción de estas gráficas fue llevada a cabo usando los resultados obtenidos en los parámetros; absorbancia UV_{254nm} , COT, color verdadero, DQO, SDT, SST y Turbiedad, con respecto al tamaño de partícula y posteriormente al número de partículas. Sin embargo, los resultados no fueron satisfactorios, debido a que no se encontró una tendencia que predijera el nivel de contaminación en función de la distribución de partículas, esto se atribuye al tratamiento que se le dio a las muestras para la medición de cada parámetro en turno.

VII. CONCLUSIONES

1. El número y la DTP es un parámetro sensible ante cualquier cambio de la calidad del agua y dicho cambio fue observado en cada una de las barreras que componen el sistema de potabilización que se relacionan con las eficiencias de remoción de los diferentes parámetros convencionales evaluados, sin embargo, no fue posible encontrar una expresión matemática que describiera este comportamiento.
2. Con base en el comportamiento de la DTP es posible establecer los cambios de calidad de acuerdo a la época del año. De ello se establece que en época de estiaje tanto el Número como el Tamaño aumenta como resultado de diversos arrastres.
3. Con relación al sistema de potabilización se concluye lo siguiente:
 - a. El agua de lluvia (influyente) que entró en el sistema de potabilización presentó un total de 2 167 partículas (Nº/L) de estas y de forma acumulada el 90% fue $\leq 0.976 \mu\text{m}$ a lo largo del estudio.
 - b. En el pretratamiento a base de Filtro de Arena (FA), el efluente contenía 2 924 partículas por L de muestra (1.34 veces más que en influyente), sin embargo, el tamaño de partícula es menor ($0.913 \mu\text{m}$). Dicho aumento se atribuyó a una acumulación de material en el lecho filtrante.
 - c. El filtro a base de Carbón Activado (CA), presentó un efluente con un contenido de 1 240 partículas por L de muestra (57% de remoción) donde el 90% de estas fueron menores a $0.946 \mu\text{m}$.
 - d. Los sistemas de desinfección propuestos se comportaron de la siguiente manera: Para la luz UV_{254} se obtuvo 970 partículas (Nº/L), el filtro a base de plata coloidal (PC) tuvo un remanente promedio de 1 193 partículas (Nº/L) mientras que el sistema KDF presentó un efluente con

un contenido de partículas de 1 869 (Nº/L), en todos estos sistemas el 95% de las partículas analizadas fue $\leq 0.945 \mu\text{m}$, lo que resulta una eficiencia de remoción total de partículas en el sistema de 55.22%, 44.94% y 13.75% para el primero, segundo y tercer barrera de desinfección respectivamente.

4. No existió una correlación lineal entre el número o diámetro vs concentración de parámetros tradicionales determinados, sólo se obtuvieron relaciones con $r^2 > 0.8$ de tipo polinómica y logarítmicas para los parámetros COT (en S), color verdadero (en KDF), SST (en F) y turbiedad (en FA) respecto al tamaño de partícula, así como absorbancia (en S), COT (en S), color (en KDF) y turbiedad (en FA) respecto al número de partículas presentes (Nº/L). Este comportamiento fue atribuido al tamaño de partículas tan pequeño que se presenta en el agua de lluvia.

VIII. COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES

La distribución de tamaño de partícula es útil cuando se quiere caracterizar una gran cantidad de muestras de agua provenientes de una planta potabilizadora para este caso, sin embargo, la preparación necesaria para llevar a cabo dicho análisis, puede absorber una cantidad importante de tiempo durante el período de estudio, se recomienda tomar un día de preparación de muestras y aditamentos necesarios para llevar a cabo la técnica.

Debido a los resultados no satisfactorios en un intento por obtener relaciones entre los parámetros de monitoreo de la calidad del agua y la distribución de las partículas, así como a la atribución realizada en el capítulo VII, se recomienda que los parámetros se cuantifiquen bajo las mismas condiciones de las muestras de distribución de partículas, es decir, llevar a cabo las filtraciones y diluciones necesarias para la obtención de valores que representen la distribución y su variabilidad en el tiempo de análisis y en las mismas muestras tomadas.

Como se mostró en el capítulo de análisis de calidad de agua, la variabilidad presente en cada sistema muestreado que compone tanto a los puntos de muestreo iniciales como al sistema de potabilización, muestra tener semejanza en cuanto al número de partículas entre cada punto evaluado y respecto de los parámetros establecidos, es sugerente recomendar el monitoreo del sistema de potabilización, únicamente empleando el número de partículas.

Es factible estar al pendiente y cuidado de cada detalle que indique una nula remoción de contaminantes, el mantenimiento al sistema de tratamiento cualquiera que sea, es indispensable.

IX. REFERENCIAS

1. Abdulla, F. A. & Al-Shareef, A. W., 2009. Rainwater harvesting systems for household water. *DEsalination*, Volumen 243, pp. 195-207.
2. Adeniyi, I. F. & Olabanji, I. O., 2005. The physico-chemical and bacteriological quality of rainwater collected over different roofing materials in Ile-Ife, southwestern Nigeria. *Chem. Ecol.*, 21(3), pp. 149-166.
3. Aguamarket, 2018. *Aguamarket*. [En línea] Available at: <http://www.aguamarket.com/productos/productos.asp?producto=4661> [Último acceso: 13 Septiembre 2018].
4. Allen, T., 1997. *Particle Size Measurement*. Fifth edition ed. Great Britian: CHAPMAN & HALL.
5. Allen, T., 1997. *Particle Size Measurement. Volume I. Powder Sampling and Particle Size Measurement*. Fifth edition ed. London: Chapman & Hall.
6. Amón, I., 2010. *TESIS DE MAESTRÍA: GUÍA METODOLÓGICA PARA LA SELECCIÓN DE TÉCNICAS DE DEPURACIÓN DE DATOS*. MEDELLÍN, COLOMBIA: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.
7. Anaya, G. M., 2004. *Manual de Sistemas de captación de agua de lluvia para uso doméstico en América Latina y el Caribe*. Montecillo, México: Clehio de Posgraduados.
8. Anaya, M., 2002. *Sistemas de Captación de Agua de Lluvia. Memoria de la VIII Reunión Nacional sobre Sistemas de Captación de Agua de Lluvia*. Chihuahua, México, s.n.
9. Aparicio, I. d. E., 2018. *Temas Divulgación*. [En línea] Available at: <http://www.pluviometro.com/Temas.html> [Último acceso: 04 Junio 2018].
10. Arcos, M., Ávila de Navia, S. L., Estupiñán Torres, S. M. & Gómez Prieto, A. C., 2005. Indicadores nmicrobiológicos de contaminación de las fuentes de agua. *NOVA-*, 3(4), pp. 1-116.
11. AWWA, 2002. *AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. Calidad y tratamiento de agua*. 1era ed. España: McGraw-Hill.
12. Baker, M., 1948. *The Quest for Pure Water*. New York: American Water Works Association.

13. Ballen, J. A., Galarza García, M. A. & Ortiz Mosquera, R. O., 2006. Historia de los sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia.
14. Bello, N., 2018. *Tesis: Variabilidad de la calidad del agua de lluvia en los sistemas de almacenamiento y su potencial como fuente para abastecimiento*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química.
15. Brubbs, F. E. & Beck, G., 1972. "Extension of Sample Sizes and Percentage Points for Significance Test of Outlying Observations". *Technometrics*, 14(4), pp. 847-854.
16. Bucheli, T. D., Müller, S. R., Voegelin, A. & Schwarzenbach, R. P., 1998. Bituminous roof sealing membranes as major sources of the herbicide (R,S)-mecoprop in roof runoff waters: potential contamination of groundwater and surface waters. *Environmental Science and Technology*, 32(22), pp. 3465-3471.
17. Byrne, A. y otros, 2014. Small particules in distribution systems- The effect of improving treatment. *American Water Works Association*, January, pp. E21-E31.
18. Cadle, R. D., 1955. *Particle Size Determination*. New York: Interscience Publishers, INC..
19. Chávez, A. C., 2004. *Tesis: Optimización del Tratamiento Primario Avanzado Vía Distribución de Tamaño de Partícula*, México: UNAM.
20. Chávez, A., Jiménez, B. & Maya, C., 2008. Evaluación de la calidad microbiológica del agua de riego a través del tamaño de partícula. *Ingeniería hidráulica en México*, XXIII(4), pp. 91-101.
21. Chulluncuy, N. C., 2011. Tratamiento de agua para consumo humano. *Ingeniería Industrial*, Issue 29, pp. 153-170.
22. Clesceri, L. S., Greenberg, A. E. & Eaton, A. D., 1998. *Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater*. 20th Edition ed. Washington, DC: American Public Health Association.
23. CONAGUA, 2011. *Estadísticas del agua en México*, México : CONAGUA.
24. CONAGUA, 2012. *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Desinfección para Sistemas de Agua Potable y Saneamiento..* Libro 43 ed. México: CONAGUA.
25. CONAGUA, 2015. *MAPAS. MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO. DISEÑO DE PLANTAS POTABILIZADORAS DE TECNOLOGÍA SIMPLIFICADA*, México: CONAGUA.

