

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS E INGENIERIA
MAESTRIA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERIA



“Proceso de depuración de agua urbana e industrial pre-tratada
mediante adsorción de iones metálicos por un sistema
de filtración – suspensión con sílice amorfa”.

Tesis

Que para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

Presenta

Ql. Oscar Gustavo Miranda Sandoval



Introducción	1
1. Objetivo General	2
1.1 Objetivos Específicos	2
2. Justificación	5
3. Hipótesis	8
4. Evaluación de Impactos	9
4.1 Económico	10
4.2 Social	11
4.3 Ambiental	13
4.4 Científico	14
5. Marco Teorico	16
5.1 Regeneración de aguas residuales urbanas depuradas	16
5.2 Necesidad de la regeneración de aguas residuales	17
5.3 Contaminantes en el agua residual urbana y la regeneración.	18
5.3.1 Composición característica del agua residual urbana	19
5.4 Contaminantes en el agua residual industrial y la regeneración.	21
5.5 Usos del agua residual urbana regenerada y normativa correspondiente	28
5.5.1 Marco Normativo y avances de tratamiento de aguas residuales en México	31
5.5.2 Ejemplos de usos ambientales de regeneración	33
5.6 Tecnologías de regeneración de aguas residuales urbanas	34
5.6.1 Tratamientos de regeneración de aguas: Naturales	35
5.6.2 Tratamientos de regeneración de aguas residuales intensivos	37
5.6.3 Tecnologías de regeneración de aguas residuales de desinfección	39
5.6.4 Tecnologías de regeneración de aguas residuales de membrana	41
5.6.4.1 Filtración	43
5.6.4.1.1 Tipos de filtros	44
5.6.4.1.1.1 Filtración con papel	45
5.6.4.1.1.2 Filtración con membrana	45
5.6.4.1.1.3 Filtración por vacío o por presión	46
5.7 Integración de sistemas tecnológicos para la regeneración de aguas residuales	46
5.7.1 Integración de sistemas de tratamientos por etapas seriadas	47
5.7.2 Acoplamiento de sistemas tecnológicos de tratamiento en un solo paso (efecto sinérgico)	49



5.8. Metales y la química metalúrgica	53
5.8.1 Litosfera	54
5.8.2 Elementos - Equilibrio Ecológico	55
5.8.3 Metales pesados	59
5.8.3.1 Principales fuentes de emisión y generación	60
5.8.4 Contaminación del agua por metales	62
5.8.4.1 Contaminación del agua por metales pesados: plomo, mercurio y cadmio	65
5.8.4.1.1 Plomo	65
5.8.4.1.2 Mercurio	67
5.8.4.1.3 Cadmio	71
5.8.5 Equilibrio químico - Estabilidad de compuestos metálicos	72
5.8.5.1 Principio de Le Chatelier- Concentración	73
5.8.5.2 Producto de solubilidad – Kps	75
5.8.5.3 Cambios de temperatura	78
5.8.5.4 Cambios de volumen y presión	79
5.8.6 Relevancia en México	80
 5.9 Toxicidad y Dosis Letal Media (DL50)	 81
5.9.1 Categorías de toxicidad y clasificación de la toxicidad	82
5.9.2 Relación dosis-respuesta	83
5.9.3 Toxicología ambiental	84
5.9.4 Indicadores de toxicología	85
 5.10. Interacciones electrostáticas	 86
5.10.1 Electronegatividad	87
5.10.2 Momento Dipolar	89
5.10.3 Tipos de fuerzas intermoleculares	90
5.10.4 Interacciones entre Dipolos	92
5.10.5 Fuerzas ion – dipolo	93
5.10.6 Fuerzas de Dispersión	95
5.10.7 Resumen de las interacciones electrostáticas	97
5.10.8 Enlaces de Hidrógeno	97
5.10.9 Radio Iónico	99
5.10.10 Adsorción - Interacciones electroestáticas	100
5.10.10.1 Tipos de adsorción	101
5.10.10.2 Factores que influyen en la adsorción e intercambio iónicos	102



6. Desarrollo Experimental	104
6.1 Desarrollo pre- experimental del sistema sinérgico seleccionado	104
6.2 Objetivo fijado por el tratamiento regenerador	104
6.3 Selección y descripción del sistema de tratamiento sinérgico: Filtración – Retención	105
6.3.1 Estudio del sistema de filtración – retención	105
6.3.1.1 Subsistema de Filtración	106
6.3.1.2 Sílice como un material de filtración	106
6.3.1.2.1 Estado amorfo	112
6.3.1.2.2 Antecedentes de la sílice micro - amorfa en la planta geotérmica de cerro prieto	113
6.3.1.2.3 Central Geotérmica de Mexicali.	119
6.3.1.2.3.1 Proceso	121
6.3.1.2.3.2 Sílice Residual	124
6.4 Diseño del sistema experimental de tratamiento de aguas residuales urbanas	125
6.4.1 Componentes básicos del sistema de regeneración	126
6.4.1.1 Contención y homogenización del agua muestra	128
6.4.1.2 Bomba eléctrica y sistema de mangueras	129
6.4.1.4 Filtro de retención	129
6.4.1.5 Otros componentes	130
6.4.2 Diseño de modelos experimentales	130
6.4.2.1 Columna Empacada	131
6.4.2.2 Retención vía Soxhlet	132
6.4.2.3 Embudo abierto	134
6.4.2.4 Suspensión de sílice micro amorfa – Retención	135
6.5 Selección y descripción del agua a tratar	137
6.6 Identificación de variables a controlar en la experimentación	138
6.6.1 Factores experimentales: Constantes	139
6.6.2 Factores experimentales: Variables	141
6.7 Medición de parámetros en muestras reales	142
6.7.1 Caracterización general de la muestra	143
6.7.2 Caracterización del tratamiento vía partículas – sólidos	144
6.7.3 Caracterización del tratamiento vía: Carga Metálica	148
6.7.3.1 Determinación de metales por absorción atómica	151
6.7.3.1.1 Toma de muestra y preservación	151
6.7.3.1.2 Retratamiento de las muestras	152
6.7.3.1.3 Digestión preliminar para metales	153
6.7.3.1.4 Procedimiento: Digestión Ácida - HNO ₃	154
6.7.3.1.5 Principio de la Espectrofotometría de Absorción atómica	155
6.7.3.1.6 Componentes del espectrofotómetro de absorción atómica	155
6.7.3.1.7 Interferencias	155



6.7.3.1.8 Corrección de respaldo	156
6.7.3.1.9 Control de calidad	156
6.7.3.1.10 Operación del equipo - Términos generales	157
6.7.4 Comportamiento de la carga orgánica – inorgánica	159
6.8 Estudio cinético de eliminación de carga metálica	162
6.9 Pretratamiento de la sílice micro-amorfa	163
6.9.1 Toma de muestras en la planta geotérmica de Cerro Prieto en Mexicali	164
6.9.2 Purificación de la sílice micro – amorfa	166
6.9.3 Regeneración del material filtrante.	169
7. Metodología experimental	170
7.1 Presentación de metodologías pre- experimentales: Caracterización de la materia prima	170
7.1.1 Determinación de la densidad sólida	171
7.1.2 Determinación de la humedad	172
7.1.3 Determinación de la carga metálica	173
7.1.4 Determinación de la retención hídrica máxima	174
7.1.5 Determinación de tamaño de partícula	175
7.1.6 Estudio Cualitativo por espectrofotometría infrarrojo	177
7.2 Metodología experimental: Descripción de componentes del tratamiento regenerador	179
7.3 Materiales a emplear en cada ensayo experimental	182
7.4 Reactivos a emplear en cada ensayo experimental	183
7.5 Equipo a emplear en cada ensayo experimental	184
7.6 Descripción del procedimiento experimental	184
7.6.1 Diagrama de flujo del procedimiento experimental para el tratamiento de muestras preparadas y reales	188
7.6.2 Secuencia de muestreo en cada uno de los ensayos experimentales	189
7.6.3 Relación de análisis a realizar por número de muestra y volumen a tomar, en experimentaciones realizadas con agua real	189
7.6.4 Planeación de los ensayos experimentales	190
7.6.5 Ensayos experimentales con variable controlada: Muestra sintética	190



8. Resultados	191
8.1 Caracterización de la sílice micro amorfa	191
8.1.1 Determinación de densidad sólida	191
8.1.2 Porcentaje de humedad	191
8.1.3 Determinación de impureza por medio de extracción metálica	192
8.1.4 Determinación Retención hídrica	192
8.1.5 Estimación del tamaño de partícula	193
8.1.6 Espectroscopia Infrarroja	193
8.2 Presentación de Resultados experimentales: Tratamiento regenerador	196
8.2.1 Experimento #1 Filtración con 10 g sílice amorfa a un pH 2	196
8.2.2 Experimento #2 Filtración con 10 g sílice amorfa a un pH 10.6	197
8.2.3 Experimento #3 Filtración con 10 g sílice amorfa a un pH 6.5	198
8.2.4 Experimento #4 Filtración con 7 g sílice amorfa a un pH 6.5	199
8.2.5 Experimento #5 Suspensión con 10 g sílice amorfa a un pH 6.5	200
8.2.6 Experimento #6 Filtración + Suspensión con 10 g sílice amorfa a un pH 6.5	201
8.2.7 Experimento #7 Filtración + Suspensión con 10 g sílice amorfa a un pH 6.5	202
8.2.8 Presentación de resultados correspondientes a la experimentación con agua industrial	204
8.2.8.1 Caracterización general – solida de muestras obtenidas durante el tratamiento del efluente de una empresa galvanizadora	204
8.2.8.2 Caracterización metálica de muestras obtenidas durante el tratamiento del efluente de una empresa galvanizadora	205
8.2.8.2.1 Tratamiento de agua industrial / Zinc	207
8.2.8.2.2 Tratamiento de agua industrial / Cobre	207
8.2.8.2.3 Tratamiento de agua industrial / Níquel	208
8.2.8.3 Caracterización de cargas orgánicas e inorgánicas de muestras obtenidas durante el tratamiento del efluente de una empresa galvanizadora	208
8.2.8.3.1 Tratamiento de agua industrial / Determinación de demanda química de oxígeno (DQO)	209
8.2.8.3.2 Tratamiento de agua industrial / Determinación de sílice disuelta	210
8.9 Tratamiento de datos experimentales	211
8.9.1 Tratamiento de resultados correspondientes a la primera parte experimental: Fase con muestras sintéticas	
8.9.2 Tratamiento de resultados correspondientes a la segunda parte experimental: Fase con muestras reales	216



9. Interpretación de resultados	218
10. Discusión de Resultados	238
11. Conclusión	243
12. Perspectiva a futuro	251
Referencias	254



INDICE ANEXO 1 REFERENTE A TABLAS

<i>Tabla 5.1 Composición típica de aguas residuales domesticas no tratados</i>	20
<i>Tabla 5.2 Emisoras directas de contaminantes en agua clasificados por su actividad</i>	26
<i>Tabla 5.3 Limites Máximos Permisibles para metales pesados y cianuros NOM-001-SEMARNAT-1996</i>	32
<i>Tabla 5.4 Posible integración de sistemas sinérgicos</i>	51
<i>Tabla 5.5 Comparación de sistemas: seriados / integrados</i>	52
<i>Tabla 5.6 Relación elemento químico - utilización industrial</i>	53
<i>Tabla 5.7 Distribución porcentual de elementos en la litosfera</i>	54
<i>Tabla 5.8 Elementos esenciales para las plantas</i>	56
<i>Tabla 5.9 "Formas químicas de los metales en el suelo y su disponibilidad relativa para las plantas</i>	57
<i>Tabla 5.10 Límites Máximos Permisibles de la NOM-002-SEMARNAT-1996</i>	64
<i>Tabla 5.11 Relación de compuesto – biomagnificación</i>	70
<i>Tabla 5.12 Productos de solubilidad de diversas sales</i>	76
<i>Tabla 5.13 Momentos Dipolares de algunas moléculas simples</i>	88
<i>Tabla 5.14 Relación de los distintos tipos de interacciones y el carácter atractivo o repulsivo</i>	97
<i>Tabla 6.1. Análisis del sistema de tratamiento</i>	127
<i>Tabla 6.2 Características principales de los componentes de contención y homogenización de la muestra</i>	128
<i>Tabla 6.3. Identificación y clasificación de condiciones experimentales</i>	139
<i>Tabla 6.4 Descripción del parámetro: pH / Método 4500-H+.B Standard Methods of wastewater</i>	144
<i>Tabla 6.5 Descripción del parámetro: Turbidez / Método 2130-Turbidity Standard Methods of wastewater</i>	145
<i>Tabla 6.6 Descripción del parámetro: Solidos Suspendidos Totales / Método 2540-TSS. D Standard Methods of wastewater</i>	146
<i>TABLA 6.7 Descripción del parámetro: Solidos Disueltos Totales / Método 2540-TDS. C Standard Methods of wastewater</i>	147
<i>Tabla 6.8 Aspectos tomados en cuenta para la selección de la metodología de análisis</i>	148
<i>Tabla 6.9 Tecnologías de análisis para la determinación de metales</i>	149
<i>Tabla 6.10 Digestión acida de muestras acuosas</i>	153
<i>Tabla 6.11 Volúmenes ideales de muestra a digerir.</i>	153
<i>Tabla 6.12 Descripción del parámetro: Carga metálica/ Métodos de parte 3000 Estándar d Methods of wastewater</i>	158
<i>Tabla 6.13 Descripción del parámetro: Demanda Química de Oxígeno/ Método 5200-COD. D Standard Methods of wastewater</i>	160



Tabla 6.14 Descripción del parámetro: Sílice Disuelta / Método 4500-Si. D Standard Methods of wastewater	161
Tabla 7.1 Localización de bandas de absorción en la región 4000- 400 cm ⁻¹	178
Tabla 7.2 Características de la bomba eléctrica empleada para la experimentación	180
Tabla 7.3 Materiales empleados durante la etapa experimental	182
Tabla 7.4 Relación de reactivos - uso dentro de los ensayos experimentales	183
Tabla 7.5 Relación de equipo - uso durante los ensayos experimentales	184
Tabla 7.6 Identificación y clasificación de condiciones experimentales	184
Tabla 7.7 Secuencia de muestreo por experimento	189
Tabla 7.8 Relación de análisis a realizar por número de muestra y volumen a tomar, en experimentaciones realizadas con agua real	189
Tabla 7.9 Sesiones experimentales.	190
Tabla 7.10 Descripción de fase experimental I.	
Tratamiento de agua preparada con estándares metálicos	190
Tabla 8.1 Resultados para la determinación de la densidad sólida de la sílice micro amorfa	191
Tabla 8.2 Determinación del porcentaje de humedad para una muestra de sílice micro amorfa correspondiente al pozo C22	191
Tabla 8.3 Factores controlados de la extracción metálica	192
Tabla. 8.4 Resultados Cualitativos y Cuantitativos de la extracción de sílice micro-amorfa	192
Tabla 8.5 Determinación de retención hídrico para sílice micro amorfa	192
Tabla 8.6 Determinación del tamaño de partícula de sílice micro amorfa extraída de la planta geotérmica de cerro prieto pozo C22	193
Tabla 8.7 Relación de constantes cinéticas obtenidas experimentalmente con respecto a las variables controladas en el ensayo #1	196
Tabla 8.8 Relación de constantes cinéticas obtenidas experimentalmente con respecto a las variables controladas en el ensayo #2.	197
Tabla 8.9 Relación de constantes cinéticas obtenidas experimentalmente con respecto a las variables controladas en el ensayo #3	198
Tabla 8.10 Relación de constantes cinéticas obtenidas experimentalmente con respecto a las variables controladas en el ensayo #4	199
Tabla 8.11 Relación de constantes cinéticas obtenidas experimentalmente con respecto a las variables controladas en el ensayo #5	200
Tabla 8.12 Relación de constantes cinéticas obtenidas experimentalmente con respecto a las variables controladas en el ensayo #6	201
Tabla 8.13 Relación de constantes cinéticas obtenidas experimentalmente con respecto a las variables controladas en el ensayo #7	202



