

TEORÍA Y PRÁCTICA DE LA PURIFICACIÓN DEL AGUA

TOMO II

JORGE ARBOLEDA VALENCIA
IVÁN A. BUITRAGO LEÓN
LUIS A. JARAMILLO GÓMEZ

Arboleda Valencia, Jorge, autor

Teoría y práctica de la purificación del agua. Tomo 2 / Jorge Arboleda Valencia, Iván A.

Buitrago León, Luis A. Jaramillo Gómez. -- Cuarta edición. -- Bogotá : Ecoe Ediciones, 2023.

412 páginas. -- (Ciencias de la tierra, geografía, medioambiente y planificación.

Suministro y tratamiento de aguas)

Incluye datos curriculares de los autores -- Incluye bibliografía.

ISBN 978-958-503-649-9 -- 978-958-503-650-5 (e-book)

1. Purificación del agua 2. Calidad del agua - Control 3. Química del agua I. Buitrago León, Iván A., autor II. Jaramillo Gómez, Luis Alberto, autor

CDD: 628.162 ed. 23

CO-BoBN- a1127010



Área: Ciencias de la tierra, geografía, medioambiente y planificación

Subárea: Suministro y tratamiento de aguas

ECOE
EDICIONES



© Jorge Arboleda Valencia

© Iván A. Buitrago León

© Luis A. Jaramillo Gómez

© Ecoe Ediciones S.A.S.

info@ecoeediciones.com

www.ecoeediciones.com

Carrera 19 # 63 C 32

Teléfono: (+57) 321 226 46 09

Bogotá, Colombia

Primera edición: Bogotá, octubre del 2023

ISBN: 978-958-503-649-9

e-ISBN: 978-958-503-650-5

Directora editorial: Ana María Rueda G.

Coordinadora editorial: Paula Bermúdez B.

Editora de adquisiciones: Alejandra Cely R.

Corrección de estilo: Andrés Caro

Diagramación: Magda Barrero

Carátula: Wilson Marulanda Muñoz

Impresión: Carvajal Soluciones de

Comunicación S.A.S.

Carrera 69 #15-24

*Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio
sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.*

Impreso y hecho en Colombia - Todos los derechos reservados

AGRADECIMIENTOS

Los autores del libro expresan sus más sinceros agradecimientos a todas las personas que participaron en la actualización y ajuste de la información aquí incluida, revisión de fórmulas y renovación de gráficas.

Entre ellos queremos destacar la participación de la diseñadora industrial María Camila Niño que con toda su labor nos ayudó a actualizar las imágenes de las anteriores ediciones y traerlas a las nuevas tecnologías y estándares de dibujo. Al señor John Carlos López por la revisión general del libro, de la formulación química, la nomenclatura empleada. Al ingeniero Andrés Dimas por la revisión técnica de varios conceptos aquí presentados. A la ingeniera Clara María Corzo por su revisión en los temas referentes al diseño de los componentes de las plantas. Y en general a todo el equipo de las firmas WARP SAS y Profit Eng. SAS por su apoyo desinteresado en el desarrollo de gráficas, módulos, esquemas y la actualización de esta nueva edición.

CONTENIDO

CAPITULO 8. TEORÍA DE LA FILTRACIÓN DEL AGUA.....	1
Historia de la filtración.....	3
Mecanismos responsables de la filtración.....	5
Modelos matemáticos de la filtración.....	16
Otros modelos.....	22
Ecuaciones para determinar la pérdida de carga en el lecho filtrante.....	25
Análisis granulométrico de materiales granulares.....	26
Pérdida de carga inicial.....	28
Pérdida de carga final.....	35
Factores que influyen la filtración.....	36
Tipo de medio filtrante.....	36
Velocidad de filtración.....	37
Tipo de suspensión.....	37
Características físicas.....	37
Características químicas.....	38
Influencia de la temperatura.....	40
Dureza del floc.....	42
Acondicionamiento del floc afluente.....	43
Teoría del lavado de medios filtrantes granulares.....	46
CAPÍTULO 9. DISEÑO DE UNIDADES DE FILTRACIÓN.....	69
Filtros rápidos convencionales.....	71
Medio filtrante.....	72
Lechos mixtos con material de diferentes densidades.....	76
Características de los medios filtrantes.....	77
Diseño de los lechos múltiples.....	78