26. CONAGUA, 2017b. *Subdirección GEneral Técnica*, s.l.: s.n.
27. CONAGUA, 2017. *Estadísticas DEL AGUA EN México*, México: CONAGUA.
28. CONAGUA, 2018. *Estadísticas DEL AGUA EN México*, México: CONAGUA.
29. CONAGUA, 2018. *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. Pretratamiento y Tratamiento Primario..* Libro 46 ed. México: CONAGUA.
30. CONAGUA, 2018. *Sistema Meteorológico Nacional*. [En línea] Available at: <http://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias> [Último acceso: 26 Septiembre 2018].
31. Concha, L., 2013. *Educación Chile*. [En línea] Available at: [http://ww2.educarchile.cl/UserFiles/P0001/File/la quimica del agua.pdf](http://ww2.educarchile.cl/UserFiles/P0001/File/la%20quimica%20del%20agua.pdf) [Último acceso: 10 Enero 2019].
32. Coulter, B., 2009. *Multizicer 3 Operator's Manual*. U.S.A.: Coulter Counter.
33. COULTER, B., 2019. *BECKMAN COULTER Life Sciences*. [En línea] Available at: <https://www.beckman.es/cell-counters-and-analyzers/z-series-coulter-counter/features> [Último acceso: 19 junio 2019].
34. CPEUM, 2011. *Cámara de Diputados*. [En línea] Available at: http://www3.diputados.gob.mx/camara/001_diputados/012_comisioneslxii/01_ordinarias/002_agua_potable_y_saneamiento/13_marco_juridico/01_constitucion_politica_de_los_estados_unidos_mexicanos [Último acceso: 13 febrero 2019].
35. DeBusk, K. & Hunt, W., 2014. *Report No. 425 Rainwater Harvesting: A Comprehensive Review of Literature*, s.l.: s.n.
36. Despins, C., Farahbakhsh, K. & Leidl, C., 2009. Assessment of rainwater quality from rainwater harvesting systems in Ontario, Canada. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, pp. 117-134.
37. Durand, J. S., Gallego Picó, A., García Mayor, M. A. & Pradana Pérez, J. Á., 2005. *AGUAS POTABLES PARA CONSUMO HUMANO. GESTIÓN Y CONTROL DE LA CALIDAD*. Primera ed. Madrid: LERKI PRINT, S.A..

38. Eurona, 2018. *LÍNEA VERDE*. [En línea] Available at: <http://www.lineaverdeceutatrace.com/lv/guias-buenas-practicas-ambientales/buenas-practicas-sobre-agua/consumo-de-agua-en-el-mundo.asp> [Último acceso: 26 ABRIL 2018].
39. FAO, 2013. *CAPTACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE AGUA DE LLUVIA. Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe*. 2013 ed. Santiago, Chile: FAO.
40. FCEA, 2018. *AGUA.org.mx*. [En línea] Available at: <https://agua.org.mx/agua-y-clima-en-mexico/> [Último acceso: 25 Junio 2018].
41. Fernández, A. & du Mortier, C., 2005. *Evaluación de la condición del agua para consumo humano en Latinoamérica*. Buenos Aires, Argentina: Centro de Estudios Transdisciplinarios del Agua, Facultad de Ciencias Veterinarias, Universidad de Buenos Aires.
42. Förster, J., 1999. The influence of location and season on the concentrations of macroions and organic trace pollutants in roof runoff. *Water Science and Technology*, 38(10), pp. 83-90.
43. Förster, J., 1996. Patterns of Roof Runoff Contamination and their Potential Implications on Practice and Regulation of Treatment and Local Infiltration. *Water Science & Technology*, 36(6), pp. 39- 48.
44. García, J. J., 2010. *Influencia de los procesos biológicos de depuración en la distribución y tamaño de partículas en tratamientos de aguas residuales urbanas*, Granada: Universidad de Granada.
45. Garrido, S. E. y otros, 2006. Potabilización de agua de lluvia rodada por medio filtración en múltiples etapas modificada, México.
46. Ghisi, E., Tavares, D. d. F. & Rocha, V. L., 2009. Rainwater harvesting in petrol stations in Brasília: Potential for potable water savings and investment feasibility analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(88040), pp. 79-85.
47. Gómez Reyes, E., 2013. Valoración de las componentes del balance hídrico usando información estadística y geografía: la cuenca del Valle de México. *REALIDAD, DATOS Y ESPACIO REVISTA INTERNACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA*, 4(3), p. 1.
48. González, J., 2017. *TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA. ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE PARTÍCULAS MEDIANTE DIFRACCIÓN LÁSER: APLICACIÓN PARA LA MEJORA DE MESCLAS DE*

ESPECIAS Y AROMAS.. 1ra ed. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. Escuela Técnica Superior Ingenieros Industriales Valencia.

49. Guitiérrez, M. & Rubio Arias, H. O., 2014. Captación pluvial en Chichuahua: una alternativa sustentable. *TECNOCENCIA: El científico frente a la sociedad*, 8(1), pp. 1-6.
50. Herdan, G., 1953. *Small Particle Statistics*. New York: Elsevier.
51. Ho-Kyong, S., Seung-Hyun, K., Laszlo, E. & Saravanamuthu, V., 2006. Analytical methods of size distribution for organic matter in water and wastewater. *Korean J. Chem. Eng.*, 24(4), pp. 581-591.
52. HORIBA, S., 2017. *HORIBA INSTRUMENTS, INC.*. [En línea] Available at: www.horiba.com/us/particle [Último acceso: 7 Enero 2019].
53. INEGI, 2018. *cuentame.inegi.org.mx*. [En línea] Available at: <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/df/territorio/clima.aspx?tema=me&e=09> [Último acceso: 25 Junio 2018].
54. Jiménez, B. E., 2005. *La Contaminación Ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada*. 2 ed. México: LIMUSA, S.A. de C.V. GRUPO NORIEGA EDITORES.
55. Jiménez, C. B., Torregrosa y Armentia, M. L. & Aboites Aguilar, L., 2010. *EL AGUA EN MÉXICO: CAUSES Y ENCAUSES*. Primera ed. MÉXICO: ACADEMIA MEXICANA DE CIENCIAS.
56. Lee, J. Y., Yang, J. S., Han, M. & Choi, J., 2010. _Comparison of the microbiological and chemical characterization of harvested rainwater and reservoir water as alternative water resources. *Science of the Total Environment*, 408(4), pp. 896-905.
57. LENNTECH, 2017. *LENNTECH WATER TREATMENT SOLUTIONS*. [En línea] Available at: <https://www.lenntech.es/faq-contaminantes-del-agua.htm?fbclid=IwAR0P2trfcf5MNPsyWCIRg-TD33YENEUgu8a1PifVhszYT2HqqXR5u2NAfjk> [Último acceso: 10 Enero 2019].
58. LENNTECH, 2018. *LENNTECH*. [En línea] Available at: <https://www.lenntech.es/filtros-y-filtracion/medio-filtrante-kdf.htm> [Último acceso: 13 Septiembre 2018].

59. Levine, A. D., Tchobanoglous, G. & Takashi, A., 1985. Characterization of the size distribution of contaminants in wastewater: treatment and reuse implications.. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 57(7), pp. 805-816.
60. Levine, A. D., Tchobanoglous, G. & Takashi, A., 1991. Size distribution of particulate contaminants in wastewater and their impact on treatability. *Water Res.*, 25(8), pp. 911-922.
61. Mateos, B. P., 2005. *Población y Planeación Hidrológica*. Sevilla: COLLECCION KORA.
62. McCabe, W. L., Smith, J. C. & Harriott, P., 1991. *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. Cuarta Edición ed. España: McGraw-Hill.
63. Mendez, C. B. y otros, 2011. The effect of roofing material on the quality of harvested rainwater. *WATER RESEARCH*, Volumen 45, pp. 2049-2059.
64. Mesa, J. J. G., 2010. *INFLUENCIA DE LOS PROCESOS BIOLÓGICOS DE DEPURACIÓN EN LA DISTRIBUCIÓN Y TAMAÑO DE PARTÍCULAS EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS*. 1 ed. GRANADA: UNIVERSIDAD DE GRANADA.
65. Metcalf & Eddy, 2014. *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovey*. Fourt edition ed. New York: McGraw Hill.
66. Molina, U., 2019. *TESIS: POTABILIZACIÓN DE AGUA DE LLUVIAA TRAVÉS DE UN SISTEMA DE BARRERAS MÚLTIPLES*. México: UNAM.
67. Montt, P. Rivera, B. Fernández & R. Valenzuela, 2003. *Caracterización de la calidad de las aguas de lluvias urbanas de Santiago*, Santiago : Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica.
68. Morató, J. y otros, 2006. Tecnologías sostenibles para la potabilización y el tratamiento de aguas residuales. *REVISTA LASALLISTA DE INVESTIGACIÓN*, 3(1), pp. 19-29.
69. Neis, U. & Tiehm, A., 1997. PARTICLE SIZE ANALYSIS IN PRIMARY AND SECONDARY WASTE WATER EFFLUENTS. *Wat. Sci. Tech.*, 36(4), pp. 151-158.
70. Oller, V. & Sanz, J., 2012. Cáncer por contaminación química del agua de consumo humano en menores de 19 años: una revisión sistemática. *Revista Panam Salud Pública*, 32(6), pp. 435-443.
71. OMS, 1995. Guías OMS para la Calidad del Agua de Bebida. p. 481.