<i>Tabla 8.14 Concentrado de datos experimentales en ensayos con soluciones estándar</i>	203
<i>Tabla 8.15 Resultados obtenidos de pH a lo largo de etapa experimental con agua real</i>	204
<i>Tabla 8.16 Resultados obtenidos de turbidez a lo largo de etapa experimental con agua real</i>	204
<i>Tabla 8.17 Resultados de los sólidos suspendidos de muestras a través del tiempo durante el periodo operacional</i>	205
<i>Tabla 8.18 Resultados de los sólidos suspendidos de muestras a través del tiempo durante el periodo post – operacional</i>	205
<i>Tabla 8.19 Resultado de los sólidos disueltos de muestras a través del tiempo durante el periodo operacional</i>	205
<i>Tabla 8.20 Tabla de resultados para muestras tomadas en una empresa galvanizadora</i>	206
<i>Tabla 8.21 Relación absorbancia – concentración</i>	209
<i>Tabla 8.22 Resultados expresados en miligramos por litro de demanda química de oxígeno en las muestras industriales provenientes de una galvanizadora.</i>	209
<i>Tabla 8.23 Relación absorbancia – concentración</i>	210
<i>Tabla 8.24 Resultados expresados en miligramos por litro de sílice disuelta en las muestras industriales provenientes de una galvanizadora.</i>	210
<i>Tabla 8.25 Porcentaje másico de remoción de carga metálica en experimento 1</i>	211
<i>Tabla 8.26 Porcentaje másico de remoción de carga metálica en experimento 2</i>	212
<i>Tabla 8.27 Porcentaje másico de remoción de carga metálica en experimento 3</i>	212
<i>Tabla 8.28 Porcentaje másico de remoción de carga metálica en experimento 4</i>	213
<i>Tabla 8.29 Porcentaje másico de remoción de carga metálica en experimento 5</i>	213
<i>Tabla 8.30 Porcentaje másico de remoción de carga metálica en experimento 6</i>	214
<i>Tabla 8.31 Porcentaje másico de remoción de carga metálica en experimento 7</i>	214
<i>Tabla 8.32 Relación de constantes cinéticas obtenidas experimentalmente con respecto a las variables controladas</i>	216
<i>Tabla 8.32.a Relación de los experimentos realizados con respecto a las variables controladas</i>	216
<i>Tabla 8.33 Porcentajes de remoción de contenido metálico en efluente industrial.</i>	217
<i>Tabla 9.1 Comparación: Constantes - porcentajes de remoción.</i>	226



INDICE ANEXO 1 REFERENTE A IMÁGENES Y GRAFICOS

<i>Imagen 5.1 Comparación del número de compañías con sistemas certificados en diferentes países en 2006</i>	23
<i>Imagen 5.2. Factores que promueven la reutilización del agua</i>	28
<i>Imagen 5.3 Aprovechamiento de efluente regenerado</i>	30
<i>Imagen 5.4 Filtración acorde al tamaño de partícula</i>	45
<i>Imagen 5.5 Tipos de tratamientos requeridos acorde a la finalidad de aplicación del agua a tratar.</i>	47
<i>Imagen 5.6 Ciclo de exposición: Cadmio</i>	58
<i>Imagen 5.7 Evolución histórica de los niveles de contaminación por Plomo en depósitos de hielo</i>	59
<i>Imagen 5.8 Derrame de sulfato de cobre en Sonora.</i>	61
<i>Imagen 5.9 Contaminación en Bahía de Minamata</i>	68
<i>Imagen 5.10 Precipitación de Plomo en medio acuoso</i>	76
<i>Imagen 5.11 "Curva Dosis – respuesta</i>	83
<i>Imagen 5.12 Clasificación de electronegatividad de Pauling</i>	88
<i>Imagen 5.13 Distorsión de la nube electrónica entre átomos con diferente electronegatividad</i>	90
<i>Imagen 5.14 Clasificación de fuerzas intermoleculares</i>	90
<i>Imagen 5.15 Tipos de fuerzas intermoleculares</i>	91
<i>Imagen 5.16 Relación entre la atracción - repulsión molecular con respecto a la energía de interacción</i>	92
<i>Imagen 5.17 Interacción ion - dipolo para un catión y un anión</i>	95
<i>Imagen 5.18 Representación del enlace de hidrogeno a nivel molecular</i>	98
<i>Imagen 5.19 Comparación en tamaño de radios iónicos de un anión y un catión</i>	100
<i>Imagen 6.1 Estructura molecular (tetraédrica) de la sílice y su respectiva distribución electrónica en los enlaces Silicio – oxígeno</i>	108
<i>Imagen 6.2 Diferencia entre estructura amorfa y cristalina de la sílice</i>	112
<i>Imagen 6.3 Parámetros estructurales en silicio amorfo y cristalino</i>	112
<i>Imagen 6.4 "Ubicación geográfica de la planta geotérmica de Cerro prieto</i>	121
<i>Imágenes 6.5 y 6.6 Sistema de extracción de vapor seco</i>	122
<i>Imágenes 6.7 y 6.8 Vista del silenciador y Salidas del Separador (A , B)</i>	122
<i>Imágenes 6.9 – 6.13 Residuos silíceo depositado en: a) canaletas, b) Laguna de Evaporación, d) Laguna de Inyección y e) Laguna con residuo de sílice y sales.</i>	123
<i>Imagen 6.14. Salida del vapor a través de ducto en la planta Geotérmica</i>	123
<i>Imagen 6.15 Plan de fase experimental etapa de filtrado</i>	127
<i>Imagen 6.16 Extracción con Soxhlet</i>	133



<i>Imagen 6.17 Sistema de retención: Acoplado a equipo soxhlet</i>	134
<i>Imagen 6.18 Suspensión de 10 gramos de sílice micro amorfa para llevar a cabo el tratamiento de muestras acuosas.</i>	136
<i>Imágenes 6.19 – 6.21 Residuos silícico depositado en: a) canaletas, b y c) Conductos a Lagunas de evaporación</i>	165
<i>Diagrama de flujo 9.1 Procedimiento llevado a cabo para la purificación de sílice micro amorfa</i>	168
<i>Diagrama de flujo 9.2 Procedimiento llevado a cabo para la purificación de sílice micro amorfa en imágenes</i>	168
<i>Imagen 7.1 Componentes básicos del sistema de remoción de metales</i>	179
<i>Imagen 7.2 Sistema de Tratamiento</i>	185
<i>Imagen 7.3 Diagrama de flujo del procedimiento experimental para el tratamiento de muestras preparadas y reales</i>	188
<i>Imagen 8.1 Espectro Infrarrojo de Sílice Micro Amorfa Residual</i>	194
<i>Imagen 8.2 Espectro Infrarrojo de Sílice Micro Amorfa Purificada</i>	195
<i>Imagen 8.3 Comportamiento de la carga metálica en el experimento 1 a pH 2</i>	196
<i>Grafica 8.4 Comportamiento de la carga metálica en el experimento 2</i>	197
<i>Grafico 8.5 Comportamiento de la carga metálica en el experimento 3 a pH 7</i>	198
<i>Grafico 8.6 Comportamiento de la carga metálica en el experimento 4 a pH 7.0 con variación en la materia prima empleada</i>	199
<i>Grafico 8.7 Comportamiento de la carga metálica en el experimento 5 suspensión a pH = 7</i>	200
<i>Grafico 8.8 Comportamiento de la carga metálica en el experimento 6 a pH 7 suspensión + filtro con base plástica</i>	201
<i>Grafico 8.9 Comportamiento de la carga metálica en el experimento 7 a pH 7 / Tratamiento sinérgico</i>	202
<i>Grafico 8.10 Resultados de turbidez obtenidos en el tratamiento de agua de una planta galvanizadora</i>	204
<i>Gráfico 8.11 Comportamiento de la carga metálica para muestras tomadas en una empresa galvanizadora con un sistema de filtración - suspensión a un pH de 7.21</i>	206
<i>Grafico 8.12 Remoción de carga de zinc en relación a tiempo de tratamiento en escala lineal</i>	207
<i>Grafico 8.13 Remoción de carga de cobre en relación a tiempo de tratamiento en escala lineal</i>	207
<i>Grafico 8.14 Remoción de carga de níquel en relación a tiempo de tratamiento en escala lineal</i>	208
<i>Grafico 8.15 Curva de calibración para DQO en agua. Método 5200-COD. D Standard Methods of wastewater</i>	209
<i>Grafico 8.16 Curva de calibración para silica en agua. Método 4500-Si. D Standard Methods of wastewater</i>	210
<i>Gráfico 8.17 Porcentaje másico de remoción de carga metálica en el experimento 1</i>	211
<i>Grafico 8.18 Porcentaje másico de remoción de carga metálica en experimento 2</i>	212



<i>Grafico 8.19 Porcentaje másico de remoción de carga metálica en el experimento 3</i>	213
<i>Grafico 8.20 Porcentaje másico de remoción de carga metálica en el experimento 4</i>	213
<i>Grafico 8.21 Porcentaje másico de remoción de carga metálica en experimento 5</i>	214
<i>Grafico 8.22 Porcentaje másico de remoción de carga metálica en experimento 6.</i>	214
<i>Grafico 8.23 Porcentaje másico de remoción de carga metálica en el experimento 7.</i>	215
<i>Grafico 8.24 Porcentajes de remoción de contenido metálico en efluente industrial.</i>	217
<i>Imagen 10.1 Interacciones macro y micro moleculares</i>	238
<i>Imagen 10.2 Vista Macromolecular de Sílice Amorfa</i>	239
<i>Imagen 10.3 Interacción ion – dipolo</i>	240
<i>Imagen 10.4 Intercambio Iónico entre sílice amorfa - iones metálicos en muestras acuosas</i>	242



Introducción

Hoy en día la demanda de los recursos hídricos es cada vez mayor, sin embargo, las fuentes naturales resultan insuficientes para satisfacer las crecientes necesidades urbanas, industriales y medioambientales, por lo que se hace necesaria la búsqueda de soluciones que permitan la descontaminación eficiente de aguas para su posible reutilización en diversas actividades.

Es por eso que en los últimos años se ha enfocado especial atención en la regeneración de aguas residuales urbanas e industriales mediante múltiples tratamientos de diversas naturalezas que logran un significativo aumento de la calidad de la misma, con lo que se posibilita el empleo del agua producto en diversas actividades.

Por lo que es importante remarcar que dicha regeneración depende de ciertos factores como lo son la calidad del afluente, el tiempo de operación, coste operativo, espacio empleado por los sistemas de tratamiento y los contaminantes que se desean eliminar acorde a la futura aplicación del agua.

Por dichas razones la regeneración de aguas residuales se complica a medida que la exigencia con respecto a la calidad del agua producto incrementa. Es por eso que el empleo de sistemas individualizados o por operaciones independientes en muchos casos no es capaz de lograr alcanzar las expectativas de calidad formuladas o bien resultan ser procesos difícilmente rentables desde el punto de vista operacional y económico.

En función a lo anterior actualmente se busca la integración sinérgica de procesos regeneradores de aguas residuales urbanas e industriales, es decir encontrar la integración adecuada de mecanismos tratadores que logren un efecto conjunto de eliminación de contaminantes metálicos, mayor a los obtenidos por tecnologías que empleen los mismos mecanismos de depuración de forma individual.

Por lo tanto, dentro del siguiente trabajo se llevará a cabo el estudio de la integración de los mecanismos de retención y filtración selectiva para la regeneración de aguas residuales industriales en sistemas operacionales de un solo paso.



1. Objetivo.

Llevar a cabo el estudio de los factores que favorecen en mayor proporción la integración de procesos de retención y de filtración selectiva para la regeneración de aguas residuales industriales depuradas en sistemas operacionales de un solo paso. Para lograr obtener un proceso robusto, rentable, eficaz y eficiente capaz de eliminar notoriamente la carga metálica de un efluente.

1.1. Objetivos Específicos.

Dentro de esta sección es fundamental remarcar las principales metas propuestas a alcanzar dentro de este trabajo. Es importante tener en cuenta que el progreso y la relación de los objetivos propuestos están conformados por:

- Objetivos específicos Independientes
- Objetivos específicos dependientes

Es decir que los objetivos pueden o no seguir el patrón de una metodología con desarrollo seriado. En donde los primeros citados pueden llevarse su estudio por separado, ya que, a diferencia de los primeros objetivos, las metas dependientes propuestas van de la mano o bien llevan un progreso consecutivo - seriado.

Por ejemplo, la evaluación del sistema de filtración a diferentes variables como lo pueden ser el pH o tamaño de partícula empleado para el filtro pueden llevarse simultáneamente o bien por etapas separadas, por lo que se habla de los primeros objetivos citados anteriormente.

Por otra parte, la toma de materia prima y su estudio, así como también la generación de diseños experimentales siempre estarán seriadas con sus correspondientes objetivos específicos dependientes.



A continuación, se presentan y detallan los objetivos específicos que conforman el siguiente trabajo investigativo:

- Colección de materia prima para los filtros: Se tiene presente que se hace necesario el reconocimiento e identificación de la fuente de materia prima, en este caso nos encontramos hablando de la planta geotérmica de Cerro Prieto en Mexicali Baja California.
- Estudio e identificación de las propiedades de la Sílice Micro - Amorfa como materia prima: Una vez que se realizó el estudio de campo de donde se obtendrá la materia prima se hace necesario llevar acabo procesos de purificación y estudio de la sílice micro amorfa para tenerlos presentes a la hora de realizar la interpretación de resultados.
- Caracterización del agua de efluente a tratar: Con el objetivo de descartar de la lista de factores variables la composición o carga contaminante del agua, se requiere seleccionar una sola locación para la toma de muestras del agua a tratar. La caracterización del agua efluente producto de muestras sintéticamente preparadas en laboratorio, así como también una muestra procedente de un proceso de tratamiento de agua industrial poseen una variabilidad mínima puesto que se habla de un proceso robusto previamente estabilizado.
- Generación de diseño experimental de filtración: Una vez purificada la sílice micro amorfa se prosigue con el diseño del sistema de tratamiento basado en la generación de filtros empacados. Dentro de este punto es importante hacer ver que se destacan diferentes variables las cuales afectan directamente en velocidad de filtrado, tiempos de retención etc. Por lo que se generaran apartar de aquí numerosos prototipos de tratamiento a probar para concretar la fase experimental.
- Etapa experimental I / Estudio de remoción de contaminantes vía filtración: Evaluación en base a diferentes análisis de la capacidad que posee el material filtrante para la eliminación de la carga metálica. Es importante mencionar que esta fase experimental se lleva a cabo con agua sintética.



- Etapa experimental II / Estudio de la regeneración de agua vía filtración a cambio de variables: Dentro de este objetivo se realizarán cambios relacionados al pH y la cantidad de materia prima empleada por experimentación para apreciar cuales son los factores que pueden llegar a favorecer en mayor proporción el sistema. Es importante mencionar que esta fase experimental se lleva a cabo de igual manera con agua sintética.
- Etapa experimental III / Estudio de la remoción de contaminantes vía FIL-RET: El principal enfoque de esta sección experimental consiste en determinar la mayor eficiencia sinérgica en el sistema de filtración. Es importante mencionar que esta fase experimental se lleva a cabo con agua real de un proceso de depurado
- Etapa del estudio de rentabilidad, ventajas y desventajas: Evaluación de la efectividad y eficiencia del sistema propuesto dentro de este trabajo relacionado dichas métricas de desempeño con las áreas de impacto económico, social, tecnológico y ambiental.
- Vista a futuro del proyecto desarrollado: Sección en donde se enfoca especial atención en mejorar o bien adaptar el sistema FIL-RET, con el objetivo de abrir una nueva área de estudio enfocada a la unión de sistemas de tratamiento a fin de buscar un efecto sinérgico.



2. Justificación.

Primeramente, resulta fundamental prestar atención a las condiciones, caracterización y naturaleza del tipo de aguas sobre el cual este trabajo se enfoca. La eliminación de la carga metálica presente en disolución en el efluente de una planta tratadora de agua residual urbana o industrial es crucial para el desarrollo sustentable o el ciudad del equilibrio entre la población y el ecosistema; acorde a recientes investigaciones "existe un una porción significativa de carga metálica que es fuente de contaminación directa para fuentes alimenticias ya que una porción significativa de los metales en disolución son asimilados por vegetales en cultivo y por animales de ganado¹".

Hay que hacer hincapié en que los valores de dosis media letal (LD50) son distintos acorde a la toxicidad del metal en cuestión. Siendo la LD50 para metales con alto grado de toxicidad un valor muy bajo (mg/Kg) y viceversa para cationes metálicos de menor toxicidad.

Por dichas razones es también importante mencionar que la depuración de aguas residuales urbanas se lleva en su mayoría en la localidad de la región por medio de un tratamiento secundario biológico de lodos activados lo que se encuentra enfocado a reducir la carga orgánica biodegradable; o por otra parte las plantas tratadoras de aguas industriales se encuentran en su mayorías basadas en tratamientos primarios basados en la floculación – coagulación de los contenidos, es por eso que se destaca que dentro de los tratamientos anteriormente descritos no se tiene contemplado ningún proceso operativo que reduzca de manera significativa la concentración de metales disueltos en el afluente a tratar.

Una de las principales razones por las cuales sucede lo mencionado radica en el costo de inversión y de operación; ya que la concentración de iones metálicos para afluentes domésticos no es muy elevada y la tendencia usualmente es de no rebasar los valores permisibles, sin embargo cabe destacar que las concentraciones metálicas contenidas en el efluente limitan en gran medida la reutilización de dicho recurso, ya que la calidad de un efluente es el factor que señala la rentabilidad de empleo dependiendo de la actividad en cuestión (aplicación final del agua depurada).

¹ Mejía, Cecilia Metales Pesados en Suelos y plantas, Contaminación y Fitotoxicidad. Universidad Nacional Jose Faustino Sánchez Carrión. 2011 Recuperado el día: 11/04/15
URL:<http://es.scribd.com/doc/204360496/METALES-PESADOS-EN-SUELOS-Y-PLANTAS-CONTAMINACION-Y-FITOTOXICIDAD#scribd>



Por otra parte, hay que destacar que en mucho de los casos los afluentes urbanos se mezclan con corrientes industriales debido a la falta de control en descargas por lo que existen casos en donde se presentan afluentes (que en teoría su carga metálica es mínima por su origen domestico) que llegan a una planta tratadora de agua urbanas puedan poseer una cantidad considerable de metales; dependiendo de la procedencia industrial d la corriente.