Rayos ultravioleta	266
Calor	266
Desinfectantes químicos.....	266
Desinfección con cloro	267
Reacciones del cloro en el agua.....	269
Reacciones hidrolíticas	270
Reacciones de oxidación-reducción.....	274
Reacciones del cloro con el nitrógeno amoniacal	275
Reacciones del cloro con la materia orgánica y otros compuestos químicos	276
El fenómeno del punto de quiebre	281
Eficiencia de la desinfección con cloro.....	285
Eficiencia de la cloración en la destrucción de bacterias	286
Eficiencia de la cloración en la destrucción de protozoarios.....	288
Eficiencia de la cloración en la destrucción de virus.....	289
Otros desinfectantes químicos.....	291
Yodo.....	291
Bromo.....	292
Plata ionizada	293
Ozono.....	293
Dióxido de cloro	295
Comparación de la actividad germicida de los desinfectantes químicos.....	296
Recrecimiento de bacterias en las tuberías	297
Métodos de aplicaciones del cloro.....	298
Estimación de la dosis de cloro.....	299
El valor CT (Concentración-Tiempo)	300
Bases del parámetro Ct	301
El cloro y los compuestos orgánicos	307
Interferencias en la cloración	311
CAPÍTULO 12. DISEÑO DE ESTACIONES DE CLORACIÓN	315
Capacidad de las estaciones de cloración.....	316
Punto de aplicación del cloro.....	317
Almacenamiento y transporte del cloro gaseoso	318
Medidas de seguridad en el manejo y transporte de cloro	321
Evaporadores.....	322
Sistema de medición y control.....	323
Sistema de inyección.....	327
Difusión y mezcla rápida.....	330
Equipos de protección	332
Toxicidad del cloro	334
Análisis de cloro residual.....	334
Analizador automático de cloro residual	335
Consideraciones prácticas sobre el diseño de salas de cloración.....	339
Diagramas de flujo	348
CAPÍTULO 13. INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA...	349
Instrumentación en Colombia.....	349
Definiciones y alcances en el diseño de sistemas de instrumentación y control	350
Regulación.....	353

Control supervisorio	353
Control de optimización	353
Instrumentos y su clasificación	354
Características de un instrumento	354
Campo de medida (range)	354
Alcance (span)	354
Error	355
Incertidumbre de la medida	355
Exactitud (accuracy)	357
Precisión (precision)	357
Factor de servicio	358
Zona muerta (dead zone)	358
Sensibilidad (sensitivity)	359
Repetibilidad (repeatability)	359
Ruido	359
Histéresis	359
Clasificación en función del instrumento	360
Instrumentos ciegos	360
Instrumentos indicadores	360
Instrumentos registradores	360
Elementos primarios	360
Transmisores	360
Transductores	360
Convertidores	360
Receptores	361
Controladores	361
Elemento final de control	361
Clasificación en función de la variable de proceso	361
Código para identificación de instrumentos	361
Resumen	361
Criterio en la selección de instrumentos	366
Principios de control automático	368
Control previo	369
Control con retroalimentación	369
Control previo contra control con retroalimentación	370
Consideraciones en el diseño de sistemas de instrumentación y control	370
Las condiciones locales	371
Beneficios del sistema	371
Selección del sistema	372
Necesidades del sistema	373
Funciones del sistema de instrumentación y control	373
Disponibilidad del sistema	374
Documentación mínima	374
Entendimiento y compromiso	375
Relación automatización-trabajador	376
¿Por qué diseñar un sistema de instrumentación y control en una PPA?	376
Importancia y ventajas de los sistemas de diseño y control	377
Objetivos en el diseño de un sistema de instrumentación y control	377
Primer objetivo	378

Segundo objetivo	378
Tercer objetivo.....	379
Elaboración del diagrama de flujo del proceso	380
Procesos básicos.....	380
Control de caudal	382
Dosificación de productos químicos y mezcla rápida	383
Instrumentación en la entrada del agua cruda	384
Instrumentación del agua tratada químicamente	385
Instrumentación luego del sedimentador	386
Instrumentación en el efluente de los filtros.....	387
Ajustes finales al agua	388
Introducción al análisis de datos	390
Estadística básica	390
Modelación básica	396
Selección de variables.....	396
Modelación manual o semimanual.....	397
Modelación con software	402
Excel ©	402
Gnuplot ©	403
BIBLIOGRAFÍA.....	407