72. OMS, 1995. *Guías para la calidad del agua potable*. Ginebra: s.n.
73. Ospina, O. E. & Ramírez, H., 2014. Evaluación de la calidad del agua de lluvia para su aprovechamiento y uso doméstico en Ibagué, Tolima, Colombia. *Ingeniería Solidaria*, 10(7), pp. 125-138.
74. PENTAIR, 2018. *Water Purification*. [En línea] Available at: <http://waterpurification.pentair.com/Files/KnowledgeBase/ItemDownload/en/310073-s-pentek-sgac-rev-c-my15.pdf> [Último acceso: 13 Septiembre 2018].
75. Pérez, A., Díaz, J. & González, G., 2014. Estudio comparativo de dos sistemas de filtración casera para el tratamiento de agua para consumo humano.. *Ingenium*, 8(22), pp. 11-20.
76. PROFECO, 2000. Calidad de filtros purificadores de agua. *Revista del Consumidor*, Issue 281.
77. PS, 2009. *A Lubrizol Company PARTICLE SCIENCES DRUG DEVELOPMENT SERVICES*. [En línea] Available at: <https://www.particlesciences.com/news/technical-briefs/2009/particle-size-distribution.html> [Último acceso: 7 Enero 2019].
78. RAI, 2018. *Real Academia de Ingeniería- Diccionario Español de Ingeniería 1.0*. [En línea] Available at: <http://diccionario.raing.es/es/lema/conminuci%C3%B3n> [Último acceso: 16 Enero 2019].
79. Riyad, I. & Clayton, C., 1963. *Particle Size: Measurement, Interpretation, and Application*. New York-London: John Wiley & Sons, Inc..
80. Rodríguez, R., 2009. Modelo de aprovechamiento de aguas lluvias en zonas de pobreza extrema. *Entorno*, Issue 45, pp. 38-43.
81. Rojas, M. N., Gallardo Bolaños, J. R. & Martínez Coto, A., 2012. Implementación y caracterización de un sistema de captación y aprovechamiento de agua de lluvia. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 15(1), pp. 16-23.
82. Romero, M., 2008. *Tratamientos Utilizados en Potabilización de Agua*, Guatemala: Facultad de Ingeniería- Universidad Rafael Landívar.
83. Romero, S. M., 2017. *Tesis: Implementación de una planta piloto para la potabilización del agua de lluvia*. México: s.n.

84. Ruiz, A. M., García, J. L. & Mesa, J. L., 2010. *ERROR, INCERTIDUMBRE, PRECISIÓN Y EXACTITUD, TÉRMINOS ASOCIADOS A LA CALIDAD ESPACIAL DEL DATO GEOGRÁFICO*. s.l., CICUM. UNIVERSIDAD DE JAÉN. 1er Congreso Internacional de Catastro Unificado y Multipropósito..
85. Salinas, G., Stintz, M. & Wessely, B., 2005. Aplicación del Método Fotométrico para la Detección de la Distribución de Tamaño de Micro Partículas. *Información tecnológica*, 16(4), pp. 59-68.
86. Sazakli, E., Alexopoulos, A. & Leotsinidis, M., 2007. Rainwater harvesting, quality assessment and utilization in Kefalonia Island, Greece. *Water Research*, Volumen 41, pp. 2039-2047.
87. Schafer, A. I., 2001. *Natural organics removal using membranes: principles, performance, and cost..* Pennsylvania, USA: Technomic Publishing Company, Inc..
88. SEFILTRA, 2018. *SEFILTRA. Purificación de Fluidos*. [En línea] Available at: <http://www.sefiltra.com/filtros-de-arena.php> [Último acceso: 13 Septiembre 2018].
89. Thurman, E. M., 1985. *Organic geochemistry of natural waters*, Martinus Nijhoff. The Netherlands: Dr. W. Junk Publishers.
90. Torres, A. y otros, 2011. EVALUACIÓN PRELIMINAR DE LA CALIDAD DE LA ESCORRENTÍA PLUVIAL SOBRE TEJADOS PARA SU POSIBLE APROVECHAMIENTO EN ZONAS PERIURBANAS DE BOGOTÁ. *U.C.A Actualidad & Divulgación Científica* , 14(1), pp. 127-135.
91. UCLM, 2019. *Anova un factor y Kruskal-Wallis*. [En línea] Available at: [https://previa.uclm.es/profesorado/mdsalvador/58109/teoria/anova un factor-lectura.pdf](https://previa.uclm.es/profesorado/mdsalvador/58109/teoria/anova_un_factor-lectura.pdf) [Último acceso: 01 julio 2019].
92. UPRM, 2018. *Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez*. [En línea] Available at: <http://www.uprm.edu/manejodeaguas/> [Último acceso: 04 Junio 2018].
93. US, 2009. *Manual del Carbón Activo*. Sevilla: Universidad de Sevilla, E: U. POLITÉCNICA;
94. V. Miska, J.H.J.M. van der Graaf & J. de Koning, 2006. Improvement of monitoring of tertiary filtration with particle counting. *Water Science Technology: Water Supply*, 6(1), pp. 1-9.

95. Vargas, C., Rojas, R. & Joseli, J., 1996. *Control y Vigilancia de la Calidad del Agua de Consumo Humano. Textos Completos*. s.l.:CEPIS.
96. Vargas, F., 2005. La contaminación ambiental como factor determinante de la salud. *REvista Española de Salud Pública*, 79(2), pp. 117-127.
97. Ventura, E. J., Acosta Gallegos, J. A., Domínguez C, , M. A. & Ward, K., 2014. *CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA*, s.l.: s.n.
98. WHCF, 2019. *Wallace H. Coulter Foundation*. [En línea] Available at: <http://whcf.org/wallace-h-coulter/wallace-biography/> [Último acceso: 28 Enero 2019].
99. Yaziz, M. I., Gunting, H., Sapari, N. & Ghazali, A. W., 1989. Variations in rainwater quality from roof catchments. *Wat. Res.*, 23(6), pp. 761-765.
100. Zani, C. y otros, 2005. Toxicity and genotoxicity of surface before and after various potabilization steps.. *Mutation Research*, Issue 587, pp. 26-37.
101. Zhang, Y. y otros, 2010. Alternative Water Resources for Rural Residential Development in Western Australia. *Water Resour Manage*, Volumen 10, pp. 25-36.
102. Zobrist, J. y otros, 2000. Quality of roof runoff for groundwater infiltration. *Water research* , 34(5), pp. 1455-1462.

ANEXOS

A1. Metodología para el cálculo de diluciones empleadas en el análisis de DTP

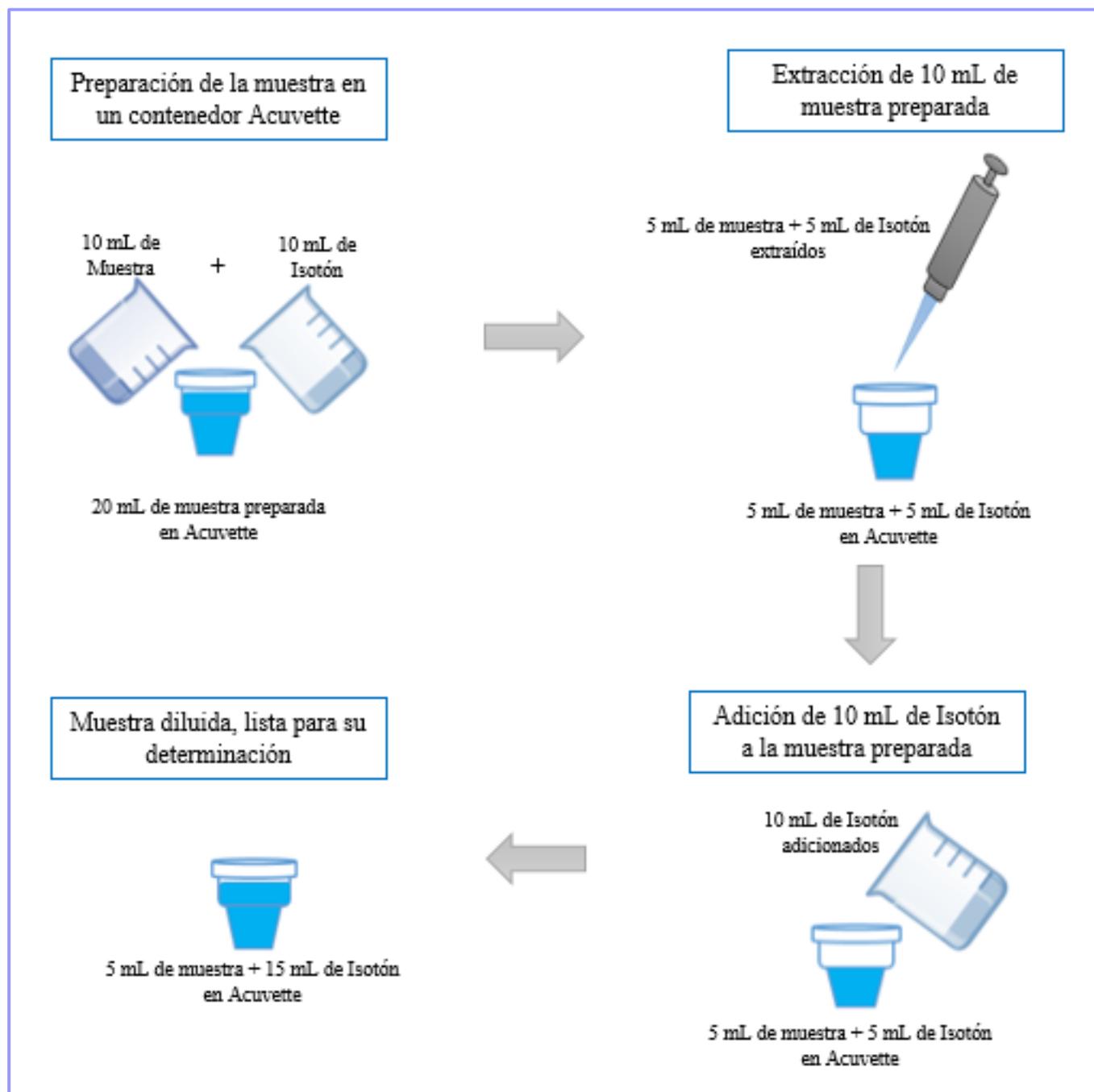


FIGURA 48. METODOLOGÍA REALIZADA PARA LAS DILUCIONES.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

La Figura A.1, muestra la metodología empleada para las diluciones presentadas en el Capítulo 5 , las cuales, fueron llevadas a cabo en forma de acumulación, lo que quiere decir que, en varias ocasiones fue necesario llevar a cabo más de una dilución sin recurrir a preparar nuevas muestras para el análisis, de tal forma que los ml quitados de muestra preparada (10 ml de muestra tomada + 10 ml de solución isotónica), fueron suplidos por un volumen igual de isotón, para ello, si era necesario, se extraía un volumen más pequeño del ya extraído anteriormente y así consecutivamente hasta que la concentración de partículas existentes pudiese atravesar las paredes de la apertura para su lectura y determinación de tamaño y número.