A modo de reflexión se destaca que la NOM-001-1996-SEMARNAT y la NOM-002-1996-SEMARNAT regula la cantidad metálica permisible a descargar por diferentes tipos de empresas: galvanizadoras, pinturas, alimentos etc. Sin embargo, a pesar de que las empresas se encuentren por debajo de los limites estipulados la sumatoria másica de las cantidades parciales vertidas puede reflejar concentraciones considerables o bien toxicas para el medio ambiente.

Por dicha razón dentro de este trabajo se propone la remoción metálica mediante una operación sencilla, rápida y económica; empleando como medio filtrante y de retención catonice la sílice micro- amorfa obtenida como un residuo industrial en el proceso geotérmico de la planta de Cerro Prieto, Mexicali, siguiendo el objetivo de obtener un agua regenerada como producto del sistema propuesto en esta investigación.

La variación de aplicaciones para la sílice amorfa es muy amplia en la actualidad con lo que la cantidad de invenciones y patentes para dicha materia prima es considerablemente alta, dentro de las aplicaciones más relevantes se encuentra el empleo de la sílice amorfa para generar películas de envasado (solicitud ES19980921191T 19980514), la composición dentífrica mejorada a base de sílice amorfa (solicitud MX 197050168955 19750509), el empleo de la sílice amorfa dispersa como estabilizante de aceite en agua para composición liquida para la piel (Solicitud ES19960905551T 19960220).

Se extiende en la complementación de otros productos como lo son cosméticos [US19950403619 19950314], composiciones orales [ES19960918686T19960610]; sin embargo son pocas las patentes que estipulan el uso de dicha materia prima para la remoción de algún contaminante, una de las cuales se trata de la invención de Nishi Shugo y Tokunaga Tatsuya quienes en la patente ES20040744065T 20040729 estipulan el empleo de partículas de sílice amorfa para efectuar la absorción de benceno.



De igual manera se identificó únicamente 2 documentos relevantes o bien directamente relacionados con métodos para regenerar agua por medio del empleo de sílice micro amorfa, cabe destacar que la búsqueda engloba 244 documentos de patentes, solicitudes de patente y modelos de utilidad recuperados, además de literatura no relacionada con patentes.

Cabe destacar a su vez que se usaron las siguientes bases de datos: ESPACENET, PATENTSCOPE, USPTO Y SIGA. En relación a las patentes citadas anteriormente enlistadas como relevantes se encuentra un dispositivo de purificación de agua potable el cual contiene una celda solar y un sistema de almacenamiento de carga eléctrica cuyo número de patente es US20110084023A1.

Sin embargo, es fundamental destacar que el tratamiento del agua para este dispositivo está basado en forzar el paso del agua por medio de una bomba cargada con la celda solar a través de una membrana semipermeable, semejándose así a un sistema de osmosis. Siendo la sílice micro amorfa empleada como materia prima para elaborar las películas de la celda solar del dispositivo y no como un medio de retención de contaminantes metálicos contenidos en el agua.

Por otra parte, la segunda patente relevante tiene como número de solicitud WO1995028353A1; y establece un proceso de purificación de agua mediante el paso de agua mineral a través de una capa de material amorfo y una capa de sílice amorfa.

En este caso si se trata de una patente que considera al material silíceo como una alternativa viable para la remoción de contaminantes, sin embargo, existen diferencias significativas que hay que hacer notar; puesto que el objetivo de este procedimiento es generar agua potable partiendo de agua mineral, no señalando de regeneración de aguas residuales industriales o bien urbanas.

Se trata pues de un sistema que es eficiente para efluentes con bajas concentraciones contaminantes, en específico se trata de un procedimiento destinado a la eliminación de sólidos suspendidos. Basando la purificación del agua en la remoción de contaminantes por oclusión por tamaño de partícula, no tratándose de una retención de iones metálicos en la superficie de la sílice amorfa. Otro aspecto que es importante hacer notar es que no se menciona un procedimiento en donde se emplee una suspensión del material silíceo para la regeneración de efluentes.



3. Hipótesis.

La orientación investigativa de todo proyecto depende directamente de la estimación de resultados en base a las variables dependientes e independientes que influyen de manera directa o indirecta en el progreso del proyecto, así como también es crucial entrar generar una idea globalizada de los posibles problemas a enfrentar durante la etapa experimental. Por dichas razones resulta fundamental analizar detenidamente

La suma de toda esta evaluación y estimaciones permite tener una clara idea de cuál será la tendencia de los resultados a obtener. Como primer punto en donde se tiene que enfocar los esfuerzos experimentales se encuentra la factibilidad de emplear la sílice micro - amorfa como medio filtrante debido a que se caracteriza por ser un material con un tamaño de partícula muy pequeño aumentando de esta forma la compresibilidad y con ello la porosidad disponible para que el agua fluya a través del material, este factor influye directamente en la velocidad de filtrado.

Hay que destacar que, aunque se pretende tener un tiempo de residencia o de exposición entre el medio filtrante y el contaminante, se requiere un caudal de tratamiento (volumen de agua por unidad de tiempo) considerable para que resulte ser un proceso operacional rentable.

Por otra parte, cabe destacar que una de las propiedades más significativas de la sílice micro amorfa consiste en un alto valor de área superficial el cual influencia directamente en su capacidad de intercambio catiónico o adsorción, por lo tanto, se espera que la retención de metales se efectúe rápidamente al entrar en contacto los contaminantes metálicos con la materia prima empleada.

Con lo que se obtendrá una importante reducción en la velocidad de regeneración con respecto al tiempo de exposición y la eficiencia de remoción de especies metálicas.

Es importante mencionar que la propuesta de tratamiento se basa en un sistema de filtración adaptado para obtener una operación sinérgica entre mecanismos de filtración (obstrucción por diferencial de tamaño) y retención (basado en el acoplamiento químico catiónico del material filtrante y el contaminante).

Ahora bien, se destaca que durante la etapa experimental se espera que un claro efecto de sinergia se haga presente, mediante el cual se alcance un punto de inflexión donde la interrelación entre los mecanismos de tratamiento permitirá



que la remoción de la carga metálica en un 30 %, en un periodo de 1hr para un volumen de 2 a 4 L. Es importante destacar que dicho procedimiento sustenta su rentabilidad en la reutilización de un residuo industrial y los bajos costos de operación lo que representara un claro panorama de la factibilidad de emplear el sistema FIL-RET para generar un agua producto con la calidad deseada.

4. Evaluación de impactos.

Las evaluaciones de impacto representan un instrumento básico para la toma de decisiones, cabe destacar que la interrelación de diferentes áreas sobre las cuales se desarrollara el trabajo permite establecer un margen de condiciones bajo las cuales es posible estipular, la rentabilidad, factibilidad, efectividad. Por lo tanto, las diferentes áreas de criterio bajo las cuales se realiza dicho análisis son:

- Económico
- Social
- Ambiental
- Científico

Cabe destacar que todos estos puntos anteriormente citados mantienen una estrecha relación y deben de mantenerse equilibrados para así hacer rentable el desarrollo del proyecto; por lo que de estas áreas de impacto se desglosan un gran numero variables que deben de tomarse en cuenta a la hora de tomar decisiones, algunos de estos factores pueden ser:

- Disponibilidad de la materia prima
- Objetivos: claros, continuos y rastreables
- Cambios tecnológicos durante el desarrollo del proyecto
- Aceptación social
- Presentación del producto - investigación para captar la atención
- Desarrollo sustentable con respecto al ambiente
- Soporte económico para desarrollar la investigación
- Proyección a futuro



Las razones expuestas dan un claro concepto de la importancia que tiene la evaluación de impactos dentro de un proyecto investigativo. Por lo tanto, en los apartados siguientes se definirán cada una de las cuatro principales áreas de impacto que tiene relación directa con el presente trabajo investigativo.

4.1 Económico.

En términos generales se establece que el impacto económico es directamente proporcional a las ventajas que presenta el presente desarrollo investigativo. Cabe resaltar que la característica sinérgica con la que cuenta el proyecto permite contar con puntos fundamentales para desglosar el área económica.

Primeramente, analizaremos el impacto desde el punto de vista científico - tecnológico; ya que se destaca que unión del proceso de filtración y el de retención metálica en un solo paso reduce de manera significativa el espacio físico que ocupa el área de tratamiento.

Así como también la sinergia del sistema permite consumos energéticos menores en comparación a un sistema especializado para la remoción de metales como lo podría ser en este caso osmosis inversa, nano filtración etc.; ya que únicamente se necesita bombear los volúmenes de agua una sola vez para que entre al sistema de tratamiento, a diferencia de un proceso seriado por etapas.

Esto también destaca que la velocidad de tratamiento sea mayor o bien el tiempo de retención en el sistema sea menor lo que permite a largo plazo tratar volúmenes de agua significativamente mayores.

Es posible evaluar el impacto económico desde otro punto de vista: el social. Ya que la regeneración de agua representa una alternativa totalmente viable para satisfacer las altas demandas hídricas de la población. Recordando que el principio de la eficiencia se basa en la producción máxima al menor consumo de recursos, se hace necesario remarcar que uno de los principales objetivos del trabajo presentado consiste lograr formular un proceso eficiente y robusto de tratamiento.

Por otra parte, se encuentra el aprovechamiento de la Sílice micro- amorfa como materia prima de los filtros depuradores, la cual "es generada y catalogada como un residuo del proceso geotérmico en la planta de cerro prieto, Mexicali.^{2 3}"

² Luz, Quintanilla Suarez, Francisco Fuente de calor en el campo geotérmico de Cerro prieto y su relación con la anomalía magnética Nuevo León, México. Geofísica internacional. Vol.33 Nym. 4 pp 575-584 , 1994.

³ Diaz, Cesar. Tratamiento químico de la escoria de sílice de una planta geotérmica para su aplicación en cerámica y vidrio. BOLSOC.ESP.CERAM.VIDR. 29, 3, 18J-184. 1990. Recuperado el día: 01/12/2014.
URL: <http://boletines.secv.es/upload/199029181.pdf>



Es importante remarcar que el material filtrante se genera de manera constante en la planta geotérmica y en grandes cantidades.

Por lo que es posible purificar y empacar múltiples filtros a fin de que sean reemplazables en el sistema de tratamiento, cabe remarcar que la purificación de la sílice micro amorfa es un proceso sencillo, rápido y con un consumo mínimo de recursos al consistir únicamente de lavados con agua des ionizada caliente.

Por otra parte, resulta también importante hacer ver que se pretende establecer un procedimiento de post-tratamiento en donde se regenere la sílice micro amorfa de filtro saturado de contaminantes (adsorción) para tener nuevamente materia prima lista para reutilizarse, lo cual impacta aún más en las ventajas económicas con las que cuenta el proyecto desarrollado.

Finalmente, solo cabe remarcar que el impacto económico del sistema FIL-RET puede ser estudiado desde el punto de vista tecnológico (ventajas de ingeniería - sinergia), social (abastecer la demanda poblacional) así como también ambiental (reutilización de sílice micro amorfa desechada a fin de emplearlo como material filtrante) por lo que el equilibrio entre estas tres áreas representa la viabilidad y factibilidad de emplear dicho sistema a futuro.

4.2 Social.

El impacto social está estrechamente relacionado con los principales objetivos del presente desarrollo investigativo: contribuir en el abastecimiento de la demanda hídrica poblacional, generando grandes volúmenes de agua con cargas contaminantes mínimas a bajos consumos energéticos destacándose así las ventajas económicas; por lo que se generan también fuertes posibilidades de aceptación y aprobación social.

Sin embargo, es importante hacer ver que dentro de la población se tienen conceptos o etiquetas muy cerradas con respecto a la regeneración del agua residual urbana, debido a que las personas usualmente “desconfían o bien identifican - catalogan el agua producto como un recurso de baja calidad⁴”, con riesgos de higiene relacionados a la contaminación microbiológica.

⁴ Adewumi, J. L. Lemobade, A. Van Zyl, J. Factors predicting the intention to accept treated waste water reuse for non-potable uses amongst domestic and non-domestic respondents. Journal of the South African Institution of Civil Engineering. Vol 56. No 1. pp 11-19. 2014



Es importante resaltar que dicha problemática puede ser solventada por medio de la transparencia dentro del proyecto; informando de manera clara y concisa la manera en que el sistema opera y elimina las cargas contaminantes.

Es decir, brindar un panorama claro de la capacidad del proceso de tratamiento contrastándolo en valores de constantes de eficacia, así como de eficiencia no solo con los componentes individuales propios del sistema: filtración y electrolización si no también exponer una comparación analítica de las diferentes ventajas, desventajas y proyecciones a futuro.

A fin de destacar y crear conciencia en relación a la importancia que representa el papel de los tratamientos regeneración en otros países, ejemplos reales de su aplicación y la interrelación existente entre las diferentes tecnologías. Así como también es fundamental identificar la constante necesidad hídrica en la región.

"Numerosos estudios explican que la aceptación social de un proyecto de reutilización del agua depende muchas veces de : el control sobre la fuente del agua, normas sujetas a su reusó, conocimiento en relación al tratamiento, usos específicos del agua reciclada, costo y factores socio- democráticos⁵".

Por lo cual es importante mencionar que el impacto social de este proyecto tiene estrecha relación con su aceptación y asimilación por lo que es crítico presentar un análisis socio - económico referente a los costos de bombeo de agua potable hacia la ciudad frente a los valores financieros que presenta el sistema FIL-RET desde su inversión inicial hasta su coste operativo y mantenimiento.

La gamma de posibles aplicaciones acorde a la calidad de efluente generado, haciendo especial énfasis en la diferenciación entre la regeneración y la reutilización del agua tratada.

Abatir la tendencia social de identificar los procesos de regeneración como fuentes de riesgo de contaminación biológico- infeccioso; dependerá únicamente de la difusión de información con respecto a la eficiencia y alcance del presente trabajo no solo visto como un proyecto investigativo si no como un área de desarrollo en crecimiento exponencial.

⁵ Adewumi, J. L. Lemobade, A. Van Zyl, J. Factors predicting the intention to accept treated waste water reuse for non-potable uses amongst domestic and non- domestic respondents. Journal of the South African Institution of Civil Engineering. Vol 56. No 1. pp 11-19. 2014



4.3 Ambiental.

El estudio de esta área de impacto se simplifica si se toma en cuenta la definición que presenta Larry Canter (1998) quien establece que hay impacto ambiental cuando *“una acción o actividad produce una alteración, favorable o desfavorable, en el medio o en alguno de los componentes del medio. Esta acción puede ser un proyecto de ingeniería, un programa, un plan, una ley o una disposición administrativa con implicaciones ambientales⁶”*.

Bajo el concepto citado es posible definir de manera clara y concisa el impacto ambiental del presente trabajo; ya que la mejora en materia de calidad del agua efluente del tratamiento de agua residual de gamma industrial representa una alteración ecológica favorable.

Primeramente, es fundamental hacer ver que los efluentes de diversas plantas tratadoras de aguas urbanas e industriales se descargan directamente en el río Tijuana por lo que el contacto y la relación que mantiene con el sistema ecológico (flora, fauna, suelo, aire etc.) es totalmente directa, por lo que la descarga o la falta de remoción de contaminantes en el sistema de tratamiento provocara una gamma de impactos: a corto, mediano y largo plazo. “Como lo es la asimilación, retención y concentración de contaminantes metálicos y orgánicos en seres vivos.⁷”

Por otra parte, se encuentra la cuestión relacionada a la reutilización de un gran volumen del agua producida con fines agrícolas en el denominado “proyecto morado⁸”; ahora bien, es necesario remarcar que dentro de las ventajas que oferta este trabajo se encuentra la disminución de la carga metálica disuelta en el agua; lo que mejorara de manera exponencial la calidad de los cultivos en cuestión.

Descartando así la posibilidad de generar una problemática ambiental relacionada a la absorción de metales en los tejidos vegetales o animales, es también importante hacer ver que dentro de este punto existe una estrecha relación con el sector de impactos sociales debido a que la aceptación de este proyecto depende de hacer conciencia de dicho sistema social también forma

⁶ Canter, Larry. Manual de evaluación de impacto ambiental, Técnicas para la elaboración de estudios de impacto. Segunda edición. Editorial Mc Graw Hill. Madrid. 2000

⁷ Mejia, Cecilia Metales Pesados en Suelos y plantas, Contaminacion y Fitotoxicidad. Universidad Nacional Jose Faustino Sanchez Carrion. 2011 Recuperado el día: 11/04/15
URL:<http://es.scribd.com/doc/204360496/METALES-PESADOS-EN-SUELOS-Y-PLANTAS-CONTAMINACION-Y-FITOTOXICIDAD#scribd>

⁸ Tamayo, Juan. Saneamiento, Tijuana y Playas de Rosarito. Sin Fecha. Recuperado el día: 05/11/2014. URL:
<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/P2-Saneamiento%20en%20Tijuana%20y%20Playas%20de%20Rosarito,%20Baja%20California.pdf>



parte del sistema ecológico ya que son consumidores de los productos agrícolas y animales.