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPITULO 8. TEORÍA DE LA FILTRACIÓN DEL AGUA

Figura 8.1. Flujo a través de un manto granular	2
Figura 8.2. Diferentes mecanismos que producen transporte de las partículas hasta los granos	7
Figura 8.3. Contacto casual de las partículas con el medio filtrante.....	9
Figura 8.4. Impacto inercial.....	10
Figura 8.5. Distribución por tamaños de las partículas encontradas en el efluente a los filtros en la planta de tratamiento de (EE.UU)	10
Figura 8.6. Acción hidrodinámica	11
Figura 8.7. Eficiencia de remoción de partículas en un filtro debida a fenómenos de sedimentación, intercepción y difusión.....	12
Figura 8.8. Trayectoria de la partícula capturada por las fuerzas de Van der Waals.....	14
Figura 8.9. Esquema explicativo de la acción de los polímeros en un medio granular ..	15
Figura 8.10. Esquema de remoción de un lecho filtrante	18
Figura 8.11. Coeficiente del filtro en función del depósito específico.....	19
Figura 8.12. Porcentaje de remoción de turbiedad en diferentes capas de un lecho filtrante	22
Figura 8.13. Módulo de impedimento λ vs. depósito específico σ	23
Figura 8.14. Efecto de abertura de huecos y grietas en el lecho filtrante según Baylis	23
Figura 8.15. Mecanismos de remoción de partículas en el filtro.....	24

Figura 8.16. Pérdida de carga vs. profundidad del filtro.....	26
Figura 8.17. Determinación de tamaños de medios filtrantes y coeficiente de uniformidad así como tamaño efectivo	28
Figura 8.18. Pérdida de carga final en un lecho filtrante	35
Figura 8.19. Distribución de partículas por tamaños, antes y después de filtrar la suspensión indicada.....	38
Figura 8.20. Potencial Z en el tiempo para diferentes pH a varias profundidades de lecho.....	39
Figura 8.21. Relación entre pH, $P > Z >$ y eficiencia del filtro.....	40
Figura 8.22. Efecto del pH en la turbiedad efluente de un filtro	41
Figura 8.23. Influencia de la temperatura en la longitud de la carrera de filtración.....	41
Figura 8.24. Forma de trabajo de un filtro.....	42
Figura 8.25. Comportamiento del floc en un lecho de arena y antracita	44
Figura 8.26. Influencia de diferentes dosis de polielectrolitos en la pérdida de carga y la turbiedad efluente.....	45
Figura 8.27. Efecto del polielectrolito en la turbiedad efluente durante los cambios súbitos de velocidad de filtración.....	46
Figura 8.28. Tres etapas en el lavado con flujo ascendente de un filtro.....	47
Figura 8.29. Pérdida de carga, profundidad del lecho y porosidad de un lecho filtrante para diferentes velocidades de lavado	48
Figura 8.30. Relación entre el coeficiente n y el NR (basado en la velocidad de sedimentación vS de las partículas).....	50
Figura 8.31. Relación velocidad-porosidad	52
Figura 8.32. Velocidad de fluidificación	52
Figura 8.33. Zonas en las curvas de densidad conjunta vs. velocidad de lavado para materiales de diferente densidad	55
Figura 8.34. Valores de ρ_c para distintas velocidades de lavado.....	56
Figura 8.35. Densidad conjunta vs. velocidad ascendente de lavado para distintas densidades (según Cleasby)	57
Figura 8.36. Densidad	60
Figura 8.37. Diámetro	60
Figura 8.38. Diámetros promedios.....	62
Figura 8.39. Expansión de diferentes medios granulares cuando se lavan con velocidad ascendente de 0,60 m/min a 14C	62
Figura 8.40. Velocidad mínima de fluidificación para partículas de diferentes densidades según la fórmula de Wen y Yu.....	63
Figura 8.41. Expansión de los lechos	67