En esta misma Figura, sólo se muestra la primera dilución realizada, sin embargo, la Tabla 5.2 presentada en la metodología experimental, muestra el límite de diluciones que se pueden realizar, si ese límite se llega a rebasar, podría sugerirse que la muestra ya no sea representativa, debido a que el volumen presente de muestra tomada sería muy pequeño. Todas estas diluciones fueron calculadas al 50%.

Para la realización en algún otro porcentaje de dilución, o bien del volumen presente de isotón y de muestra inicial, podemos considerar las ecuaciones siguientes:

$$\text{Volumen a extraer} = \text{Volumen total}(\% \text{ dilución seleccionado}) \quad \text{Ec. (4)}$$

$$\text{Volumen de la muestra} = \text{Volumen total restante}(1 - \% \text{ dilución}) \quad \text{Ec. (5)}$$

$$\begin{aligned} &\text{Volumen de Isotón antes de la dilución} \\ &= \text{Volumen total de la muestra} - \text{Volumen muestra} \quad \text{Ec. (6)} \end{aligned}$$

Volumen total de Isotón después de la dilución

$$= \text{Volumen isoston antes de dilución} + \text{Volumen de Isoton adicionado} \quad \text{Ec. (7)}$$

Donde:

Volumen de Isotón en la muestra y el Volumen de muestra presente (Tabla 5.2), corresponden al Volumen total de Isotón después de la dilución (Ec. 6) y al Volumen de muestra (Ec. 5), respectivamente.

A2. Manual de mantenimiento del contador de partículas Multisizer™ 3 Coulter Counter ®

Se llevaron a cabo sesiones de limpieza interna en el equipo para análisis de partículas, siguiendo las recomendaciones siguientes:

- a. Drenar el sistema, y vaciar la bomba interna.
- b. Cambiar el Isotón del reservorio por Isotón limpio, y llenar nuevamente el sistema, dejarlo reposar alrededor de 10 min., y nuevamente vaciar el sistema.
- c. Preparar una disolución al 5% usando la solución Coulter Cleanz y agua desionizada Tipo I, cambiar el Isotón en el reservorio por esta disolución, llenar el sistema, y dejarlo reposar por 15 min., pasado este tiempo, vaciar sistema.
- d. Cambiar la disolución de limpieza por agua desionizada Tipo I en el reservorio, llenar el sistema y esperar al menos 10 min.
- e. Finalmente, se ingresará una disolución de desinfección al sistema, la cual consta de 0.2% de cloro comercial en agua desionizada, poner en el reservorio una vez retirada el agua desionizada y llenar el sistema, esperar 15 min. y drenar el sistema.
- f. Por último, se ingresará agua desionizada al sistema como parte final, y esperar 10 min., pasado este tiempo, se continua a drenar el sistema.

- g. En lo que respecta a la apertura, puede quedar suspendida en una disolución de limpieza Coulter Cleanz (5% v/v), por el contrario, si no se espera usar el equipo Multisizer en un largo periodo de tiempo (meses), se recomienda retirar la apertura, enjuagarla muy bien con agua Tipo I y guardarla, el electrodo se puede quedar, así como la trampa de materia suspendida (lavarla muy bien usando agua desionizada).

- h. Cuando se requiera nuevamente del equipo, es recomendable pasar un influente de Isotón limpio por el sistema, y drenar, esto al menos 3 veces, asegurando que en los análisis no queden restos de Coulter Cleanz y cloro, únicamente solución electrolítica (Isotón).

A3. Prueba de Grubbs.

TABLA A.1. VALORES DE ALFA DE ACUERDO CON EL NÚMERO DE DATOS.
FUENTE: (Brubbs & Beck, 1972).

| N | 0.1 | 0.075 | 0.05 | 0.025 | 0.01 | N | 0.1 | 0.075 | 0.05 | 0.025 | 0.01 |
|----|------|-------|-------|-------|------|-----|-----|-------|-------|-------|------|
| 3 | 1.15 | 1.15 | 1.15 | 1.15 | 1.15 | 53 | 0 | 0 | 2.981 | 3.151 | 999 |
| 4 | 1.42 | 1.44 | 1.46 | 1.48 | 1.49 | 54 | 0 | 0 | 2.988 | 3.158 | 999 |
| 5 | 1.6 | 1.64 | 1.67 | 1.71 | 1.75 | 55 | 0 | 0 | 2.995 | 3.165 | 999 |
| 6 | 1.73 | 1.77 | 1.82 | 1.89 | 1.94 | 56 | 0 | 0 | 3.002 | 3.172 | 999 |
| 7 | 1.83 | 1.88 | 1.94 | 2.02 | 2.1 | 57 | 0 | 0 | 3.009 | 3.179 | 999 |
| 8 | 1.91 | 1.96 | 2.03 | 2.13 | 2.22 | 58 | 0 | 0 | 3.016 | 3.186 | 999 |
| 9 | 1.98 | 2.04 | 2.11 | 2.21 | 2.32 | 59 | 0 | 0 | 3.023 | 3.193 | 999 |
| 10 | 2.03 | 2.1 | 2.18 | 2.29 | 2.41 | 60 | 0 | 0 | 3.03 | 3.2 | 999 |
| 11 | 2.09 | 2.14 | 2.23 | 2.36 | 2.48 | 61 | 0 | 0 | 3.036 | 3.206 | 999 |
| 12 | 2.13 | 2.2 | 2.29 | 2.41 | 2.55 | 62 | 0 | 0 | 3.042 | 3.212 | 999 |
| 13 | 2.17 | 2.24 | 2.33 | 2.46 | 2.61 | 63 | 0 | 0 | 3.048 | 3.218 | 999 |
| 14 | 2.21 | 2.28 | 2.37 | 2.51 | 2.66 | 64 | 0 | 0 | 3.054 | 3.224 | 999 |
| 15 | 2.25 | 2.32 | 2.41 | 2.55 | 2.71 | 65 | 0 | 0 | 3.06 | 3.23 | 999 |
| 16 | 2.28 | 2.35 | 2.44 | 2.59 | 2.75 | 66 | 0 | 0 | 3.066 | 3.236 | 999 |
| 17 | 2.31 | 2.38 | 2.47 | 2.62 | 2.79 | 67 | 0 | 0 | 3.072 | 3.242 | 999 |
| 18 | 2.34 | 2.41 | 2.5 | 2.65 | 2.82 | 68 | 0 | 0 | 3.078 | 3.248 | 999 |
| 19 | 2.36 | 2.44 | 2.53 | 2.68 | 2.85 | 69 | 0 | 0 | 3.084 | 3.254 | 999 |
| 20 | 2.38 | 2.46 | 2.56 | 2.71 | 2.88 | 70 | 0 | 0 | 3.09 | 3.26 | 999 |
| 21 | 0 | 0 | 2.58 | 2.73 | 2.91 | 71 | 0 | 0 | 3.095 | 3.265 | 999 |
| 22 | 0 | 0 | 2.6 | 2.76 | 2.94 | 72 | 0 | 0 | 3.1 | 3.27 | 999 |
| 23 | 0 | 0 | 2.62 | 2.78 | 2.96 | 73 | 0 | 0 | 3.105 | 3.275 | 999 |
| 24 | 0 | 0 | 2.64 | 2.8 | 2.99 | 74 | 0 | 0 | 3.11 | 3.28 | 999 |
| 25 | 0 | 0 | 2.66 | 2.82 | 3.01 | 75 | 0 | 0 | 3.115 | 3.285 | 999 |
| 26 | 0 | 0 | 2.68 | 2.84 | 999 | 76 | 0 | 0 | 3.12 | 3.29 | 999 |
| 27 | 0 | 0 | 2.7 | 2.86 | 999 | 77 | 0 | 0 | 3.125 | 3.295 | 999 |
| 28 | 0 | 0 | 2.72 | 2.88 | 999 | 78 | 0 | 0 | 3.13 | 3.3 | 999 |
| 29 | 0 | 0 | 2.73 | 2.9 | 999 | 79 | 0 | 0 | 3.135 | 3.305 | 999 |
| 30 | 0 | 0 | 2.75 | 2.91 | 999 | 80 | 0 | 0 | 3.14 | 3.31 | 999 |
| 31 | 0 | 0 | 2.76 | 2.93 | 999 | 81 | 0 | 0 | 3.144 | 3.314 | 999 |
| 32 | 0 | 0 | 2.78 | 2.95 | 999 | 82 | 0 | 0 | 3.148 | 3.318 | 999 |
| 33 | 0 | 0 | 2.79 | 2.96 | 999 | 83 | 0 | 0 | 3.152 | 3.322 | 999 |
| 34 | 0 | 0 | 2.81 | 2.97 | 999 | 84 | 0 | 0 | 3.156 | 3.326 | 999 |
| 35 | 0 | 0 | 2.82 | 2.98 | 999 | 85 | 0 | 0 | 3.16 | 3.33 | 999 |
| 36 | 0 | 0 | 2.83 | 2.992 | 999 | 86 | 0 | 0 | 3.164 | 3.334 | 999 |
| 37 | 0 | 0 | 2.84 | 3.004 | 999 | 87 | 0 | 0 | 3.168 | 3.338 | 999 |
| 38 | 0 | 0 | 2.85 | 3.016 | 999 | 88 | 0 | 0 | 3.172 | 3.342 | 999 |
| 39 | 0 | 0 | 2.86 | 3.028 | 999 | 89 | 0 | 0 | 3.176 | 3.346 | 999 |
| 40 | 0 | 0 | 2.87 | 3.04 | 999 | 90 | 0 | 0 | 3.18 | 3.35 | 999 |
| 41 | 0 | 0 | 2.88 | 3.05 | 999 | 91 | 0 | 0 | 3.183 | 3.353 | 999 |
| 42 | 0 | 0 | 2.89 | 3.06 | 999 | 92 | 0 | 0 | 3.186 | 3.356 | 999 |
| 43 | 0 | 0 | 2.9 | 3.07 | 999 | 93 | 0 | 0 | 3.189 | 3.359 | 999 |
| 44 | 0 | 0 | 2.91 | 3.08 | 999 | 94 | 0 | 0 | 3.192 | 3.362 | 999 |
| 45 | 0 | 0 | 2.92 | 3.09 | 999 | 95 | 0 | 0 | 3.195 | 3.365 | 999 |
| 46 | 0 | 0 | 2.928 | 3.098 | 999 | 96 | 0 | 0 | 3.198 | 3.368 | 999 |
| 47 | 0 | 0 | 2.936 | 3.106 | 999 | 97 | 0 | 0 | 3.201 | 3.371 | 999 |
| 48 | 0 | 0 | 2.944 | 3.114 | 999 | 98 | 0 | 0 | 3.204 | 3.374 | 999 |
| 49 | 0 | 0 | 2.952 | 3.122 | 999 | 99 | 0 | 0 | 3.207 | 3.377 | 999 |
| 51 | 0 | 0 | 2.967 | 3.137 | 999 | 100 | 0 | 0 | 3.21 | 3.38 | 999 |
| 52 | 0 | 0 | 2.974 | 3.144 | 999 | | | | | | |