Finalmente es indispensable hacer mención de que el material empleado para la generación de los filtros empacados procede del aprovechamiento de un desecho industrial; ya que la sílice micro amorfa es generada en el "proceso geotérmico de la planta de Cerro Prieto en Mexicali"⁹.

Esta material fuente de muchas investigaciones llevadas a cabo en el estado de Baja California tiene propiedades características muy importantes dentro de las cuales se pretende impulsar la remoción de contaminantes en el agua depurada; sin embargo, en la actualidad ninguna aplicación se le da a este material, es importante hacer mención que se produce en grandes cantidades en la planta y que su impacto en el proceso geotérmico es negativo por lo que su eliminación del sistema es fundamental.

Cabe destacarse de que la carga másica generada únicamente se extrae del sistema y se dispone al aire libre, lo que representa una fuente importante de contaminación (partículas suspendidas en el aire).

Por lo que el aprovechamiento de este recurso no solo representa un impacto ambiental positivo en cuanto a la remoción de contaminantes en el agua producto de la aplicación de la sílice micro amorfa; si no que también representa una manera directa de evitar el desequilibrio ecológico en las zonas apegadas o cercanas a la planta geotérmica en Mexicali.

4.4 Científico - Tecnológico.

Lo fundamental de este apartado radica en la innovación de sistemas ya existentes para su mejora en cuanto a eficacia, eficiencia, rentabilidad en cuestiones de remoción de materia contaminante, aprovechamiento de espacio, reciclaje, reutilización etc.; dentro de estas innovaciones también se contempla la unión - compatibilidad de sistemas individuales en procesos de etapas seriadas o de un solo paso.

En el último apartado citado es donde recae el área de trabajo del proyecto propuesto en esta investigación, ya que envase a la propuesta de un nuevo sistema de tratamiento terciario para aguas residuales depuradas es posible realizar

⁹ Quijano, J. Gutiérrez, L. Geothermal production in Mexico in the year 2000. Geothermal Resources Council Transactions. 25, pp. 593-596, 2011. Recuperado el día: 07/11/14 URL: <http://www.iie.org.mx/boletin022007/apli1.pdf>



proyecciones a futuro; que aseguran mejorar de manera exponencial la calidad del recurso hídrico.

Dentro del ámbito tecnológico - científico es necesario resaltar la naturaleza de innovación; centrada en el concepto básico de sinergia: en donde "la eficiencia resultante de la unión de dos o más procesos es significativamente mayor a la obtenida mediante los mismos elementos, pero operados de manera individual o bien por pasos seriados (por separado)¹⁰".

Las propiedades de la sílice micro amorfa permiten estructurar una operación unitaria en donde se filtren sólidos suspendidos (característicos de las aguas residuales domésticas) y a su vez se retenga en la materia prima una gama amplia de metales.

Es fundamental reconocer que la reducción de metales en solución se lleva a cabo por diferentes mecanismos como: retención electroestática, creación de enlaces con la sílice modificada (presencia de iones hidroxilos), obstrucción por tamaño de poro (sinergia con efecto filtración) etc.

Ahora bien, el impacto que genera esta nueva innovación del sistema FIL-RET recae en el aumento de la competitividad en relación al aprovechamiento eficaz de los recursos disponibles.

Ya que al establecer el proceso en un solo paso generas no solo mayor aprovechamiento de espacio, menores tiempos de residencia, mayor capacidad de tratamiento de flujo, sino que también existe un efecto conjunto que aumenta la constante de: *remoción de contaminantes en relación al tiempo de exposición*.

Por las razones expuestas llega el punto en donde los sistemas de tratamiento de agua más eficientes tenderán a estas nuevas ventajas que ofrecen los sistemas que actúan bajo los conceptos de trabajo conjunto. Lo que orienta a las áreas de investigación a trazar nuevas metas relacionadas al estudio de las diferentes probabilidades de establecer condiciones óptimas del sistema - sinergia de los diferentes procesos de tratamiento.

En otras palabras, la evolución de los sistemas tradicionales de tratamientos primarios, secundarios y terciarios; radica en el trabajo conjunto de los mismos mediante interrelaciones dominadas por el efecto: sinergia.

¹⁰ Sin Autor. Sinergia; Definición .de. 2014 Recuperado el día: 01/12/2014.URL: <http://definicion.de/sinergia/>



5. MARCO TEORICO

5.1 Regeneración de aguas residuales urbanas depuradas.

Primeramente, es fundamental definir el concepto de agua regenerada como "aquella agua residual urbana que por medio de múltiples tratamientos de diversas naturalezas se logra una creciente calidad de la misma"¹¹. Es decir, es un agua que al ser tratada cumple con ciertos criterios para ser reutilizada nuevamente en ciertas actividades (industrial, agrícola, recreativo, municipal, etc.).

Es importante mencionar que dichos usos dados al agua dependen directamente de la calidad del esta, alcanzada por medio de la suma de los tratamientos empleados.

Es importante mencionar que la selección de regeneración de aguas residuales urbanas se debe a que se tiene una gamma de contaminantes bien definida y poco variable, con contaminantes en la mayor parte de los casos: no peligrosos, por lo cual se requieren de sistemas de operación generalizados y no específicos para remover contaminantes en particular como lo es en el caso del tratamiento de aguas con contaminantes peligrosos.

De este modo el campo de aplicación de las aguas regeneradas es muy amplio, al depender no solo de la tecnología empleada, sino también de la diferencial de calidades iniciales y final del agua durante su tratamiento, que da producto a un nivel de calidad del agua correspondiente a un empleo específico. "Las aguas regeneradas son una solución inminente a la demanda de zonas urbanas donde la aportación de los recursos hídricos es insuficiente."¹²

La regeneración de aguas residuales urbanas e industriales es un campo que aun esta desarrollo, por lo cual no se ha obtenido la máxima eficiencia de aprovechamiento sobre el uso de las aguas acorde a su calidad, por lo tanto el uso más común de este tipo de aguas es el de regadío con el "80% del total, siendo el de riego de campos de golf y el uso municipal de baldeo de calles y riego de parques y jardines del 12%.¹³".

¹¹ Garcia, Juan. Universidad de Salamanca. Regeneracion y reutilizacion del agua. Sin fecha. Recuperado 15/10/2014
URL: <http://cidta.usal.es/formacion/Reutilizacion.pdf>

¹² Sanz, Joan. De Regeneracion basica a regeneración avanzada: Tecnologia y calidad del agua regenerada. 2013. Recuperado: 19/09/2014

URL: <http://www.iagua.es/blogs/veolia-water/de-regeneracion-basica-regeneracion-avanzada-tecnologia-y-calidad-del-agua-regenerada>

¹³ De Bustamante, I, Cabrera, M.C, Candela, L, Lillo, J y Palacios, MP. La Reutilizacion de aguas regeneradas en España: Ejemplos en el marcos del proyecto Consolider – Tragua.. Aqua-LAC - Vol. 2 - N° 1. pp. 1- 17, 2010. Recuperado el día: 03/09/2014 http://www.unesco.org.uy/ci/fileadmin/phi/aqualac/Bustamante_et_al.pdf



Resulta fundamental remarcar que en parte una de las limitaciones principales de la regeneración de aguas consiste en el coste de los equipos de tratamiento y la inversión inicial que estos suponen, puesto en equilibrio con la rentabilidad económica que estos suponen frente a las aplicaciones mencionadas anteriormente.

5.2 Necesidad de la regeneración de aguas residuales.

Antes es importante remarcar que las necesidades de abastecimiento hídrico dictaminan tanto la calidad de agua requerida para las diversas aplicaciones u objetivos a realizar, así como también es una clave fundamental para la elección de las tecnologías disponibles u óptimas a emplear para cumplir los objetivos establecidos, por lo tanto, es fundamental agrupar dichas necesidades en tres grandes bloques:

-Necesidades Urbanas: Esta necesidad es la de mayor preocupación y el principal objetivo de la regeneración de aguas residuales, ya que pretende abastecer del recurso hídrico a aquellas comunidades urbanas que cuentan con limitadas fuentes del mismo.

Por lo tanto, la "reutilización del agua para diversas aplicaciones resulta un paso crucial para lograr un menor consumo y desgaste de los recursos hídricos¹⁴", así como también un mayor aprovechamiento de los mismos para que las comunidades urbanas tengan la posibilidad de realizar sus actividades cotidianas con la disposición adecuada del recurso.

-Necesidades Industriales: La regeneración de sus aguas grises, es decir toda agua residual que no procede de los procesos industriales (sanitarios, comedor etc.) o bien aguas de procesos industriales que no tienen contacto con sustancias peligrosas (refrigeración de equipos, lavados externos etc.).

La generación de ciclos de regeneración de agua dentro de la industria es un punto clave para la reducción de costos, así como también de desarrollo sustentable con el ambiente.¹⁵

¹⁴ Aguado, Jose Regeneración y reutilización de las aguas: Actuaciones en las EDAR de España. 2010. Recuperado el día: 16/09/2014
URL: <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2010/03/15/131429>

¹⁵ Grupo E3. Catedra Unesco de Territorio y medio ambiente, Universidad Rey Juan Carlos. La regeneración de aguas residuales en el sector industrial español. Recuperado: 15/09/14
URL: <http://www.consolider-tragua.com/documentos/ALICANTE/POSTERS/E/POSTER%20E3.pdf>



-Necesidades ambientales: Una óptima regeneración del agua asegura que el equilibrio entre desarrollo urbano-industrial y el ambiente, no se verá fuertemente desbalanceado. Es decir que la explotación de los recursos naturales hídricos será menor por lo que el ambiente amortiguara menos el impacto antropológico.

5.3 Contaminantes en el agua residual urbana y la regeneración.

Los contaminantes de las aguas urbanas e industriales trazan una guía fundamental para la conceptualización de un sistema específico de regeneración del agua. Cabe destacar que “no todas las aguas urbanas poseen la misma caracterización, debido a que esta depende de múltiples factores¹⁶” (mezcla de afluentes, zonas urbanas, condiciones medio ambientales, naturaleza de los procesos industrializados etc.)

Por la misma razón no es posible realizar una generalización de tecnología o bien un diseño único para el tratamiento de regeneración. A continuación, se destacan los principales puntos que se deben de tener en cuenta en base a la caracterización específica de un efluente doméstico (urbano):

- Elección de las tecnologías a emplear: Debido a que existen diferentes tecnologías que son más afines a eliminar con mayor efectividad ciertos contaminantes. Por lo tanto, si se tiene claro un estudio cualitativo y semi-cuantitativo de los contaminantes contenidos en el agua a regenerar, también se tendrán diferentes alternativas de diseño tecnológico para lograr la recuperación del agua a la mayor calidad posible.
- Calidad del agua producto: Dentro de un estudio teórico en base a las concentraciones de contaminante, la interrelación entre estos y las tecnologías aplicadas a los mismos es posible generar una conceptualización generalizada de la calidad del agua regenerada a obtener. Este punto es fundamental para determinar la posible aplicación del agua regenerada.
- Posible aplicación del agua regenerada: Tal y como fue citado anteriormente este punto depende directamente de la calidad del agua producto. Es aquí donde se distingue que al obtener agua con distintos

¹⁶ Muñoz, Amílcar. Caracterización de tratamiento de aguas residuales. Universidad Autónoma de Hidalgo. Monografía. Capítulo 2, pp. 89. 2008. Recuperado el día: 11/10/2014
URL:<http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/231104/514/1/Caracterizacion%20y%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales.pdf>



grados de calidad la gama de aplicaciones es amplia, es decir “por regeneración de agua es posible obtener un agua producto con calidad de potable^{17 18}” o bien un agua en cierto punto limpia pero que únicamente sea aprovechable para el riego agrícola

5.3.1 Composición característica del agua residual urbana.

Anteriormente se remarcó que la elección de tecnologías, así como la calidad a obtener o bien las aplicaciones futuras del agua regenerada son directamente dependientes de la composición o caracterización inicial del agua urbana.

Por lo tanto, es importante tener presente valores de referencia que nos brinden datos característicos de comparación, tales como los que se presentan a continuación, por una parte, la tabla 1.1 representa la “caracterización típica del agua residual urbana cruda (sin tratamiento previo) acorde a componentes en suspensión y solubles¹⁹”.

Mientras que en la tabla 6.1 se engloba información con respecto a la composición típica de agua urbana no tratada, expresada en términos cuantitativos. Sin embargo, como ya fue mencionada todas las aguas residuales mantienen relaciones cualitativas semejantes.

La comparación de estudios cuantitativos de diferentes afluentes urbanos tiende a diferir en cierta medida debido a que estos resultados en gran parte dependen de manera directa de diversos factores como lo puede ser:

- Hábitos de la población
- Factores medioambientales (clima, estaciones etc.)
- Mezclado de afluentes (con otras líneas urbanas o bien industriales)

¹⁷ Aguado, Jose Tratamiento y reutilización de aguas residuales mediante humedales: Alternativa ecológica para poblaciones con problemas de abastecimiento. 2009. Recuperado el día: 16/09/2014
URL: <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2009/04/02/115734>

¹⁸ Jovés, Joan. Navaz, Alfredo. Trillo, Juan. Riera, Simón. Sanz, Joan. Ortega, Juan. Mujeriego, Rafael. Regeneración de Aguas para la Industria: Proyecto de Demostración de El Camp de Tarragona Sin fecha. Recuperado: 10/10/14 URL: <http://www.veoliawatertechnologies.es/vwst-iberica/ressources/documents/1/6286,Regeneraci%C3%B3n-de-Aguas-para-la-Indus.pdf>

¹⁹ Muñoz, Amílcar. Caracterización de tratamiento de aguas residuales. Universidad Autónoma de Hidalgo. Monografía. Capítulo 2, pp. 89. 2008. Recuperado el día: 11/10/2014
URL: <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/231104/514/1/Caracterizacion%20y%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales.pdf>



A continuación, se presentan las caracterizaciones típicas de las aguas residuales urbanas:

Tabla 5.1 Composición típica de aguas residuales domesticas no tratados²⁰

Parámetro	Contaminación Fuerte	Contaminación Media	Contaminación Ligera
Solidos Totales	1000	500	200
Volátiles	700	350	120
Fijos	300	150	80
Sólidos en Suspensión	500	300	100
Volátiles	400	250	70
Fijos	100	50	30
Solidos Sedimentables	250	180	40
Volátiles	100	72	16
Fijos	150	108	24
Solidos Disueltos	500	200	100
Volátiles	300	100	50
Fijos	200	100	50
Demanda Bioquímica de oxígeno	300	200	100
Demanda Química de Oxígeno	800	450	160
Oxígeno Disuelto	0	0.1	0.02
Nitrógeno Total	86	50	25
Orgánico	35	20	10
Amoniaco Libre	50	30	15
Nitritos	0.10	0.05	0.00
Nitratos	0.40	0.20	0.10
Fosforo Total	17	7	2
Cloruros	175	100	15
pH	3.9	6.9	69
Grasas	40	20	0
Carbono Orgánico Total	15	8	4

²⁰ Muñoz, Amilcar. Caracterización de tratamiento de aguas residuales. Universidad Autónoma de Hidalgo. Monografía. Capítulo 2, pp. 89. 2008. Recuperado el día: 11/10/2014 URL: <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/231104/514/1/Caracterizacion%20y%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales.pdf>



5.4 Contaminantes en el agua residual industrial y regeneración^{21 22 23}

Primeramente es indispensable remarcar que prácticamente todas las actividades productoras de bienes generan contaminantes como subproductos no deseados, la gama de dichos contaminantes es amplia puesto que van desde contaminantes orgánicos e inorgánicos solubles a insolubles, entre los contaminantes más importantes del agua creados por las actividades humanas se encuentran microbios patógenos, nutrientes, sustancias que consumen el oxígeno del agua, metales pesados y materia orgánica persistente, así como sedimentos en suspensión y pesticidas, los cuales, en su mayoría, provienen de fuentes difusas (no localizadas).

Los materiales de desecho como los ácidos, álcalis, metales tóxicos y pesados, aceites, grasas, colorantes, pesticidas e incluso materiales radiactivos se vierten en las masas de agua por muchas zonas o áreas industriales.

Algunos contaminantes son más nocivos que otros, como el bienio policlorado (PCB) y sus compuestos, lubricantes y el agua caliente expulsada por las centrales eléctricas y que usan para la refrigeración. Los contaminantes descargados en las masas de agua se disuelven o permanecen suspendidos en el agua.

Es importante mencionar que en ocasiones se acumulan en la parte inferior de las masas de agua, y en los lodos del fondo, lo que tiene un efecto multiplicador, al afectar a organismos que allí viven, sobre todo a los filtradores, pudiendo permanecer durante largos periodos de tiempo y acumularse y mezclarse con los depósitos de años posteriores.

El calor, que eleva la temperatura de las aguas receptoras de vertidos también puede ser considerado un contaminante. Generalmente, los contaminantes son la causa más importante de la pérdida de calidad del agua en todo el mundo.