CAPÍTULO 9. DISEÑO DE UNIDADES DE FILTRACIÓN

Figura 9.1. Esquema de canaletas de lavado de un filtro.....	71
Figura 9.2. Espesores de grava recomendados para filtros.....	76
Figura 9.3. Diferentes tipos de lechos filtrantes.....	78
Figura 9.4. Diferentes tipos de lechos filtrantes.....	81
Figura 9.5. Espesores de los lechos filtrantes mixtos	81
Figura 9.6. Pérdida de carga desarrollada en 20 horas de carrera con una velocidad de filtración de 2 mm/s	82
Figura 9.7. Longitud de las carreras y porcentajes de remoción FASE 1.....	87
Figura 9.8. Longitud de carrera de filtración y porcentajes de remoción. FASE 2.....	87
Figura 9.9. Productividad para distintos valores de la relación l/d y distintas velocidades de filtración 500 y 400m ³ /m ² /d.....	87
Figura 9.10. Porcentaje de agua usada para diferentes carreras de filtración	89
Figura 9.11. Producción de agua para diferentes carreras y ratas de filtración, para 8 min de lavado a 0,75 m/min.....	90
Figura 9.12. Distribución de la pérdida de carga en lechos de arena y antracita	91
Figura 9.13. Variación de la distribución de pérdida de carga con la velocidad de filtración	92
Figura 9.14. Presiones en el corte transversal de un lecho filtrante	92
Figura 9.15. Obstrucción por aire de un filtro	94
Figura 9.16. Contracción del lecho filtrante y formación de bolas de barro debidas a un lavado deficiente	95
Figura 9.17. Falso fondo con malla (1913)	95
Figura 9.18. Iniciación de un chorro de arena en el lavado de un filtro rápido	96
Figura 9.19. Brazos rotatorios para lavado superficial.....	99
Figura 9.20. Sistema de lavado superficial fijo	99
Figura 9.21. Sistema de lavado con aire	100
Figura 9.22. Lavado superficial en la planta del distrito sur de Chicago.....	100
Figura 9.23. Lavado de un filtro con el flujo de las otras unidades.....	105
Figura 9.24. Sistema de recolección del agua de lavado.....	106
Figura 9.25. Diferentes secciones de canaletas de lavado	107
Figura 9.26. Láminas de agua en una canaleta.....	108
Figura 9.27. Ejemplo de cálculo	108
Figura 9.28. Principal y laterales	110
Figura 9.29. Fondo de tubería con bloques Wagner.....	111
Figura 9.30. Sistema de tuberías y boquillas	112
Figura 9.31. Fondo Weeler (losas)	113
Figura 9.32. Fondo Weeler (puede observarse el desgaste de las bolas por uso prolongado)	113
Figura 9.33. Fondo Leopold.....	114

Figura 10.3. Pulsaciones en controladores de caudal	209
Figura 10.4. Muestras para la determinación de turbiedad del agua de lavado.....	211
Figura 10.5. Duración del lavado	212
Figura 10.6. Sistemas para medir la expansión de la arena durante el lavado	214
Figura 10.7. Perfil de grava	215
Figura 10.8. Datos de topografía de la grava en un filtro.....	216
Figura 10.9. Topografía de un lecho de grava de la Planta de Tratamiento A.....	216
Figura 10.10. Aparato muestreador de arena.....	217
Figura 10.11. Ejemplo de análisis granulométrico de una arena de un filtro.....	218
Figura 10.12. Ejemplo de análisis granulométrico de un medio filtrante.....	219
Figura 10.13. Obtención de bolas de lodo.....	220
Figura 10.14. Aparato para medir la dureza de un material	224
Figura 10.15. Control del proceso de filtración.....	225
Figura 10.16. Variación de ID, I en un turbidímetro de Jackson	227
Figura 10.17. Turbidímetro Hellige.....	228
Figura 10.18. Luz sumergida.....	229
Figura 10.19. Turbidímetro fotoeléctrico de diseminación	230
Figura 10.20. Turbidímetro digital.....	230
Figura 10.21. Turbidímetro de diseminación superficial.....	232
Figura 10.22. Comparación entre escalas de turbidímetros	232
Figura 10.23. Correlación entre turbiedad promedio del agua filtrada y casos de hepatitis en los Estados Unidos (II).....	233
Figura 10.24. Paso de virus y floc en un filtro de arena y antracita.....	234
Figura 10.25. Esquema de un contador Coulter.....	236
Figura 10.26. Correlación entre el índice de partículas, número de partículas de 2-5 mm	237
Figura 10.27. Solubilidad del Al+++ a distintos pH y distintas temperaturas	239
Figura 10.28. Rata de flujo para diferentes gastos producidos por un filtro experimental cilíndrico de 10 y 15 cm de diámetro	242
Figura 10.29. Esquema de filtros pilotos (vista frontal)	244
Figura 10.30. Esquema de filtros pilotos (vista lateral)	245
Figura 10.31. Reguladores de control para filtros pilotos	247
Figura 10.32. Diferentes maneras de extraer muestras de agua a diferentes niveles del lecho filtrante.....	248
Figura 10.33. Conexión de piezómetro	249
Figura 10.34. Control del proceso de filtración	251
Figura 10.35. Filtros experimentales montados en la galería de operación de la planta de tratamiento de El Pórtico, Cúcuta, Colombia	252
Figura 10.36. Teoría y práctica de la purificación del agua	254