A4. Análisis de Varianza (ANOVA)

Las siguientes Tablas muestran a detalle los resultados obtenidos durante el análisis de varianza realizado. Las Tablas están distribuidas de tal forma que, en cada subapartado, se muestran los análisis tanto para la distribución de partículas como para los parámetros tradicionales medidos, comparando diferidas barreras en cada caso.

A4.1 ANOVA en los puntos fondo (F) y superficie (S)

TABLA A.2. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS PUNTOS FONDO (F) Y SUPERFICIE (S) DE LA DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

| PARÁMETRO ANALIZADO | UNIDADES | PUNTO DE ANÁLISIS | n | PROMEDIO | Σ^2 | GRADOS DE LIBERTAD | F CALCULADA | PROBABILIDAD | F TABLAS | VALIDEZ |
|------------------------|---------------|-------------------|----|----------|------------|--------------------|-------------|--------------|----------|---------------|
| # Partículas | # /mL | Fondo | 20 | 4320133 | 2.5E+12 | 19 | 1.401 | 0.235 | 2.168 | No se Rechaza |
| | | Superficie | 20 | 2331779 | 4.1E+12 | | | | | |
| Diámetro de Partículas | μm | Fondo | 20 | 0.931 | 0.0052 | 19 | 0.660 | 0.813 | 2.168 | No se rechaza |
| | | Superficie | 20 | 1.061 | 0.0183 | | | | | |

TABLA A.3. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS PUNTOS FONDO (F) Y SUPERFICIE (S).

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

| PARÁMETRO ANALIZADO | UNIDADES | PUNTO DE ANÁLISIS | n | PROMEDIO | Σ^2 | GRADOS DE LIBERTAD | F CALCULADA | PROBABILIDAD | F TABLAS | VALIDEZ |
|---------------------------------|------------------|-------------------|----|----------|------------|--------------------|-------------|--------------|----------|---------------|
| Absorbancia UV _{254nm} | cm^{-1} | Fondo | 20 | 0.2587 | 0.0025 | 19 | 6.937 | 4.829E-05 | 2.168 | Se rechaza |
| | | Superficie | 20 | 0.2682 | 0.0030 | | | | | |
| Color Aparente | Pt-Co | Fondo | 20 | 8.9 | 43.3814 | 19 | 38.187 | 2.847E-11 | 2.168 | Se rechaza |
| | | Superficie | 20 | 10.06 | 42.0957 | | | | | |
| Color Verdadero | Pt-Co | Fondo | 20 | 6.59 | 14.4754 | 19 | 10.493 | 1.993E-06 | 2.168 | Se rechaza |
| | | Superficie | 20 | 6.4 | 9.5156 | | | | | |
| Coliformes Totales | UFC | Fondo | 6 | 1.43 | 3.6190 | 4 | 7.667 | 0.0369 | 6.388 | Se rechaza |
| | | Superficie | 6 | 0.67 | 1.0660 | | | | | |
| Carbón Orgánico Total | mg/L | Fondo | 8 | 2.33 | 0.6676 | 7 | 34.941 | 6.336E-05 | 3.787 | Se rechaza |
| | | Superficie | 8 | 2.31 | 0.5823 | | | | | |
| Demanda Química de Oxígeno | mg/L | Fondo | 9 | 2.45 | 0.3091 | 7 | 3.335 | 0.0673 | 3.787 | No se rechaza |
| | | Superficie | 9 | 3.04 | 0.7973 | | | | | |
| pH | - | Fondo | 20 | 7.2 | 0.0984 | 19 | 4.246 | 0.001 | 2.168 | Se rechaza |
| | | Superficie | 20 | 7.22 | 0.1054 | | | | | |
| Sólidos Disueltos Totales | mg/L | Fondo | 20 | 331.47 | 8939.89 | 19 | 20.583 | 6.975E-09 | 2.168 | Se rechaza |
| | | Superficie | 20 | 303.68 | 9165.9 | | | | | |
| Sólidos Suspendidos Totales | mg/L | Fondo | 6 | 0.69 | 0.16 | 4 | 0.258 | 0.891 | 6.388 | No se rechaza |
| | | Superficie | 6 | 1.7 | 0.305 | | | | | |
| Turbiedad | UNT | Fondo | 20 | 8.08 | 13.85 | 19 | 12.933 | 3.629E-07 | 2.168 | Se rechaza |
| | | Superficie | 20 | 8.89 | 4.83 | | | | | |

A4.2 ANOVA en los puntos plata coloidal (PC) y lámpara de luz ultravioleta (UV)

TABLA A.4. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS PUNTOS PLATA COLOIDAL (PC) Y LÁMPARA DE LUZ ULTRAVIOLETA (UV) DE LA DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

| PARÁMETRO ANALIZADO | UNIDADES | PUNTO DE ANÁLISIS | n | PROMEDIO | Σ^2 | GRADOS DE LIBERTAD | F CALCULADA | PROBABILIDAD | F TABLAS | VALIDEZ |
|------------------------|---------------|-------------------|----|----------|------------|--------------------|-------------|--------------|----------|---------------|
| # Partículas | # /mL | PC | 20 | 1921737 | 3.1E+11 | 19 | 1.020 | 0.483 | 2.168 | No se rechaza |
| | | UV | 20 | 2345551 | 3.1E+12 | | | | | |
| Diámetro de Partículas | μm | PC | 20 | 0.904 | 0.0017 | 19 | 1.098 | 0.420 | 2.168 | No se rechaza |
| | | UV | 20 | 0.733 | 0.0001 | | | | | |

TABLA A.5. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS PUNTOS PLATA COLOIDAL (PC) Y LÁMPARA DE LUZ ULTRAVIOLETA (UV).

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

| PARÁMETRO ANALIZADO | UNIDADES | PUNTO DE ANÁLISIS | n | PROMEDIO | Σ^2 | GRADOS DE LIBERTAD | F CALCULADA | PROBABILIDAD | F TABLAS | VALIDEZ |
|---------------------------------|------------------|-------------------|----|----------|------------|--------------------|-------------|--------------|----------|---------------|
| Absorbancia UV _{254nm} | cm ⁻¹ | PC | 20 | 0.1825 | 0.0267 | 19 | 12.85998 | 3.803E-07 | 2.168 | Se rechaza |
| | | UV | 20 | 0.2775 | 0.0322 | | | | | |
| Color Aparente | Pt-Co | PC | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | | UV | - | - | - | | | | | |
| Color Verdadero | Pt-Co | PC | 20 | 4.45 | 14.524 | 19 | 12.85998 | 3.803E-07 | 2.168 | Se rechaza |
| | | UV | 20 | 4.75 | 20.382 | | | | | |
| Coliformes Totales | UFC | PC | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | | UV | - | - | - | | | | | |
| Carbón Orgánico Total | mg/L | PC | 8 | 3.489 | 18.501 | 8 | 2.964 | 7.268E-02 | 3.438 | No se rechaza |
| | | UV | 8 | 1.656 | 2.151 | | | | | |
| Demanda Química de Oxígeno | mg/L | PC | 8 | 0.111 | 0.0479 | 8 | 1.475 | 2.977E-01 | 3.438 | No se rechaza |
| | | UV | 9 | 0.078 | 0.0270 | | | | | |
| pH | - | PC | 19 | 7.250 | 0.1307 | 19 | 5.424 | 2.784E-04 | 2.168 | Se rechaza |
| | | UV | 20 | 7.127 | 0.0895 | | | | | |
| Sólidos Disueltos Totales | mg/L | PC | 20 | 271.327 | 6452.78 | 19 | 7.694 | 2.233E-05 | 2.168 | Se rechaza |
| | | UV | 20 | 294.7825 | 10704.73 | | | | | |
| Sólidos Suspendidos Totales | mg/L | PC | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | | UV | - | - | - | | | | | |
| Turbiedad | UNT | PC | 19 | 4.9945 | 3.165 | 19 | 2.414 | 3.100E-02 | 2.168 | Se rechaza |
| | | UV | 19 | 5.3015 | 3.775 | | | | | |