²¹Alba, Fernando. Leton, Pedro. Rosal, Pedro. Dorado Miriam. Villar, Susana. Sanz, Juana. Vt Miod. Tratamientos avanzados de aguas residuales. Capítulo 1. Marco Legal y características de las aguas residuales industriales. Recuperado el día: 14/11/2015 URL: http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/VT2_Tratamientos_avanzados_de_aguas_residuales_industriales.pdf

²²UNESCO. Hecho:36. Gran parte de las aguas residuales industriales se vierten sin tratamiento en los cursos de agua abiertos, lo cual reduce la calidad de mayores volúmenes de agua. Recuperado el día: 15/11/15 URL: <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact-36-industrial-wastewater/http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact-36-industrial-wastewater/>

²³Autor Desconocido. La contaminación industrial del agua; causas, consecuencias y datos. Recuperado el día: 15/11/15 URL: <http://actualidad.notizalia.com/cambio-climatico/la-contaminacion-industrial-del-agua-causas-consecuencias-y-datos/>



La industria genera más presión sobre los recursos hídricos a través de los impactos que producen las descargas de aguas residuales y su potencial contaminante, que por la cantidad de agua utilizada en la producción.

El mercurio y el plomo por ejemplo son procedentes de las actividades industriales, la minería comercial y artesanal y de los lixiviados de los vertederos ponen en peligro la salud humana y de los ecosistemas en algunas áreas. Asimismo, las emisiones de las centrales eléctricas de carbón son una fuente importante del mercurio acumulado en los tejidos de los peces situados en la parte superior de la cadena trófica.

Las principales fuentes de nutrientes son las escorrentías agrícolas, las aguas residuales domésticas (que también son una fuente de contaminación microbiana), los efluentes industriales y los aportes atmosféricos procedentes de la quema de combustibles fósiles o los incendios forestales.

Las industrias que utilizan materias primas orgánicas son como es de pensarse las principales contribuyentes a la contaminación orgánica, mientras que las industrias del petróleo, el acero y la minería representan el mayor riesgo en la liberación de metales pesados.

Si bien la generación de contaminantes es un grave problema, la falta de tratamiento de los efluentes generados es un problema aun mayor puesto que gran parte de las aguas residuales industriales se vierten sin tratamiento en los cursos de agua abiertos, lo cual reduce la calidad de grandes volúmenes de agua y, a veces, se infiltran en los acuíferos y contaminan los recursos hídricos subterráneos.

Recordando que en mucho de los casos los contaminantes tienden por la vía acumulación de los tejidos animales y a formar parte de esta manera de los ciclos alimenticios y biogeoquímicos; por otra parte, dentro del crecimiento industrial se espera que la contaminación industrial aumente en las economías emergentes junto con el desarrollo económico e industrial.

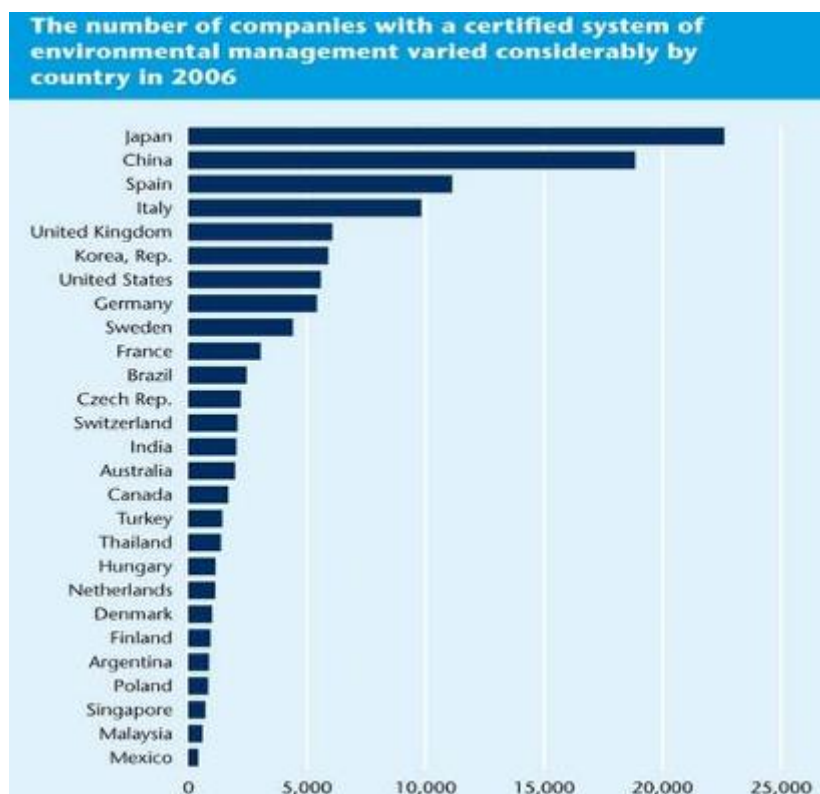
El crecimiento industrial actualmente dirige a muchas industrias conocidas por su alta carga contaminante en sus efluentes tales como la industria química y metalúrgica, a trasladarse desde los países con ingresos altos a los países de economías emergentes, las cuales no cuentan con la infraestructura o la tecnología suficiente u óptima para concretar el tratamiento de los efluentes industriales.

Sin embargo, un aumento progresivo de empresas que quieren obtener la certificación ISO 14001, una norma internacional estándar para la gestión medioambiental administrado por la Organización Internacional de Normalización.



En la imagen que se presenta a continuación se muestra la comparación del número de compañías con sistemas certificados en diferentes países en 2006.

Imagen 5.1 Comparación del número de compañías con sistemas certificados en diferentes países en 2006²⁴



Los compuestos orgánicos e inorgánicos se encuentran en aguas residuales procedentes de instalaciones industriales diversas. A diferencia de las aguas residuales domésticas, los efluentes industriales contienen con frecuencia sustancias que no se eliminan por un tratamiento convencional, bien por estar en concentraciones elevadas o bien por su naturaleza química.

Muchos de los compuestos orgánicos e inorgánicos que se han identificado en las aguas residuales industriales son objeto de regulación especial debido a su toxicidad o a sus efectos biológicos a largo plazo.

²⁴UNESCO. Hecho:36. Gran parte de las aguas residuales industriales se vierten sin tratamiento en los cursos de agua abiertos, lo cual reduce la calidad de mayores volúmenes de agua. Recuperado el día: 15/11/15 URL: <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact-36-industrial-wastewater/http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact-36-industrial-wastewater/>



El control de la contaminación del agua producida por la actividad industrial comenzó con la aprobación por el congreso de los Estados Unidos de la enmienda de 1972 a la "Federal Water Pollution Control Act" que estableció un sistema nacional de descarga y eliminación de contaminantes.

Las enmiendas de 1977 y 1987, conocidas como Clean Water Act y Water Quality Act complementan la regulación legal norteamericana. La tendencia en Europa y por tanto en países como España, especialmente en la promulgación de la Ley 16/2002 de prevención y control integrado de la contaminación y la puesta en marcha de EPER – España, es reducir el vertido de algunos contaminantes específicos emplear sistemas avanzados de tratamiento de aguas residuales denominadas como in – situ.

Entre las principales sustancias químicas contaminantes de acuerdo a la citada ley 16/2002 que se tomaran obligatoriamente en consideración para fijar valores límite de emisiones a las aguas se encuentran:

- Compuestos órgano – halogenados y sustancias que puedan generarlos en el medio acuático.
- Sustancias y preparados con propiedades cancerígenas o muta génicas que puedan afectar la reproducción del medio acuático
- Hidrocarburos persistentes y sustancias orgánicas tóxicas persistentes y bioacumulables
- Cianuros
- Biocidas y productos fitosanitarios
- Sustancias que ejercen una influencia desfavorable sobre el balance de oxígeno (computable mediante parámetros agregados tales como DBO y DQO)

En la ley que regula el vertido de aguas industriales a la red de saneamiento en la comunidad de Madrid (Ley 10/1993, de 26 de octubre) establece también la necesidad de identificación de los vertidos y la definición de determinados parámetros de contaminación. Uno de estos parámetros es la eco toxicidad (medida mediante un ensayo normalizado de bioluminiscencia) que permite detectar compuestos tóxicos para los que no exista una normativa especial, como podría ocurrir con los contaminantes emergentes.

Estos contaminantes proceden de industrias muy variadas y por su naturaleza concentración o caudal de efluente, hacen que esas aguas residuales demanden un tratamiento antes de su vertido o reutilización.



La tabla 6.2 muestra la clasificación, por sectores de actividad industrial de los principales compuestos contaminantes en agua junto con el porcentaje de participación en las emisiones directas en la unión europea.

Los tratamientos a los que se deben de someter los efluentes tienen que garantizar la eliminación o recuperación del compuesto orgánico o inorgánico en el grado requerido por la legislación que regula el vertido del efluente o para garantizar las condiciones mínimas del proceso en el caso de reutilización o recirculación de la corriente para uso interno.

El nivel máximo admisible de contaminante puede conseguirse mediante la utilización de diversas técnicas tanto destructivas como no destructivas. Dentro de las cuales se destacan:

Métodos no destructivos:

- Adsorción (carbón activo y otros adsorbentes)
- Desorción (stripping)
- Extracción en fase líquida con disolventes
- Tecnología de membranas (ultrafiltración, nanofiltración)

Métodos destructivos

- Tratamiento biológico
- Oxidación química
- Incineración
- Oxidación catalítica y no catalítica
- Oxidación húmeda supercrítica
- Procesos avanzados de Oxidación

En el contexto de tratamiento de contaminantes en efluentes acuosos, la aplicación de una técnica no destructiva se entiende como una etapa previa de concentración antes de abordar su destrucción química.

El carácter oxidable de la materia orgánica hace que la transformación en compuestos no tóxicos consista en último extremo aunque no necesariamente en la mineralización o conversión a dióxido de carbono y agua.



Tabla 5.2 Emisoras directas de contaminantes en agua clasificados por su actividad²⁵

Contaminante	Fuente Emisora
Arsénico	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sintonización de minerales metálicos (22%) Industria química orgánica de base o fertilizantes (20%) Producción de cemento y materiales cerámicos (18%) Plantas de procesamiento de residuos peligrosos (10%)
Cadmio	Industrial del metal e instalaciones de calcinación y sintonización de minerales metálicos (66%)
Cromo	Industrias del metal e instalaciones de calcinación sintonización de minerales metálicos (87%)
Tetracloroetileno	Tratamiento de superficies con disolventes orgánicos (43%) Industrias del metal e instalaciones de calcinación sintonización de minerales metálicos (26%) Productos químicos orgánicos de base (12%) Productos químicos inorgánicos de base o fertilizantes (12%)
Triclorobencenos	Productos químicos orgánicos de base (56%) Productos químicos inorgánicos de base o fertilizantes (44%)
Cloroformo	Productos químicos orgánicos de base (43%) Productos químicos inorgánicos de base o fertilizantes (40%) Industria Farmacéutica (15%)
Cobre	Industria del metal e instalaciones de calcinación y sintonización de minerales metálicos (23%) Industria química inorgánica de base o fertilizantes (18%) Industria química orgánica base (12%) Plantas de combustión (12%)
Cianuros	Industria del metal e instalaciones de calcinación y sintonización de minerales metálicos (80%) Industria química orgánica base (10%)
Plomo	Industria del metal e instalaciones de calcinación y sintonización de minerales metálicos (40%) Industria química inorgánica de base o fertilizantes (15%) Industria química orgánica base (12%) Refinerías de petróleo y gas (12%)
Mercurio	Industria del metal e instalaciones de calcinación y sintonización de minerales metálicos (31%) Industria química inorgánica de base o fertilizantes (18%) Industria química orgánica base (14%)
Níquel	Industria del metal e instalaciones de calcinación y sintonización de minerales metálicos (44%) Industria química inorgánica de base o fertilizantes (13%) Industria química orgánica base (13%)
Fosforo	Industria química inorgánica de base o fertilizantes (25%) Industria química orgánica de base (22%) Industria de la madera y papel (18%) Industrias lácteas, mataderos y otras (13%)

²⁵Alba, Fernando. Leton, Pedro. Rosal, Pedro. Dorado Miriam. Villar, Susana. Sanz, Juana. Vt Miod. Tratamientos avanzados de aguas residuales. Capítulo 1. Marco Legal y características de las aguas residuales industriales. Recuperado el día: 14/11/2015 URL: http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/VT2_Tratamientos_avanzados_de_aguas_residuales_industriales.pdf



En muchos casos el objetivo del proceso de oxidación no es la mineralización completa, con conversión del carbono orgánico a dióxido de carbono, si no la transformación de los contaminantes en sustancias biodegradables que no originen problemas de inhibición de biomasa en tratamientos biológicos convencionales o que permitan la descarga sin originar problemas de eco toxicidad.

La aplicación de un método u otro depende fundamentalmente de la concentración del contaminante y el caudal de efluente. Determinadas técnicas como la incineración y algunos tratamientos de oxidación son utilizables solo cuando la concentración de compuestos orgánicos es elevada, mientras que otras como la adsorción los procesos de oxidación avanzada son útiles en efluentes con baja concentración de contaminante

En cuanto a los métodos destructivos de oxidación estos se clasifican en dos categorías principales métodos directos y avanzados. Los procedimientos directos se definen como aquellos que utilizan oxígeno como agente oxidante e incluyen la incineración, la oxidación húmeda, la oxidación húmeda catalítica, la supercrítica y la oxidación anódica o electroquímica.



5.5 Usos del agua residual regenerada y normativa correspondiente.

Primeramente, es necesario mencionar que la aplicación del agua residual regenerada para diferentes fines es regulada en la unión europea por el "R.D. 1620/2007, en cumplimiento de las directrices recogidas en la Directiva Marco del Agua (entre otras).²⁶"

En esta normativa se establece la necesidad de que el agua a reutilizar cumpla unas normas de calidad mínimas dependiente de su uso. Sin embargo, el empleo de dicha agua tratada también depende de otros factores que engloban el desarrollo sustentable y la reutilización del agua tal y como se muestra en la imagen 6.1.

Es decir el equilibrio con el medio ambiente ya que se debe de evaluar el impacto medioambiental (plantas, suelo, acuíferos etc.) que se generara al utilizar dichas aguas.

Imagen 5.2. "Factores que promueven la reutilización del agua²⁷"



Se debe destacar que la diferencial entre los resultados cuantitativos de las aguas ya tratadas por metodologías de regeneración y la caracterización inicial del agua residual urbana, corresponde a un valor de calidad del agua.

El cual es fundamental para la determinación de posibles empleos del agua producto, por lo tanto, entre mayor sea el gradiente de calidad del agua, el número de aplicaciones que esta podrá tener en diferentes sectores será superior.

²⁶ Sin Autor. Ministerio de la Presidencia, Real Decreto 1620/2007. BOE núm. 294; 2007.

URL: <https://www.boe.es/boe/dias/2007/12/08/pdfs/A50639-50661.pdf>

²⁷ Sanz, Joan. Guerrero, Leopoldo. Ortega, Juan. Veolia. Water Systems Iberica. Direccion Tecnica. Reutilizacion de aguas residuales: Un recurso alternativo. Tratamiento de regeneración. Sin fecha. Recuperado: 10/10/14
URL: <http://www.veoliawatertechnologies.es/vwst-iberica/ressources/documents/1/6207,Reutilizaci%C3%B3n-de-aguas-residuales.pdf>



A continuación, se presentan las dos vertientes más grandes del empleo de dichas aguas regeneradas:

a) Riego: Cabe destacar que esta aplicación constituye el uso más frecuente de las aguas regeneradas, debido a que para alcanzar este objetivo no se hace necesaria una elevada calidad del agua regenerada.

Ya que el amortiguamiento del suelo o bien la misma degradación microbiana ayudan en gran medida a equilibrar los posibles impactos ambientales de compuestos orgánicos e inorgánicos contenidos en el agua producto.

Es importante hacer ver como hoy en día "el 80% del total de aguas regeneradas son utilizada con este fin.²⁸" A continuación se presentan ejemplos prácticos del empleo de aguas regeneradas:

- Reutilización del agua residual urbana tratada en cultivos industriales: Tabaco para obtención de productos de interés en la industria.²⁹
- Reutilización del agua residual urbana regenerada mediante micro filtración en cultivos hortícolas: cultivo de lechuga³⁰
- Reutilización del agua residual urbana regenerada mediante foto-Denton solar en cultivos hortícolas: cultivo de calabacín³¹

b) Recarga artificial de acuíferos: La recarga artificial de acuíferos "se contempla en el artículo 4 del RD 1620/2007 como un uso ambiental del agua residual tratada. En el documento se establecen los requerimientos de calidad que ha cumplir el agua utilizada para ese uso (Anexo II).³²"

Sin embargo, es fundamental además garantizar que no se van a generar afecciones negativas en el acuífero (tanto en su comportamiento hidráulico como en la calidad de sus aguas), en los ecosistemas hidro dependientes de este, así como en los usos que se les den a las aguas que se extraigan del acuífero.