CAPÍTULO 11. TEORÍA DE LA DESINFECCIÓN DEL AGUA

Figura 11.1.	Tamaños comparados de microflóculos, bacterias y virus.....	258
Figura 11.2.	Porcentaje de remoción de bacterias de un agua coagulada y sedimentada	259
Figura 11.3.	Remoción de virus T4 producida por la coagulación y floculación del agua.....	260
Figura 11.4.	Efecto de la rata de filtración en la remoción de virus de polio I en arena limpia, gruesa y fina (sin coagulantes)	261
Figura 11.5.	Remoción de virus con ayudante de coagulación y sin esta en filtros de arena y antracita. Dosis de sulfato de aluminio 10mg/l, turbiedad del agua cruda 40, rata de filtración 350m ³ /m ² /d	261
Figura 11.6.	Representación gráfica de la ley de Chick	263
Figura 11.7.	Relación entre concentración y tiempo en que el ácido hipocloroso (HOCl) destruye diferentes microorganismos a 0-6°C	265
Figura 11.8.	Supervivencia de E. Coli y S. Tifosa a diferentes pH.....	266
Figura 11.9.	Relación pH-tiempo para la destrucción del 99 % de virus de polio a 25°C	267
Figura 11.10.	Viscosidad del Cloro líquido y gaseoso a diversas temperaturas	269
Figura 11.11.	Densidad del cloro líquido para distintas temperaturas.....	269
Figura 11.12.	Solubilidad del cloro en el agua a distintas temperaturas.....	270
Figura 11.13.	Porcentaje de HOCl y OCl ⁻ para distintos valores del pH.....	272
Figura 11.14.	Proporciones de cloro molecular y ácido hipocloroso en distintas soluciones de cloro a 25°C	273
Figura 11.15.	Representación simplificada del átomo de cloro	274
Figura 11.16.	Distribución de mono y dicloramina para diferentes pH.....	276
Figura 11.17.	Teoría y práctica de la purificación del agua	277
Figura 11.18.	Forma como se ejerce la demanda de cloro a través del tiempo para agua cruda del Lago de St Clair (E.U.).....	277
Figura 11.19.	Crecimiento de los trihalometanos (THMS) con el tiempo en la Planta de filtración de Diemer (1989) según (Arboleda, 2000). Obsérvese que los THMS crecen de manera similar a como lo hace la demanda.....	280
Figura 11.20.	Curva de punto de quiebre para distintas concentraciones de nitrógeno orgánico y amoniacal	282
Figura 11.21.	Relación teórica cloro-nitrógeno en la curva de punto de quiebre.....	283
Figura 11.22.	Variaciones de la curva de punto de quiebre para los tiempos de contacto indicados. Planta de ablandamiento de St. Louis Country, EE.UU.	284
Figura 11.23.	Curvas de punto de quiebre para distintas concentraciones de V en el agua.....	285
Figura 11.24.	Propiedades bactericidas del cloro libre y las cloraminas.....	287
Figura 11.25.	Relación entre concentración y tiempo para destruir el 99% de E. Coli a 2-6°C.....	288

Figura 11.26. Concentración del cloro libre necesario para matar el 99,99 % de los quistes de <i>E. histolítica</i> y de <i>E. Coli</i> , T=2-5°C.	288
Figura 11.27. Relación entre concentración y tiempo en que el ácido hipocloroso (HOCl) destruye diferentes microorganismos a 0-6 °C	290
Figura 11.28. Distribución de I ₂ y HOI a 20°C y a los pH indicados	291
Figura 11.29. Relación concentración-tiempo para destruir el 99,9 % de los microorganismos con I ₂ y HOI a 18°C.....	292
Figura 11.30. Generación de ozono.....	294
Figura 11.31. Aplicación de dióxido de cloro.....	295
Figura 11.32. Diferentes compuestos de cloro que se forman según el tiempo y la relación cloro-nitrógeno.....	298
Figura 11.33. Variación con el pH y la temperatura de los valores de K para la destrucción de coliformes con cloro libre.....	302
Figura 11.34. Determinación de la dosis de cloro	304
Figura 11.35. Definición de algunas denominaciones de los trihalometanos	308
Figura 11.36. Olor incipiente del fenol colocado.....	313