A4.3 ANOVA en los puntos superficie (S) y lámpara de luz ultravioleta (UV)

TABLA A.6. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS PUNTOS SUPERFICIE (S) Y LÁMPARA DE LUZ ULTRAVIOLETA (UV) DE LA DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

| PARÁMETRO ANALIZADO | UNIDADES | PUNTO DE ANÁLISIS | n | PROMEDIO | Σ^2 | GRADOS DE LIBERTAD | F CALCULADA | PROBABILIDAD | F TABLAS | VALIDEZ |
|------------------------|---------------|-------------------|----|----------|------------|--------------------|-------------|--------------|----------|---------------|
| # Partículas | # /mL | S | 20 | 2331779 | 4.1E+12 | 19 | 0.355 | 0.985 | 2.168 | No se rechaza |
| | | UV | 20 | 2345551 | 3.1E+12 | | | | | |
| Diámetro de Partículas | μm | S | 20 | 1.061 | 0.0183 | 19 | 0.959 | 0.536 | 2.168 | No se rechaza |
| | | UV | 20 | 0.733 | 0.0001 | | | | | |

TABLA A.7. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS PUNTOS SUPERFICIE (S) Y LÁMPARA DE LUZ ULTRAVIOLETA (UV).
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

| PARÁMETRO ANALIZADO | UNIDADES | PUNTO DE ANÁLISIS | n | PROMEDIO | Σ^2 | GRADOS DE LIBERTAD | F CALCULADA | PROBABILIDAD | F TABLAS | VALIDEZ |
|-----------------------------|------------------|-------------------|----|----------|------------|--------------------|-------------|--------------|----------|---------------|
| Absorbancia UV 254nm | cm^{-1} | S | 20 | 0.268 | 0.003 | 19 | 0.618884 | 8.479E-01 | 2.168 | No se rechaza |
| | | UV | 20 | 0.278 | 0.032 | | | | | |
| Color Aparente | Pt-Co | S | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | | UV | - | - | - | | | | | |
| Color Verdadero | Pt-Co | S | 20 | 6.401 | 9.516 | 19 | 0.936 | 5.559E-01 | 2.168 | No se rechaza |
| | | UV | 20 | 4.75 | 20.382 | | | | | |
| Coliformes Totales | UFC | S | - | 0.667 | 1.067 | 4 | 1 | 5.000E-01 | 6.388 | No se rechaza |
| | | UV | - | 0 | 0 | | | | | |
| Carbón Orgánico Total | mg/L | S | 8 | 2.308 | 0.582 | 4 | 2.392 | 2.095E-01 | 6.388 | No se rechaza |
| | | UV | 8 | 1.656 | 2.15 | | | | | |
| Demanda Química de Oxígeno | mg/L | S | 8 | 3.042 | 0.797 | 7 | 0.833 | 5.921E-01 | 3.787 | No se rechaza |
| | | UV | 9 | 0.078 | 0.027 | | | | | |
| pH | | S | 19 | 7.227 | 7.127 | 19 | 1.794 | 1.060E-01 | 2.168 | No se rechaza |
| | | UV | 20 | 0.105 | 0.089 | | | | | |
| Sólidos Disueltos Totales | mg/L | S | 20 | 303.683 | 9165.98 | 19 | 37.664 | 3.226E-11 | 2.168 | Se rechaza |
| | | UV | 20 | 294.783 | 10704.72 | | | | | |
| Sólidos Suspendedos Totales | mg/L | S | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | | UV | - | - | - | | | | | |
| Turbiedad | UNT | S | 19 | 8.892 | 4.825 | 19 | 0.843 | 6.432E-01 | 2.168 | No se rechaza |
| | | UV | 19 | 5.302 | 3.775 | | | | | |

A5. DTP presentada en forma diferencial

A5.1 Análisis diferencial en fondo y superficie

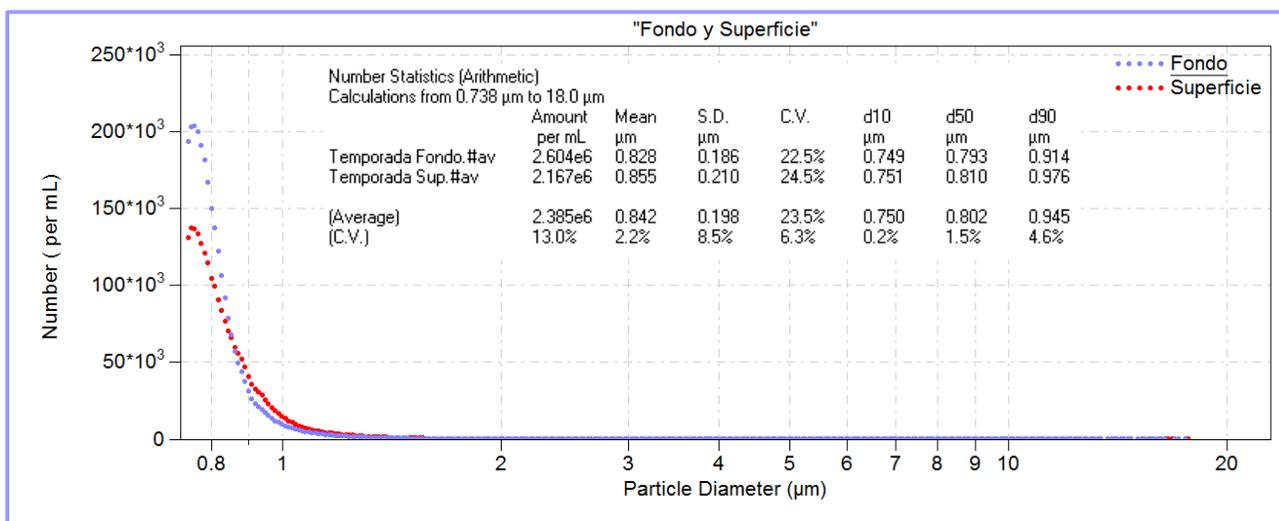


FIGURA 49. ANÁLISIS PROMEDIO DIFERENCIAL EN "F Y S".

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, SOFTWARE MULTISIZER 3, VERSION 3.53, COPYRIGHT © 1990-2008 BECKMAN COULTER, INC.

A5.2 Análisis diferencial en temporada de lluvia 2017-2018

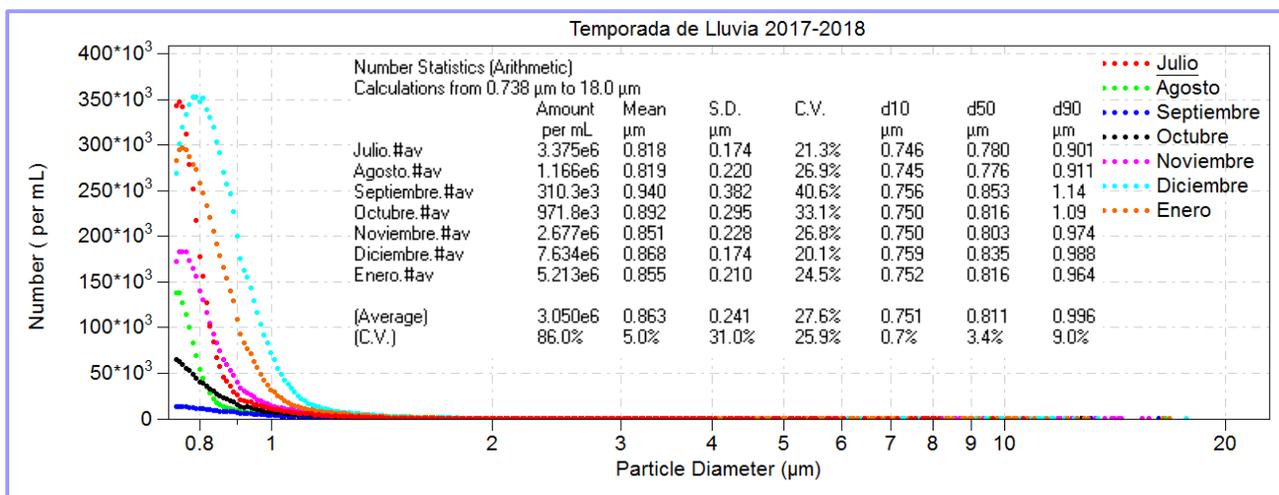


FIGURA 50. ANÁLISIS DIFERENCIAL EN TEMPORADA DE LLUVIA (JULIO 2017- ENERO 2018).

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, SOFTWARE MULTISIZER 3, VERSION 3.53, COPYRIGHT © 1990-2008 BECKMAN COULTER, INC.