²⁸ De Bustamante, I, Cabrera, M.C, Candela, L, Lillo, J y Palacios, MP. La Reutilizacion de aguas regeneradas en España: Ejemplos de aplicación en el marco del proyecto Consolider – Tragua. Aquí-LAC - Vol. 2 - Nº 1. pp. 1- 17, 2010. Recuperado el día: 03/09/2014 http://www.unesco.org.uy/ci/fileadmin/phi/aqualac/Bustamante_et_al.pdf

²⁹ Fernandez, Amadeo, Malato, Sixto, Gomez, Maria del Mar, Carbonell, Gregoria, Fernandez Carlos, Porcel, Miguel, Pro, Francisco, Contreras, Mariano, Cresco, Juan, Jacquin, Catherine, Elorrieta, Maria. Consolider tragua. Ejemplos Practicos de Reutilizacion de agua residual tratada y regenerada para el riego de cultivos. Evaluacion de Riesgo Recuperado el día : 03/09/2014 http://www.consolider-tragua.com/documentos/ejemplos_practicos_riego.pdf

³⁰ Fernandez, Amadeo, Malato, Sixto, Gomez, Maria del Mar, Carbonell, Gregoria, Fernandez Carlos, Porcel, Miguel, Pro, Francisco, Contreras, Mariano, Cresco, Juan, Jacquin, Catherine, Elorrieta, Maria. Consolider tragua. Ejemplos Practicos de Reutilizacion de agua residual tratada y regenerada para el riego de cultivos. Evaluacion de Riesgo Recuperado el día : 03/09/2014 http://www.consolider-tragua.com/documentos/ejemplos_practicos_riego.pdf

³¹ Fernandez, Amadeo, Malato, Sixto, Gomez, Maria del Mar, Carbonell, Gregoria, Fernandez Carlos, Porcel, Miguel, Pro, Francisco, Contreras, Mariano, Cresco, Juan, Jacquin, Catherine, Elorrieta, Maria. Consolider tragua. Ejemplos Practicos de Reutilizacion de agua residual tratada y regenerada para el riego de cultivos. Evaluacion de Riesgo Recuperado el día : 03/09/2014 http://www.consolider-tragua.com/documentos/ejemplos_practicos_riego.pdf

³² Sin Autor. Ministerio de la Presidencia, Real Decreto 1620/2007. BOE núm. 294; 2007. URL: <https://www.boe.es/boe/dias/2007/12/08/pdfs/A50639-50661.pdf>



Por estas razones, en las actuaciones de recarga con agua residual tratada se han de cumplir dos condiciones:

-Que el agua y el medio receptor sean adecuados para llevar a cabo la actuación

-Que el diseño y la ejecución del proyecto sean correctos

Es importante destacar que se deben de llevar óptimos estudios hidrogeológicos del área de aplicación de las recargas, debido a que la dirección del flujo de agua podría conducir dichas recargas a cuerpos acuíferos en contacto directo con zonas urbanas, es decir se debe evitar que el relleno de acuíferos con aguas residuales regeneradas sea consumido.

A continuación, se presenta una tabla en donde se muestran los diferentes sectores en los cuales se puede aprovechar el agua regenerada y sus respectivas aplicaciones.

Imagen 5.3 “Aprovechamiento de efluente regenerado³³”

1. URBANOS	2. RIEGO AGRÍCOLA	3. INDUSTRIALES	3. RECREATIVOS	5. AMBIENTALES
				
a) <u>Usos residenciales</u> Riego jardines privados; Descarga de aparatos sanitarios b) <u>Servicios urbanos</u> Riego de zonas verdes; Baldeo de calles; Sistemas contra incendios; Lavado industrial de vehículos	a) Contacto directo del agua con partes comestibles b) Productos cuyo consumo se realiza después de un tratamiento posterior; Pastos para consumo de animales productores de leche o carne; Acuicultura c) Cultivos leñosos; Flores ornamentales, viveros e invernaderos; Cultivos industriales, viveros, forrajes ensilados, cereales y semillas oleaginosas	a) Aguas de proceso y limpieza b) Torres de refrigeración y condensadores evaporativos c) Otros usos industriales	a) Riegos de campos de golf b) Estanque, caudales circulantes ornamentales a los que está impedido el acceso del público al agua	a) Recarga de acuíferos por percolación a través del terreno b) Recarga de acuíferos por inyección directa c) Riego de bosques y zonas verdes; Silvicultura d) Otros usos ambientales: mantenimiento de humedales; caudales mínimos y similares.

³³ García, Juan. Universidad de Salamanca. Regeneracion y reutilizacion del agua. Sin fecha. Recuperado 15/10/2014
URL: <http://cidta.usal.es/formacion/Reutilizacion.pdf>



5.5.1 Marco Normativo y avances de tratamiento de aguas residuales en México³⁴

Los beneficios de contar con agua de calidad son innumerables, por esta razón, en México se ha creado un marco normativo que se encarga de regular las descargas de aguas residuales a los cuerpos receptores a través de las siguientes normas:

- Norma Oficial Mexicana NOM-001-Semarnat-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas o bienes nacionales. Publicada el 6 de enero de 1997. Los límites máximos permisibles de iones metálicos a descargar se presentan más adelante en la tabla 6.1
- Norma Oficial Mexicana NOM-002-Semarnat-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en la descarga de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Publicada el 3 de junio de 1998.
- Norma Oficial Mexicana NOM-003-Semarnat-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios públicos. Publicada el 21 de septiembre de 1998.
- Norma Oficial Mexicana NOM-004-Semarnat-2001, que establece las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes en lodos y biosólidos para su aprovechamiento y disposición final. Publicada el 15 de agosto de 2003.

La preocupación por las descargas de las aguas residuales y sus efectos al medio ambiente ha dado lugar a la promulgación de leyes como la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente publicada el 28 de enero de 1988 y la Ley de Aguas Nacionales publicada el 1 de diciembre de 1992, que establecen la necesidad de prevenir y controlar la contaminación del agua y proteger los recursos hídricos.

En este mismo sentido, al inicio de cada nueva administración del Gobierno en México, se formula un Programa Nacional Hídrico alineado al Plan Nacional de Desarrollo, el Programa Nacional de Infraestructura, y demás programas que busquen la preservación y aprovechamiento sustentable de los recursos hídricos.

³⁴De la Peña, María. Ducci, Jorge. Zamora, Viridiana. Tratamiento de aguas residuales en México. Publicado en Mayo 2013. Recuperado el día: 22/11/15
URL:http://www.siaqua.org/sites/default/files/documentos/documentos/tratamiento_de_aguas_residuales_en_mexico.pdf



Durante el periodo 2001–2006, en relación con el tratamiento de aguas residuales, se planteó la necesidad de elevar el nivel de cobertura a fin de restaurar la calidad del agua en las corrientes y acuíferos del país.

En dicho sexenio y dentro de la iniciativa de fomento a la ampliación de la cobertura y la calidad de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento, se estableció como meta alcanzar el 65% de tratamiento de las aguas residuales recolectadas en las redes de alcantarillado para 2006.

Lla cual fue un tanto ambiciosa, pues las inversiones realizadas en la materia no fueron suficientes para incrementar en más de 40 puntos porcentuales la cobertura respecto al año 2000,¹ alcanzando apenas un 36.1% para ese año.

No obstante, se fomentó el desarrollo de instrumentos legales, económicos y tecnológicos que favorecieron y estimularon el reúso del agua residual tratada, específicamente en aquellas actividades en las que no se requiere agua de primer uso.

Más adelante, en el marco de los Objetivos de Desarrollo del Milenio, el Gobierno de México se comprometió a lograr una cobertura de tratamiento del 60% del volumen total de aguas residuales colectadas en los sistemas de alcantarillado del país, lo que plasmó en el Programa Nacional Hídrico 2007–2012.

Tabla 5.3 Límites Máximos Permisibles para metales pesados y cianuros NOM-001-SEMARNAT-1996 ³⁵

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA METALES PESADOS Y CIANUROS																				
PARÁMETROS (*)	RÍOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				AGUAS COSTERAS						SUELO			
(miligramos por litro)	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		ESTUARIOS (B)		Uso en riego agrícola (A)		HUMEDALES NATURALES (B)	
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Arsénico	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2
Cadmio	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.05	0.1	0.1	0.2
Cianuro	1.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0	3.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0
Cobre	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4	6.0	4	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4	6.0	4.0	6.0
Cromo	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
Mercurio	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01	0.01	0.02	0.005	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01
Níquel	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4
Plomo	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	5	10	0.2	0.4
Zinc	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20

(*) Medidos de manera total.
P.D.= Promedio Diario, P.M.= Promedio Mensual; N.A.= No es aplicable
(A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos.

³⁵Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Normas Oficiales Mexicanas.NOM-001-SEMARNAT-1996.Recuperado el día:16/02/2016
URL:<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/NormasOficialesMexicanas.pdf>



5.5.2 Ejemplos de usos ambientales de la reutilización.

Dentro de esta sección es de sumo interés hacer ver como ya existen ejemplos claros de la rentabilidad de la regeneración de aguas residuales; ya que se citan a continuación proyectos a grandes escalas que fueron efectuados en los últimos años en España.

Con lo que no solo nos crea una idea de que estos sistemas regeneradores son efectivos, rentables y eficientes para el uso de diversas aplicaciones, sino que también nos deja en claro que se requieren de nuevas innovaciones tecnológicas para aumentar aún más las cualidades citadas anteriormente, logrando así el incremento exponencial de las áreas afines a emplear este tipo de aguas regeneradas.

Algunos de los proyectos que nos muestran lo importante que resulta la regeneración de aguas residuales son:

- Barrera hidráulica contra la intrusión salina. Delta del Llobregat. Barcelona³⁶
- Riego campo de golf en islas Canarias ^{37 38}
- Filtros verdes. Carrión de los Céspedes. Sevilla³⁹
- Recarga de la cuenca la región de Tehuacán y de la Mixteca poblana⁴⁰
- Sistema Integrado para Reciclaje de Agua y Recuperación de Cobre en la ciudad de Tijuana, Baja California. ⁴¹
- UNAM desarrolla sistema de reciclaje de aguas grises de bajo costo para uso domestico⁴²

³⁶ Ortuño, Felip. Niñero, Josep. Fraile, Josep. Juarez, Iker. BARRERA HIDRÁULICA CONTRA LA INTRUSIÓN MARINA EN EL ACUÍFERO PRINCIPAL DEL DELTA DEL LLOBREGAT (BARCELONA): PRIMERA FASE . Sin fecha.

Recuperado el día: 05/09/2014

URL: http://www.arena.com/public/uploads/Articulo_Barrera_es_1271689849.pdf

³⁷ Cabrera, M. Palacios, M. Estevez, E. Cruz, T. Hernandez, J. La reutilización de aguas regeneradas para riego de un campo de golf: evolución geoquímica y probable afección a un acuífero volcánico (Islas Canarias). Boletín Geológico y Minero, 120 (4): 543-552. 2009. Recuperado el día: 05/09/2014

URL: http://www.igme.es/Boletin/2009/120_4_2009/5-ARTICULO%203.pdf

³⁸ De Bustamante, I. Cabrera, M.C. Candela, L., Lillo, J y Palacios, MP. La Reutilización de aguas regeneradas en España: Ejemplos de aplicación en el marco del proyecto Consolider – Tragua.. Aquí-LAC - Vol. 2 - Nº 1. pp. 1- 17, 2010. Recuperado el día: 03/09/2014 http://www.unesco.org.uy/ci/fileadmin/phi/aqualac/Bustamante_et_al.pdf

³⁹ Bustamante, I. Ramos, J. Segura, M. Iglesias, J. Gomez, D. Ortiz, I. Carreño, F. Bienes, R. Martin, T. Marquez, A. Gil, J. Martin, S. Carenas, S. Carenas, B. Salas, J. De Miguel, A. Leal, M. Martin, I. Garcia, R. Martinez, V. Adaptación de los filtros verdes: De estaciones depuradoras de agua (EDAR) a estaciones de regeneración y reutilización de aguas depuradas (ERRAD). Sin Fecha. Recuperado el día: 03/09/2014

URL: <http://www.consolider-tragua.com/eventos/ADECAGUA/COMUNICACIONES/R1-BUSTAMANTE.pdf>

⁴⁰ Hernandez, Raul. Tecnologías de Regeneración de cuencas para la obtención de Agua. El programa Agua para Siempre. Publicado 2004. Recuperado el día: 22/11/15

URL: <http://www.alternativas.org.mx/Regeneracion%20de%20cuencas.pdf>

⁴¹ Lebrija, Alejandro. Reciclado de agua industrial: La única solución en algunos casos. Recuperado el día: 22/11/15

URL: <http://www.agualatinoamerica.com/docs/pdf/1-2-02lebrija.pdf>

⁴² Rodriguez, Lorena. Business News Americas. UNAM desarrolla sistema de reciclaje de aguas grises de bajo costo para uso domestico. Publicado en Octubre 2011. Recuperado el día: 22/11/15

URL: <https://www.veoverde.com/2011/10/mexico-desarrollan-sistema-para-de-reciclaje-de-aguas-grises-de-bajo-costo/>



5.6 Tecnologías de regeneración de aguas residuales urbanas.

Dentro de esta sección se debe destacar primeramente que los tratamientos tanto primarios como secundarios de todas las aguas residuales urbanas son por lo general semejantes (cribado, afinado, tratamiento biológico, sedimentación, filtrado rápido etc.), sin embargo, es el tratamiento terciario en donde se suele diferir en las tecnologías a emplear ya que como anteriormente ya ha sido remarcado diseño tecnológico de los sistemas empleados para las aguas depende de dos factores fundamentales:

*El estado inicial: Contaminación de las aguas residuales urbanas (caracterización básica descrita en el apartado correspondiente a la Composición característica del agua residual urbana)

*Calidad de agua deseada: Acorde a la aplicación que se le pretende dar al agua una vez tratada.

Ahora bien, también resulta fundamental remarcar que la correspondencia entre la calidad del agua regenerada y las tecnologías empleadas es directamente proporcional, es decir entre más sistemas de tratamiento se instalen para regenerar el agua residual mayor será la calidad de la misma.

Por consiguiente, se hace referencia a que muchas veces emplear una sola tecnología de regeneración resulta insuficiente para el objetivo establecido por lo cual se conlleva al anexo de varios sistemas tecnológicos en serie.

A continuación, se citan algunos de las principales herramientas de regeneración de aguas, las cuales fueron “agrupadas en cuatro grandes grupos⁴³

⁴⁴”:

- *Tratamientos naturales
- *Tratamientos intensivos
- *Tecnologías de desinfección
- *Tecnologías de membrana

⁴³ Muñoz, Amilcar. Caracterización de tratamiento de aguas residuales. Universidad Autónoma de Hidalgo. Monografía. Capítulo 3, 2008. Recuperado el día: 11/10/2014
URL: <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/231104/514/1/Caracterizacion%20y%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales.pdf>

⁴⁴ Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua. Agua potable para comunidades rurales, reusó y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas Capítulo 18. Tecnologías Innovadoras en la regeneración y reutilización de aguas residuales. Recuperado el día: 23/10/14 URL: http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda/pdfs/Capitulo_18.pdf



5.6.1 Tratamientos de regeneración de aguas: Naturales ⁴⁵ ⁴⁶

Diferenciadas por consistir en sistemas con orientación sustentable es decir que desarrollan prototipos de regeneración de aguas en base a la extrapolación de fenómenos característicos dentro de la naturaleza a sistemas a grande escala para el tratamiento adecuado de efluentes urbanos.

Tal y como se plantea el material con el que se trabaja en este tipo de sistemas es un claro ejemplo del aprovechamiento efectivo de los recursos naturales (arena, lagunaje etc.).

Es también importante resaltar como este tipo de tratamiento de regeneración viene acompañado de tratamientos biológicos tanto aerobios como anaerobios, que representan una alternativa efectiva frente a la degradación de contaminantes de origen orgánico.

Sin embargo, se debe remarcar que este tipo de tratamientos presentan una clara desventaja con respecto al tiempo de tratamiento ya que este es relativamente alto debido a que se depende directamente de la eficiencia microbiana.

A continuación, se describen algunos de los tratamientos de regeneración natural principales:

a) Infiltración-percolación: Consiste en un tratamiento de regeneración natural basado en el uso de arena (recurso natural). Se trata de un filtro secuencial, aerobio y con biopelícula. Se emplea arena fina (entre 0,1 y 2 mm) y es importante que esta arena sea uniforme.

Es importante que el lecho no quede saturado para permitir el intercambio de gases; (para ello sólo se puede aplicar una carga máxima calculada en función de la DQO y del contenido en NTK.) Es un proceso muy fiable si se le da un mantenimiento adecuado. Puede incluso llegar a cumplir las especificaciones para generar agua con la que se puede regar sin restricciones.