CAPÍTULO 12. DISEÑO DE ESTACIONES DE CLORACIÓN

Figura 12.1. Tamaños de cilindros para cloro gaseoso	319
Figura 12.2. Carrotanque fijo con coraza protectora	320
Figura 12.3. Sistema de conexión de cilindros de cloro (esquema)	321
Figura 12.4. Tanques.....	322
Figura 12.5. Cámara del tanque.....	322
Figura 12.6. Tanque remolcable.....	323
Figura 12.7. Esquema de instalación de un evaporador	323
Figura 12.8. Esquema de un aplicador de cloro a presión.....	325
Figura 12.9. Esquema de un aplicador de cloro al vacío.....	325
Figura 12.10. Dispositivos de control del flujo de cloro	327
Figura 12.11. Inyector de cloro	327
Figura 12.12. Sistemas de difusores.....	330
Figura 12.13. Diseño de estaciones de cloración	331
Figura 12.14. Estación de cloración.....	331
Figura 12.15. Sistema de cloración con clorador al vacío.....	331
Figura 12.16. Sistema de cloración con evaporador y eyector remoto	333
Figura 12.17. Operación manual del clorador (sistema de control I).....	337
Figura 12.18. Operación manual del clorador con analizador automático de cloro y alarmas (sistema de control II).....	337
Figura 12.19. Cloración con circuito abierto (sistema de control III)	338
Figura 12.20. Cloración con circuito cerrado (sistema de control IV).....	338
Figura 12.21. Cloración con circuito compuesto (sistema de control V).....	339

Figura 12.22. Disposición de una sala de cloración	343
Figura 12.23. Ancho de una sala de cloración	344
Figura 12.24. Sistema de ventilación forzada de una sala de cloración	345
Figura 12.25. Sistema de inyección de cloro en tubos y canales abiertos.....	346
Figura 12.26. Esquema de flujo de una estación de cloración con evaporadores e inyectores remotos con tres puntos de aplicación en tubos	347

CAPÍTULO 13. INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA

Figura 13.1. Lazo cerrado vs lazo abierto	352
Figura 13.2. Instrumento multiparamétrico para medición de calidad del agua.....	354
Figura 13.3. Representación gráfica de precisión, exactitud e incertidumbre.....	358
Figura 13.4. Ejemplo de arquitectura de diseño	375
Figura 13.5. Imagen de software de instrumentos para plantas de tratamiento de agua potable	377
Figura 13.6. Pirámide CIM.....	380
Figura 13.7. Procesos básicos de una PPA.....	381
Figura 13.8. Instrumentación para el control del caudal de la PPA.....	383
Figura 13.9. Instrumentación para la dosificación de productos químicos.....	384
Figura 13.10. Instrumentación para el control del agua cruda de la PPA	385
Figura 13.11. Instrumentación del agua tratada químicamente.....	386
Figura 13.12. Instrumentación en el efluente del sedimentador (opcional).....	386
Figura 13.13. Instrumentación en el efluente de los filtros	387
Figura 13.14. Instrumentación final y diagrama completo	388
Figura 13.15. Sistema de Purificación de Agua para el Guamo.....	389
Figura 13.16. Ejemplo de una distribución bimodal.....	392
Figura 13.17. Histograma segunda tabla de frecuencias	396
Figura 13.18. Representación de la linealización de la ecuación 1.....	399
Figura 13.19. Representación de la linealización de la ecuación 2.....	399
Figura 13.20. Representación de la linealización de la ecuación 3.....	400
Figura 13.21. Representación de la linealización de la ecuación 7.....	401
Figura 13.22. Representación de la linealización de la ecuación 8.....	401
Figura 13.23. Representación de la linealización de la ecuación 9.....	402
Figura 13.24. Comparación modelo vs. resultados experimentales.....	404