A5.3 Análisis diferencial en el sistema de pretratamiento

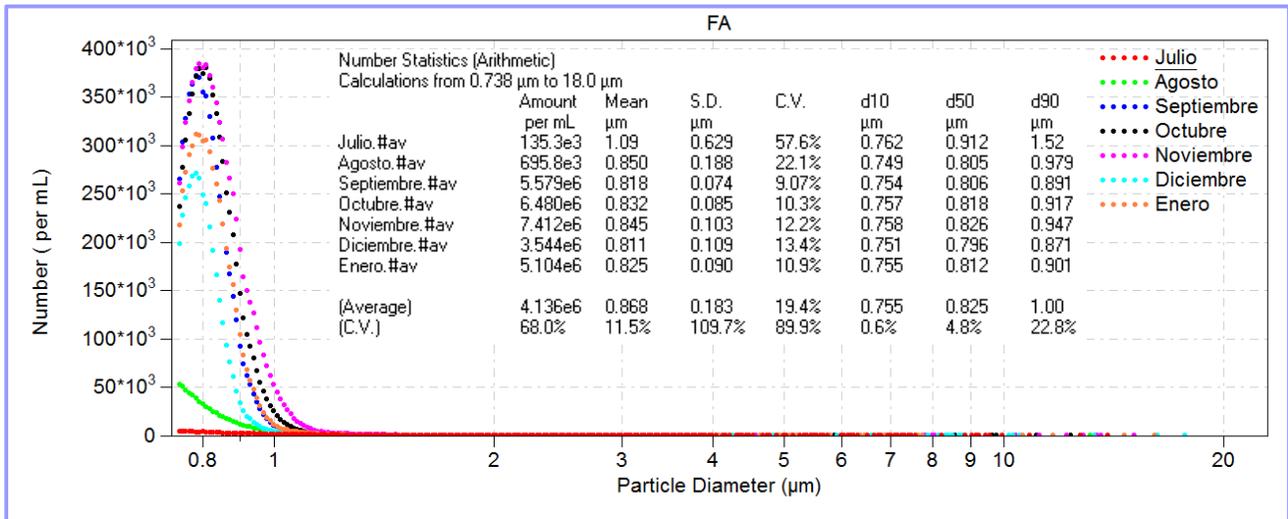


FIGURA 51 ANÁLISIS DIFERENCIAL EN FA.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, SOFTWARE MULTISIZER 3, VERSION 3.53, COPYRIGHT © 1990-2008 BECKMAN COULTER, INC.

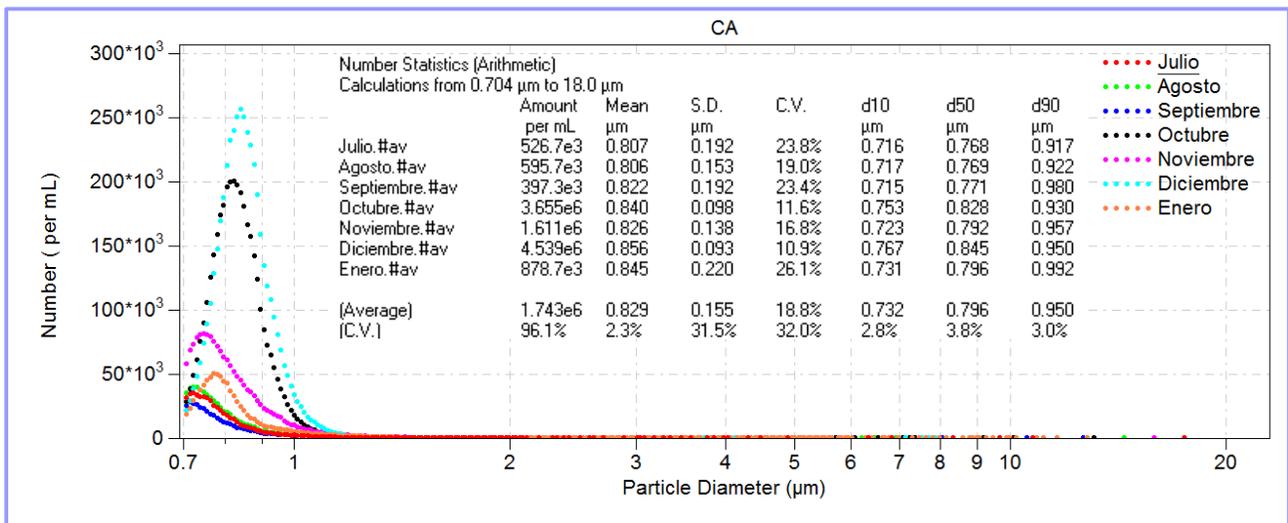


FIGURA 52. ANÁLISIS DIFERENCIAL EN CA.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, SOFTWARE MULTISIZER 3, VERSION 3.53, COPYRIGHT © 1990-2008 BECKMAN COULTER, INC.

A5.4 Análisis diferencial en los sistemas de desinfección

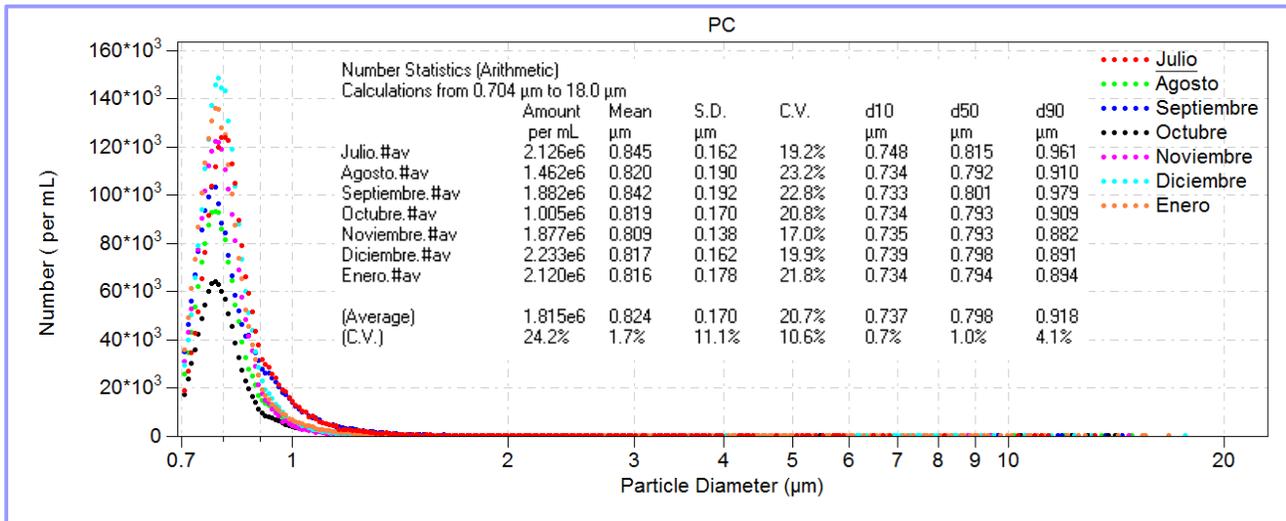


FIGURA 53. ANÁLISIS DIFERENCIAL EN PC.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, SOFTWARE MULTISIZER 3, VERSION 3.53, COPYRIGHT © 1990-2008 BECKMAN COULTER, INC.

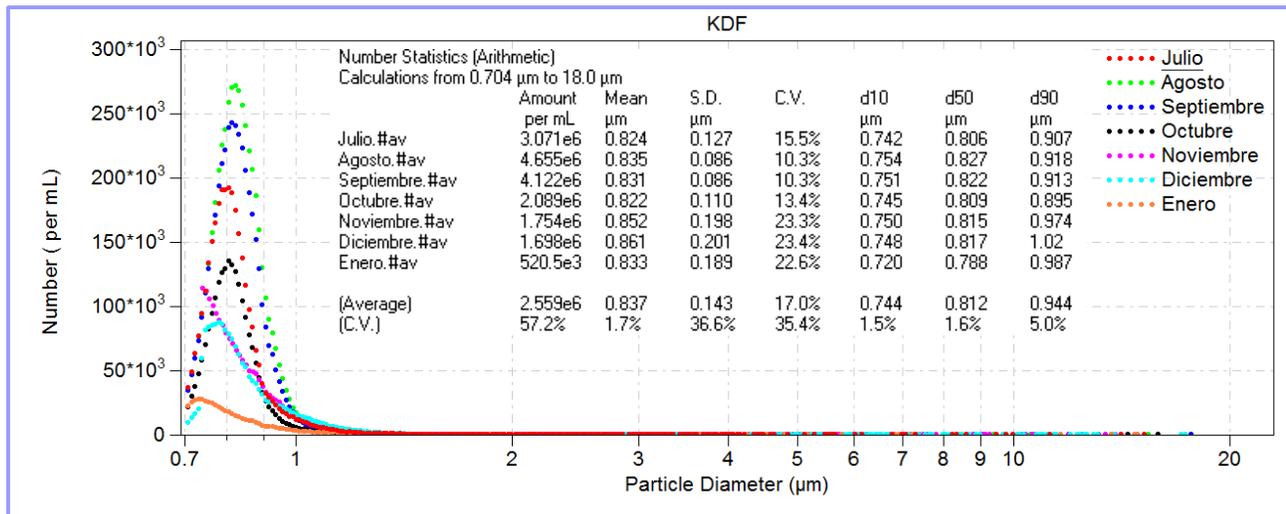


FIGURA 54. ANÁLISIS DIFERENCIAL EN KDF.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, SOFTWARE MULTISIZER 3, VERSION 3.53, COPYRIGHT © 1990-2008 BECKMAN COULTER, INC.