⁴⁵ Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua . Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas Capítulo 18. Tecnologías Innovadoras en la regeneración y reutilización de aguas residuales. Recuperado el día: 23/10/14 URL: http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda/pdfs/Capitulo_18.pdf

⁴⁶ Muñoz, Amílcar. Caracterización de tratamiento de aguas residuales. Universidad Autónoma de Hidalgo. Monografía. Capítulo 3, 2008. Recuperado el día: 11/10/2014 URL: <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/231104/514/1/Caracterizacion%20y%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales.pdf>



b) Sistemas de lagunaje: Tecnología conocida y con muy buen fundamento histórico que se basa en la potenciación de la eutrofización, mediante la simbiosis de algas y bacterias.

La biomasa está en suspensión y se suelen emplear diversas lagunas en serie (anaerobias, facultativas y de maduración; aunque estas pueden a su vez subdividirse y actuar en paralelo).

Si se debe reutilizar el agua cobra especial importancia la fase de maduración. El sistema es capaz de lograr una buena desinfección por la acción de la radiación UV del sol (aprovechamiento de recursos naturales). Sin embargo, para asegurar que el tratamiento es efectivo es indispensable asegurar y evitar la formación de caminos preferenciales.

Se considera que los lagunajes son capaces de tratar efluentes domésticos de hasta 300 mg/L DBO₅ con rendimientos aceptables. Su principal problema es la superficie que ocupan. Se está recuperando esta tecnología (a menudo únicamente los estanques de maduración después de un tratamiento intensivo) para la regeneración de aguas residuales.

c) Zonas húmedas construidas (Wetlands): Consiste en el empleo de terrenos inundados, con profundidades promedio de 60 cm, y con plantas acuáticas emergentes. Combinan zonas anaerobias (principalmente) con aerobias y anódicas.

Se considera que el papel principal en la depuración lo llevan a cabo las colonias instaladas en la grava o arena (material de relleno) y en las raíces y rizomas de las plantas. Se emplean principalmente dos tipos, los de flujo horizontal sumergido y los de flujo vertical.

Es importante mencionar que este tipo de tratamientos son utilizados en pequeñas comunidades como tratamiento total o bien como sistema de afinado del efluente (tratamiento terciario) si no se dispone de mucho espacio.



5.6.2 Tratamientos de regeneración de aguas residuales intensivos ^{47 48}

Primeramente, es necesario remarcar porque son denominados intensivos, ya que este concepto ayuda en gran medida a diferenciar este tipo de tecnologías del resto, destacando que este tipo de tratamientos a diferencia de los descritos anteriormente tienden a presentar tiempos de operatividad mucho más bajos, así como también los caudales a tratar tienden a ser mayores.

Por lo anterior es posible inferir que este tipo de sistemas sustituyen el empleo de recursos materiales (desarrollo sustentable) por un grado mayor de automatización tecnológica que da lugar a un incremento claro en la eficiencia de la regeneración de aguas.

Así como también se debe diferenciar que la calidad obtenida en este tipo de procesos es a su vez mayor que en los tratamientos anteriormente descritos. Sin embargo, también se debe destacar que en algunos casos este tipo de tecnologías también suelen acoplar el uso de tratamientos biológicos.

A continuación, se describen algunos de los tratamientos de regeneración intensivos principales:

a) Filtros de anillas: En este proceso la filtración tiene lugar por anillas planas de material plástico provistas de ranuras. Dichas anillas están colocadas una sobre otra y comprimidas, formando el elemento filtrante. Los cruces entre las ranuras de cada par de discos adyacentes forman pasos de agua, cuyo tamaño varía según las anillas utilizadas y la situación relativa de los discos.

Los pasos de agua en un mismo tipo de anillas son máximos donde la ranura de una anilla coincide con la ranura del otro y mínimos donde esta coincide con el espacio entre dos ranuras; este paso mínimo es el que define el grado de filtración de las anillas.

⁴⁷ Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua . Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas Capítulo 18. Tecnologías Innovadoras en la regeneración y reutilización de aguas residuales.. Recuperado el día: 23/10/14 URL: http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda/pdfs/Capitulo_18.pdf

⁴⁸ Muñoz, Amílcar. Caracterización de tratamiento de aguas residuales. Universidad Autónoma de Hidalgo. Monografía. Capítulo 3, 2008. Recuperado el día: 11/10/2014 URL: <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/231104/514/1/Caracterizacion%20y%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales.pdf>



b) SBR (Reactores secuenciales discontinuos): Se trata de un desarrollo de los lodos activados en el cual las funciones de aireación, sedimentación y decantación se llevan a cabo en el mismo reactor.

Normalmente se emplea un mínimo de dos tanques de reacción para poder garantizar un tratamiento del agua en continuo. Ocupan muy poca superficie y tienen unos costes muy competitivos, generando un efluente de buena calidad fácilmente tratable para regeneración.

c) Biofísicos: Los biofísicos son reactores de biomasa fija, y consisten en discos montados sobre un eje rotatorio. Mediante esta rotación, el conjunto de discos situados en paralelo está expuesto alternativamente al aire y al agua a depurar.

Los microorganismos fijados descomponen la materia orgánica empleando procesos aerobios. El proceso es fiable y barato en cuanto a la energía empleada, y especialmente en pequeñas instalaciones bien dimensionadas el efluente es de muy buena calidad por lo que suele bastar una desinfección para la reutilización posterior.

d) Birreactores de membrana: Esta tecnología se basa en situar una membrana en el interior de un sistema de aireación (tratamiento por lodos activados). La membrana no permite el paso de los biosólidos que quedan en el reactor y se obtiene un efluente de buena calidad, fácilmente desinfectable.

Es importante destacar que este tipo de tratamientos puede alcanzar una eliminación de los patógenos de mayor tamaño.

e) Sistemas físico-químicos de coagulación-floculación: Dentro de este tipo de tecnologías se distingue el acoplamiento no solo de un sistema de operación sino de la unión de varias fases de tratamiento.

Ahora bien, básicamente son sistemas en los que mediante la adición de un reactivo se procede a la coagulación-floculación o bien se lleva a cabo una electro-coagulación (aplicación de corriente eléctrica sobre sistema electroquímico para la generación de un agente coagulante) seguido habitualmente de una filtración por arena u otro sistema (de naturaleza de clarificación de aguas).



Tienen una cierta acción desinfectante, ya que las bacterias y virus fijados a los sólidos en suspensión son eliminados con éstos.

5.6.3 Tecnologías de regeneración de aguas residuales de desinfección ^{49 50}

Primeramente, se distingue que el grado de desinfección, es decir la diferencia existente de carga microbiológica antes y después del tratamiento de aguas residuales urbanas constituye una de las bases principales para la evaluación de una regeneración de agua eficiente, ya que es directamente dependiente del futuro empleo que se le dará al agua producto.

Es también importante hacer ver que este tipo de tecnologías suelen emplearse como un medio de respaldo de los tratamientos intensivos, es decir corresponden a la etapa terminal de regeneración de las aguas.

A continuación, se describen algunos de los tratamientos de regeneración vía desinfección principales, sin embargo, es primero importante mencionar que dentro de estos tratamientos no se encuentra incluida la cloración (gas), puesto que no es recomendable para el tratamiento de las aguas residuales ya que genera muchos subproductos.

a) Ozonización: En el agua residual el ozono puede reaccionar directamente con la materia orgánica y entrar en una serie de reacciones con radicales. Parte de estas acciones tienen como efecto desinfectar el agua.

Actúa principalmente contra virus y bacterias. Al mismo tiempo reduce los olores, no genera sólidos disueltos adicionales, no es afectado por el pH y aumenta la oxigenación de los efluentes. Se genera in situ mediante equipos especializados. Si el contenido en materia orgánica es elevado, se requieren dosis comparativamente elevadas para obtener una buena desinfección.

⁴⁹ Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua . Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas Capítulo 18. Tecnologías Innovadoras en la regeneración y reutilización de aguas residuales. Recuperado el día: 23/10/14 URL: http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda/pdfs/Capitulo_18.pdf

⁵⁰ Muñoz, Amilcar. Caracterización de tratamiento de aguas residuales. Universidad Autónoma de Hidalgo. Monografía. Capítulo 3, 2008. Recuperado el día: 11/10/2014 URL: <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/231104/514/1/Caracterizacion%20y%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales.pdf>



b) Dióxido de cloro: Se considera como una de las mejores alternativas a la cloración convencional. Es un oxidante efectivo que se emplea en aguas con fenoles y elimina los problemas de olores. Al mismo tiempo tiene el inconveniente que oxida un gran número de compuestos e iones, como hierro, manganeso, y nitritos.

No reacciona con el amonio ni con el bromo. Se tiene que generar in situ debido a su inestabilidad y no genera subproductos en cantidad apreciable. Se considera un buen biocida y afecta también a las algas.

c) Radiación ultravioleta: Se basa en la acción de una parte del espectro electromagnético sobre ácidos nucleídos y proteínas, con lo que se altera la reproducción de determinados patógenos. Se emplea la radiación a 253,7 nm, que se considera la más adecuada para el proceso. Es activo especialmente contra bacterias y virus.

Se emplean lámparas de alta, media y baja presión. Hasta el momento las más utilizadas en desinfección de aguas residuales son las de baja presión. Es importante que el efluente a desinfectar tenga pocos sólidos en suspensión. Uno de los problemas más importantes de esta tecnología es el proceso de limpieza de las lámparas.

d) Ultrasonido: Este tipo de tecnologías están sustentadas en el hecho de la propagación de efectos mecánicos (sonido) en el medio acuoso, por lo tanto, se crea una sucesión de vibraciones que provoca un efecto de cavitación que destruye la membrana celular de los microorganismos y elimina sus colonias del sistema.

Es también importante remarcar que este tipo de tratamientos suelen acoplarse a las tecnologías de radiación ultravioleta, ya que el ultrasonido además del mismo efecto de cavitación, evita la formación de los restos depositados (Bofill) sobre el cristal protector de los fluorescentes ultravioleta, gracias a lo cual aumenta su eficacia germicida y se consigue mantenerlos limpios prolongadamente.



5.6.4 Tecnologías regeneración de aguas residuales de membrana ^{51 52}

Este tipo de tratamientos se encuentra basado en la separación de los contaminantes acorde a su tamaño de partícula, es importante mencionar que este tipo de tratamientos corresponden a una extrapolación de la aplicación de tecnologías de origen físico, es decir no se lleva a cabo una destrucción o transformación de los contaminantes únicamente se realiza una separación selectiva acorde a el impedimento de los poros o espacios filtrantes.

Por lo tanto, resulta fundamental destacar que dentro de la operación de estos tratamientos se tienen dos subproductos, por una parte, el concentrado el cual contiene a los contaminantes previamente separados y finalmente el agua descontaminada.

A continuación, se describen algunos de los tratamientos de regeneración vía separación membrana principal:

a) Micro filtración: Elimina los sólidos en suspensión de tamaño superior a 0,1 – 1,0 μm . Es efectiva eliminando los patógenos de gran tamaño (como Guardia y Cryptosporidium). Se suele emplear cuando la concentración de STD (Sólidos Totales Disueltos) no es problemática.

Ya que los poros de la membrana son comparativamente grandes como para filtrar partículas muy pequeñas. Más usualmente se emplea como pre tratamiento de sistemas con las membranas más delicadas, como la osmosis inversa o la nano filtración.

b) Ultrafiltración: Puede emplearse para eliminar esencialmente todas las partículas coloidales y alguno de los contaminantes disueltos más grandes (0,01 μm). Se utiliza cuando deben eliminarse prácticamente todas las partículas coloidales (incluyendo la mayor parte de microorganismos patógenos).

⁵¹ Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua . Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas Capítulo 18. Tecnologías Innovadoras en la regeneración y reutilización de aguas residuales.. Recuperado el día: 23/10/14 URL: http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda/pdfs/Capitulo_18.pdf

⁵² Muñoz, Amilcar. Caracterización de tratamiento de aguas residuales. Universidad Autónoma de Hidalgo. Monografía. Capítulo 3, 2008. Recuperado el día: 11/10/2014 URL: <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/231104/514/1/Caracterizacion%20y%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales.pdf>



Estos sistemas, capaces de eliminar bacterias y virus se suelen utilizar como pre tratamiento para sistemas de nanofiltración, hiperfiltración u osmosis inversa. Puesto que los coloides se eliminan, el agua tratada debe tener una turbidez prácticamente nula.

c) Nanofiltración: Elimina los contaminantes de tamaño superior al nanómetro ($0.001\mu\text{m}$). Las membranas de este tipo de tecnologías se emplean cuando se requiere eliminar la mayor parte de los sólidos disueltos.

La tecnología se llama también ablandamiento por membrana, ya que se eliminan del agua los iones de la dureza que tienen 2 cargas (calcio y magnesio) mejor que los que solo tienen una (sodio, potasio, cloro, entre otros).

d) Ósmosis inversa: Es una tecnología de membrana en la cual el solvente (agua) es transferido a través de una membrana densa diseñada para retener sales y solutos de bajo peso molecular.

Por lo tanto, se considera una eliminación prácticamente total de todas las sales disueltas y total de los sólidos en suspensión. Debido a esto, las membranas de osmosis inversa son la elección cuando se necesita agua muy pura o de bebida, especialmente si la fuente es agua salobre o agua de mar.

e) Electrodialísis reversible: Este tipo de tratamiento se basa en la separación de las moléculas o iones en un campo eléctrico debido a la diferencia de carga y de velocidad de transporte a través de la membrana.

Las membranas tienen lugares cargados y poros bastante estrechos (1-2 nm). En la célula de electrodialísis se sitúa un cierto número de membranas de intercambio catiónico y aniónico entre un ánodo y un cátodo de forma que cuando se aplica la corriente eléctrica los iones con carga positiva migran a través de la membrana de intercambio catiónico y viceversa.

f) Electrodesionización: Primeramente, resulta fundamental destacar que este tipo de tecnologías emplea corriente eléctrica continua como fuente de energía para la desalinización. Los iones en solución son atraídos hacia los electrodos con carga eléctrica opuesta.



Dividiendo los espacios entre electrodos mediante membranas selectivas para cationes y aniones, lo que crea compartimentos, las sales pueden ser eliminadas de la mitad de los compartimentos y concentradas en los restantes.

Ahora bien, resulta importante remarcar que una de las principales diferencias entre la electrodesionización y la electrodialisis es el contenido de los compartimentos de desalinización. Los de la electrodialisis se rellenan con resinas de intercambio iónico de lecho mezclado.

5.6.4.1 Filtración ⁵³

La filtración es una de las técnicas de separación más antiguas. Es un método físico-mecánico para la separación de mezclas de sustancias compuestas de diferentes fases (fase = componente homogéneo en un determinado estado de agregación).

Un medio filtrante poroso es atravesado por un líquido o gas (fase 1) y las partículas sólidas o gotículas de un líquido (fase 2) quedan retenidas en la superficie o en el interior del medio filtrante. En función de las fases se distinguen diferentes campos de aplicación, Filtración de:

- Partículas sólidas de líquidos (suspensiones)
- Partículas sólidas de gases
- Gotículas líquidas de gases (aerosoles)
- Gotículas de un líquido no miscible de otro líquido (emulsiones)

A modo de ejemplo es importante mencionar que mediante un filtro hidrófobo se puede filtrar p.ej. agua de combustibles. Aire u otros gases se pueden limpiar de aerosoles de agua, aceite o alquitrán. En función del problema o bien de la finalidad de la filtración, se distingue entre:

- Filtración de separación: trata de recuperar un determinado sólido de un líquido (torta de filtrado) para seguir trabajando con el sólido. Aquí no es imprescindible que todas las partículas sean eliminadas del líquido.

⁵³ Autor Desconocido. Filtración, en resumen. Recuperado el día: 17/05/15
URL: <http://www.acefesa.es/filtra/filtracion.pdf>



- Filtración clarificante: El principal objetivo consiste en que el líquido se limpie completamente de componentes indeseados o precipitados, para poder seguir trabajando con el líquido purificado.

La filtración tiene una amplia gama de aplicaciones: desde el procedimiento analítico en el laboratorio hasta aplicaciones técnicas en grandes líneas de producción. En prácticamente todas las ramas industriales se filtra – ya sea p.ej. en el análisis de alimentos, el ensayo de morteros, el análisis de humos o en el control microbiológico.

5.6.4.1.1 Tipos de filtros.

Las exigencias para el filtro son tan diferentes como lo son cada uno de los campos de aplicación; un claro ejemplo se destaca al estudiar detenidamente el proceso de tratamiento del agua residual urbana, ya que el afluente (agua cruda) es primeramente expuesta a una operación de cribado, el cual consiste en una malla filtrante de gramaje grueso con el objetivo de eliminar la mayoría de los sólidos flotantes, por otra parte en la etapa de clarificado se emplean filtros rápidos de arena para llevar a cabo la reducción de sólidos suspendidos.

Por lo que se distingue que para seleccionar el tipo de filtro y el diseño de los mismos se tienen que tener en cuenta las características químicas y físicas de la muestra a filtrar, así como el consiguiente análisis o manipulación del precipitado o del filtrado.