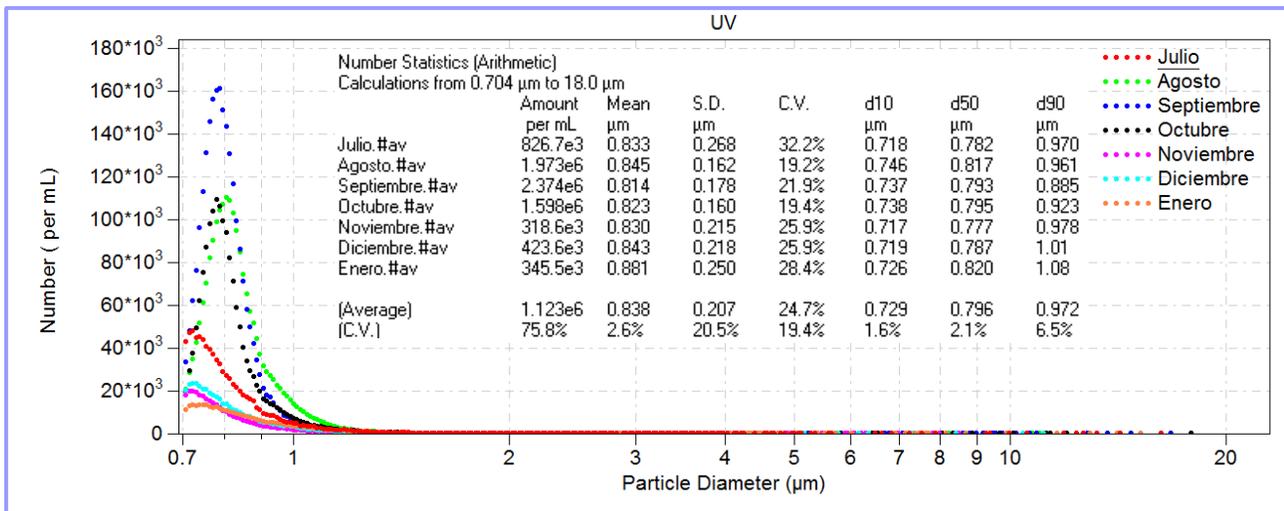


FIGURA 55. ANÁLISIS DIFERENCIAL EN UV.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, SOFTWARE MULTISIZER 3, VERSION 3.53, COPYRIGHT © 1990-2008 BECKMAN COULTER, INC.

A5.5 Análisis diferencial entre el influente y las barreras de potabilización

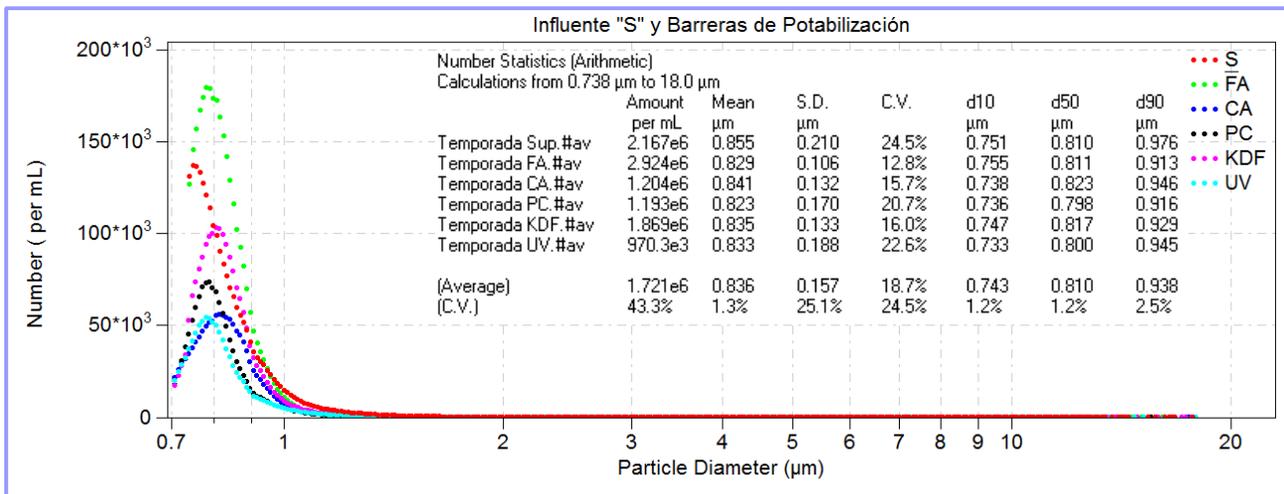


FIGURA 56. ANÁLISIS DIFERENCIAL EN EL INFLUYENTE "S", RESPECTO A LOS EFLUYENTES DE LAS BARRERAS DEL SISTEMA DE POTABILIZACIÓN.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, SOFTWARE MULTISIZER 3, VERSION 3.53, COPYRIGHT © 1990-2008 BECKMAN COULTER, INC.

A6. Variabilidad en los análisis de DTP

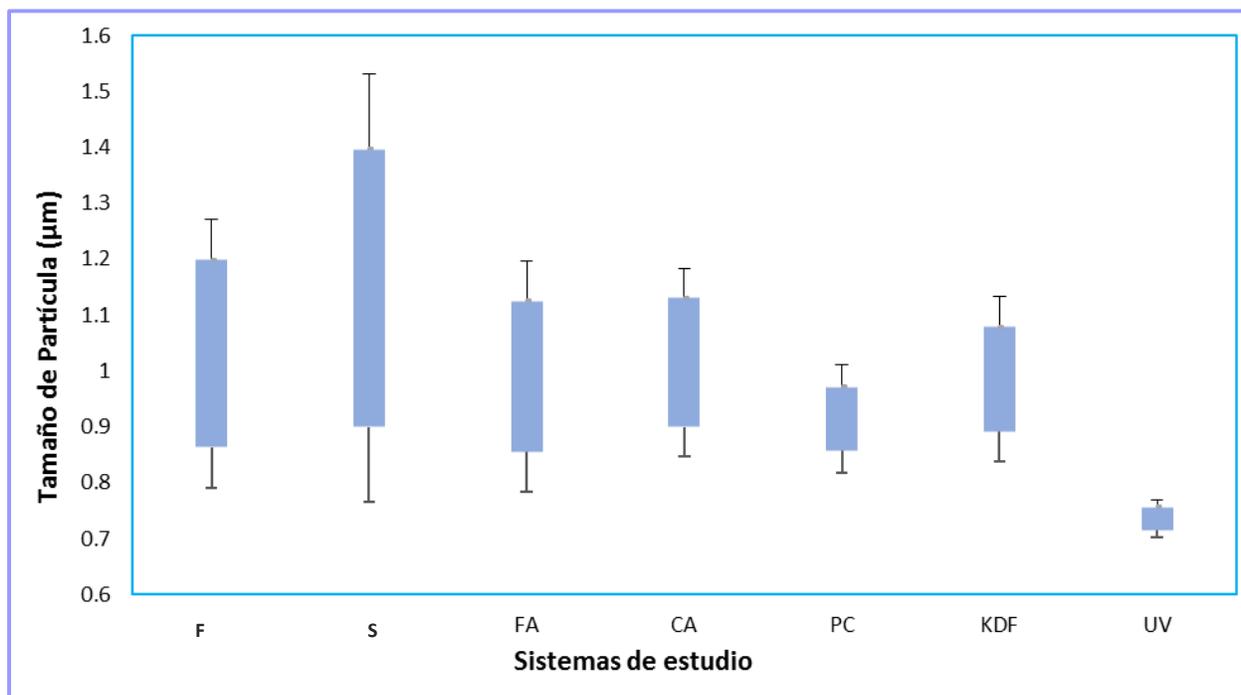


FIGURA 57. VARIABILIDAD DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA EN CADA SISTEMA DE ESTUDIO.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

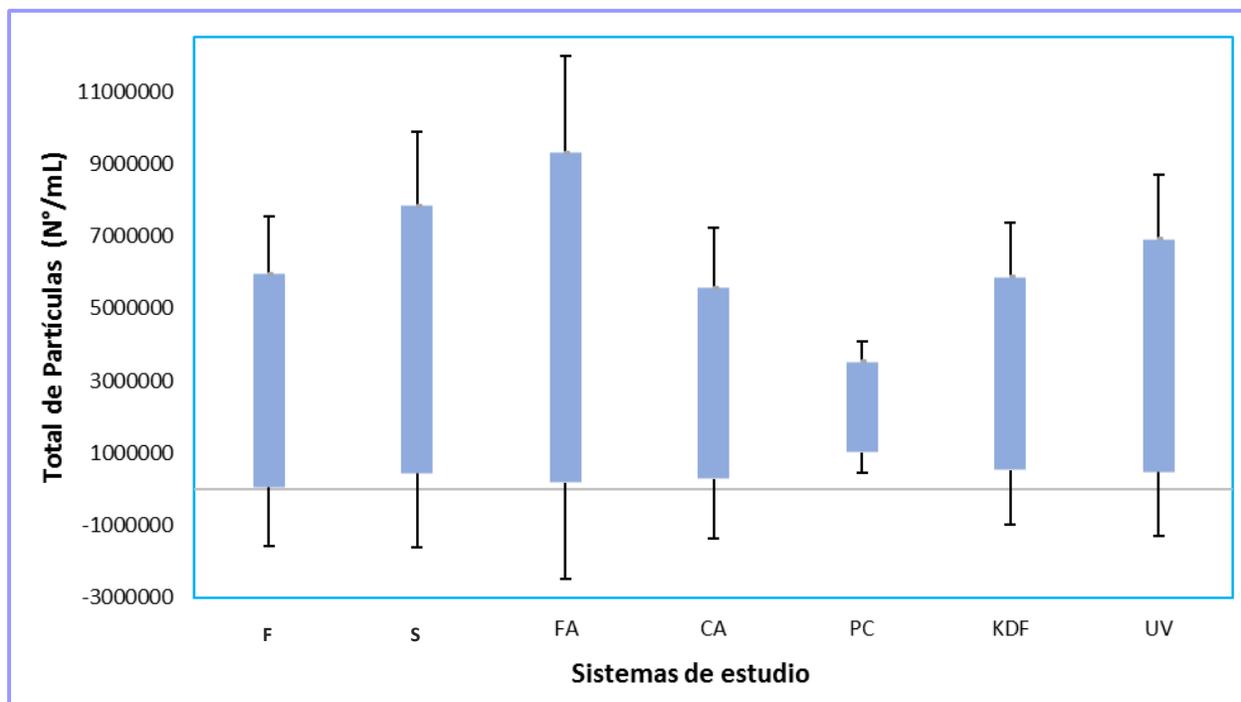


FIGURA 58. VARIABILIDAD DEL NÚMERO DE PARTÍCULAS EN CADA SISTEMA DE ESTUDIO.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.