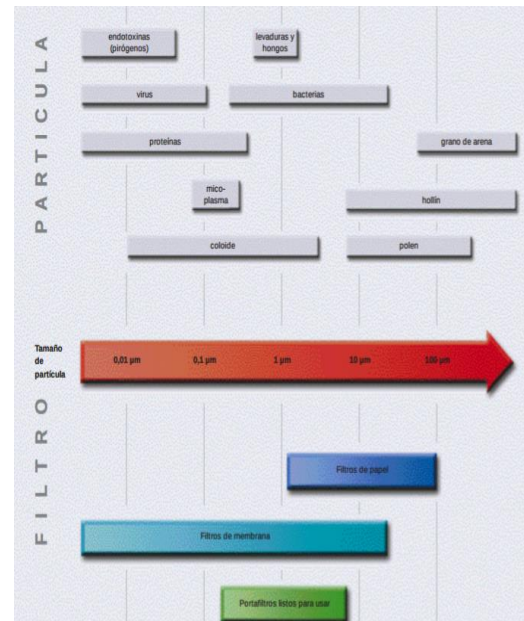
En términos generales se puede establecer que el tipo de filtro a emplear va en función tanto de las características químicas (interacción superficial con el medio y el material filtrante) del contaminante como de su tamaño de las partícula. Por dichas razones la elección del tipo de filtro más adecuado depende de muchos factores diferentes como lo pueden ser:

- La especie contaminante a eliminar
- Cantidad de contaminante
- Tamaño de partículas a separar
- Volumen de agua a tratar
- Temperatura del medio a filtrar
- Método de filtración y su respectiva eficacia



Imagen 5.4

Filtración acorde al tamaño de partícula



6.6.4.1.1 Filtración con papel.

La filtración por obstrucción con papel es una técnica de separación caracterizada por su antigüedad, eficiencia y su amplia gama de empleos, cabe destacar que su comercialización es tan amplia que inconscientemente forma parte de nuestra vida diaria al preparar un café.

Frecuentemente los filtros de papel son denominados como filtros de profundidad y tienen una elevada capacidad de retener partículas y permiten procesar grandes cantidades de muestra. Las impurezas se van acumulando a medida que avanza la filtración dentro del filtro, modificando las propiedades de filtración.

Entre las fibras dispuestas anárquicamente del filtro de profundidad se forma un lecho filtrante secundario. Esta es la razón por la que no se puede determinar una porosidad nominal para los filtros de profundidad.

5.6.4.1.1.2 Filtración con membrana.

La membrana filtra fundamentalmente en la superficie de la misma. Partículas mayores que la porosidad nominal permanecen sobre el filtro, mientras que las partículas más pequeñas pasan el filtro, a no ser que otras interacciones en el filtro retengan éstas en la matriz de la misma. La filtración es claramente más lenta que con filtros de profundidad.



5.6.4.1.1.3 Filtración por vacío o por presión.

En filtraciones sencillas únicamente la gravedad actúa sobre el proceso. Como consecuencia, los tiempos de filtración son largos. La aplicación de vacío en el lado donde se recoge el filtrado o la aplicación de presión en la parte superior del filtro acelera la filtración.

El montaje en cuestión de aparatos empleados resulta así algo más complejo, pero es una desventaja que queda claramente compensada gracias a la obtención de tasas de flujo más elevadas.

A modo de conclusión se presenta en la siguiente imagen citada los diferentes tipos de tratamientos requeridos acorde a la finalidad de aplicación del agua a tratar.

Es importante remarcar que esta imagen solamente se toma a modo de referencia y de ejemplificación debido a que en la práctica la toma de decisiones en relación a los sistemas a de tratamiento a implementar radican en la rentabilidad económica y la carga contaminante del afluente a tratar.

5.7 Integración de sistemas tecnológicos para la regeneración de aguas residuales.

Tal y como ya ha sido mencionado anteriormente; en muchas ocasiones el empleo de una sola tecnología de regeneración resulta insuficiente para alcanzar los objetivos de calidad establecidos.

Por lo tanto, se hace necesario la integración de dos o más sistemas tecnológicos de esta naturaleza, cuya selección depende directamente de los contaminantes a eliminar, así como también de la calidad objetivo del agua, sin embargo, dependiendo del diseño de montaje de los mismos se crean diversas vertientes de eficiencia.

Dentro de este punto resulta fundamental hacer ver como el futuro de la regeneración de aguas residuales, así como también la evolución de las tecnologías se orienta a lograr:

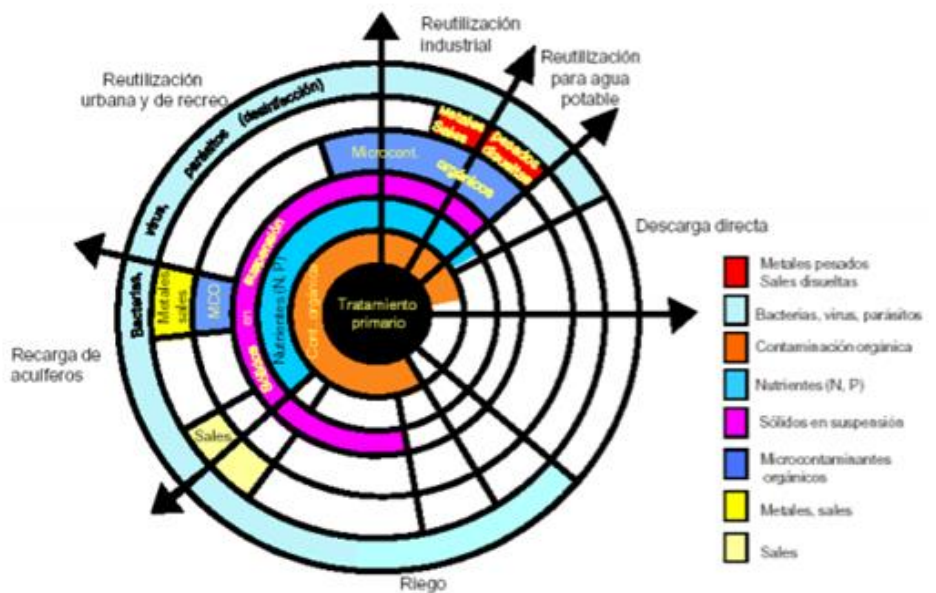
- Máxima eficiencia de regeneración de aguas residuales a un bajo coste de operación
- Empleo del espacio mínimo de los equipos de tratamiento
- Tiempos mínimos de retención del agua sin disminuir la eficiencia
- Equilibrio del desarrollo sustentable



Alcanzar dichos objetivos depende de múltiples factores como ya se ha mencionado anteriormente; sin embargo, en gran medida el equilibrio entre eficiencia de tratamiento y el rendimiento económico empresarial es quien define la elección de los equipos de regeneración; dentro de esta sección se presentará información correspondiente a:

- Integración de sistemas de tratamientos por etapas seriadas
- Acoplamiento de sistemas de tratamiento en un solo paso (logrando así un efecto sinérgico)

Imagen 5.5 “Tipos de tratamientos requeridos acorde a la finalidad de aplicación del agua a tratar.”⁵⁴



5.7.1 Integración de sistemas de tratamientos por etapas seriadas.

Referido a la integración estratégica de múltiples sistemas de regeneración para alcanzar la calidad de agua deseada, es importante definir que dichas tecnologías se encuentran colocadas en serie; es decir que el agua entra a un primer tratamiento una vez que se lleva a cabo la descontaminación por esta vía se conlleva a efectuar un segundo tratamiento el cual resulta independiente al primero.

⁵⁴ García, Juan. Universidad de Salamanca. Regeneracion y reutilizacion del agua. Sin fecha. Recuperado 15/10/2014 URL: <http://cidta.usal.es/formacion/Reutilizacion.pdf>



En muchos casos estos tratamientos seriados son el producto de una estrategia de cuidado o mantenimiento planificado de los equipos de mayor coste. Un ejemplo de lo anterior lo constituye el empleo de micro filtración como una operación previa al osmosis inversa.

Por otra parte, se encuentra que la unificación de diversas tecnologías persigue el objetivo de mejorar de manera significativa el tratamiento de regeneración de las aguas; ya que por una parte un tratamiento es afín a la eliminación de contaminantes específicos mientras que el acoplamiento con otro tipo de tecnología favorece la eliminación de contaminantes de distinta naturaleza.

Un claro ejemplo está dado por la integración de un "sistema de coagulación-floculación seguido de alguno de los métodos de desinfección descritos anteriormente, con lo que se eliminan los sólidos suspendidos seguido de la eliminación microbiológica del efluente.⁵⁵"

Sin embargo, se deben destacar que este tipo de integraciones presentan varias desventajas, generalmente relacionadas con el hecho de que la regeneración global o bien total del agua se lleva estrictamente en dos o más etapas.

Es decir, si una de las tecnologías que integran el sistema regenerador falla o bien requiere de un paro momentáneo producto de las deficiencias del mismo sistema o bien de la intercomunicación necesaria entre las múltiples tecnologías empleadas.

Por lo tanto, se tiene que el agua producto tendrá una deficiencia significativa con respecto a su calidad esperada. Para evitar este tipo de fallos se hace necesario un plan de mantenimiento, para cada uno de los procesos de tratamientos integrados al sistema de regeneración, lo que se traduce en recursos:

- Económicos
- Técnicos (mantenimiento y comunicación entre los componentes integradores)
- Tiempo de operación

⁵⁵ Rodrigo, Manuel. Cotillas, Salvador. Llanos, Javier. Miranda, Oscar. Diaz, Gerardo. Coupling UV irradiation and electro-coagulation for reclamation of urban wastewater. *Electrochimica Acta*, 2014.



Es decir, independientemente de que este tipo de instalaciones en serie requieren de un espacio considerable, los procesos de tratamiento de la regeneración de las aguas están sujetos al funcionamiento y mantenimiento adecuado de todas sus partes integradoras.

Por lo tanto, se hace necesaria la innovación tecnológica en donde la meta la constituye la máxima eliminación de contaminantes (mayor calidad de agua) en sistemas de un solo paso, temática que será descrita en el siguiente apartado.

5.7.2 Acoplamiento de sistemas tecnológicos de tratamiento en un solo paso (efecto sinérgico).

Tal y como fue descrito anteriormente hoy en día se hace presente la necesidad de buscar tecnologías capaces de ser adaptadas de tal forma que el tratamiento de regeneración de agua se lleve a cabo en un solo paso alcanzando calidades de agua iguales o bien mejores que las tratadas por los sistemas de integración en varios pasos seriales.

Resulta fundamental mencionar que al lograr el objetivo descrito anteriormente se alcanzan a su vez objetivos alternos, como lo es la reducción de tiempo de tratamiento y la minimización de espacio empleado.

Por lo cual el estudio de sistemas tecnológicos de adaptación sinérgica en un solo paso se ha transformado en la piedra angular del futuro dentro del área de la regeneración de aguas residuales urbanas.

Primeramente se hace necesario definir sinergia como: "la participación activa y la unión de varias fuerzas o causas para lograr una mayor efectividad⁵⁶", al aplicar dicha definición al área de estudio correspondiente a la regeneración de aguas.

Se dice que la sinergia tecnológica consiste en: "La sumatoria de dos o más tecnologías que en un solo paso, logran alcanzar una mayor calidad de regeneración de aguas, mismas tecnologías que de manera individual o bien integradas en serie no son capaces de generar los mismos resultados.⁵⁷"

⁵⁶ Rodrigo, Manuel. Cotillas, Salvador. Llanos, Javier. Miranda, Oscar. Diaz, Gerardo. Coupling UV irradiation and electro-coagulation for reclamation of urban wastewater. Electrochimica Acta, 2014.

⁵⁷ Sin Autor. Sinergia; Definicion.de. 2014 Recuperado el día: 01/12/2014.
URL: <http://definicion.de/sinergia/>



Por lo tanto se hace necesaria la selección de múltiples tecnologías que puedan ser integradas en un mismo sistema operativo, así como también el diseño de nuevos prototipos tecnológicos que unifiquen las tecnologías seleccionadas; en general es importante mencionar que el acoplamiento de las tecnologías intensivas con las de desinfección son las que engloban la mayor eficiencia de regeneración de aguas residuales urbanas.

Ya que el primer grupo mencionado se centra en la eliminación tanto de sólidos disueltos como los suspendidos, mientras que la segunda vertiente tecnológica tiene el objetivo de eliminar el contenido microbiológico del agua.

Es importante mencionar que un solo tipo de tecnología puede contribuir a la eliminación de varios tipos de contaminantes; ya que tiene una mayor eficiencia frente a un cierto tipo de sustancia o factor contaminante,

Sin embargo dicha tecnología puede presentar un efecto secundario sobre otros tipos de contaminantes presentes en el agua en donde su eficiencia no puede ser muy alta, sin embargo la compatibilidad y la contribución con otro tipo de tecnologías crean matrices globales para la eliminación de los contaminantes de diversas naturalezas.

Tal y como lo es el caso de la irradiación ultravioleta que suele ser empelada para la desinfección, mas también presenta cierta influencia sobre la oxidación de ciertos contaminantes o bien la eliminación de ciertos tipos de microorganismos vía separación membrana.

Por dichas razones resulta fundamental el conocimiento profundo de las tecnologías de regeneración ya que no solo se debe tener en cuenta la influencia básica o el efecto principal que conlleva un tratamiento específico sobre los contaminantes, sino que también se hace necesario el conocimiento de efectos minoritarios de las tecnologías sobre los componentes indeseables presentes en el agua.

Debido a la importancia de lo establecido anteriormente se ha construido una tabla, en donde se indican los efectos tanto principales como minoritarios de las diversas tecnologías mencionadas dentro de la sección 6.5, con respecto a las tecnologías más empleadas dentro de la regeneración de aguas residuales urbanas.

A continuación, se presenta dicha tabla la cual actúa a modo de ejemplificación para contribuir a una mejor elección de las tecnologías a integrar.



TABLA 5.4 Posible integración de sistemas sinérgicos

Tecnología	CLAVE	Clasificación	Zona de actuación primaria	Efecto secundario	Posible integración sinérgica
Filtros de anillas	F.A	T. intensivo	Sólidos Suspendidos	Microorganismos de gran tamaño	a) FA + OZ b) FA +NF + UV c) FA + UV+ OI
SBR	SBR	T. intensivo	aireación, sedimentación y decantación	Arrastre de contaminantes en el sedimento	a)SBR + MF b)SBR+FA+DCL c)SBR + EC +US
Biodiscos:	B.D	T. intensivo	Descomposición de la materia orgánica	Favorece a la floculación	a)BD+ MF + UV b)BD+ EC
Birreactores de membrana	BRM	T. intensivo	Eliminar biselados	Eliminación de patógenos de mayor tamaño	a)BRM+MF+OI b)BFM+ EC c)BFM+ F+UV
Coagulación-floculación	EC	T. intensivo	Sólidos Suspendidos	Efecto desinfectante	a) EC + UV b) EC + US c) EC + MF + OI
Electrooxidacion	EO	T. Intensivo	Carga Organica	Favorece filtracion - desinfeccion.	a)EO-FIL b) EO - UV
Ozonización⁵⁸	OZ	T. desinfección	Eliminar microorganismos	Oxidación de materia orgánica	a) OZ + MF b) OZ + ED c) OZ + EC
Dióxido de cloro	DCI	T. desinfección	Eliminar microorganismos	Elimina olores – materia orgánica no biodegradable	a) DCI + EC b) DCI + BRM c) DCI + FA
Radiación ultravioleta	UV	T. desinfección	Eliminar microorganismos	Fotoxidacion de materia orgánica	a) UV + EC b) UV + EDES c) UV+MF + BD
Ultrasonido	US	T. desinfección	Eliminar microorganismos	Limpieza de equipos complementarios	a) US + MF + OI b) US + MF +ED c) US + EC
Microfiltración	MF	T. membrana	Sólidos suspendidos	Patógenos de gran tamaño y pre tratamiento de otros sistemas	a) MF + NF b) MF + OI c) MF + ED
Ultrafiltración	UF	T. membrana	Coloides y sólidos disueltos grandes	Efecto desinfectante y pre tratamiento de otros sistemas	a) UF + EDES b) UF + UV c) UF + OZ
Nanofiltración	NF	T. membrana	Sólidos Disueltos	Separación de ciertos contaminantes emergentes	a) NF + UV b) NF + EC
Ósmosis inversa	OI	T. membrana	Sólidos disueltos y suspendidos	Eliminación de virus	a) OI + UV b) OI + ED c) OI + EDES
Electrodialisis reversible	ED	T. membrana	Iones	Ausente	a) ED + US b) ED + OZ

⁵⁸ Patiño, Kelly. Arroyave, Sandra. Marin, Juan. Oxidacion electroquimica y ozonizacion aplicadas al tratamiento de aguas de lavado de la produccion de biodisel. Informacion Tecnologica Vol 23. No. 2, 2012.



Es importante mencionar que la tabla únicamente brinda datos con respecto a los grados de actuación de las tecnologías frente a ciertos contaminantes y su posible acoplamiento, mediante esta herramienta no se pretende proponer los posibles diseños operativos a emplear.

Representa únicamente una ejemplificación práctica de los posibles sistemas que pueden ser integrados, así como también se debe de tomar en cuenta que uno de los objetivos fijados es la operatividad de los tratamientos en un solo paso, por lo tanto en muchos de los casos como lo es en las tecnologías de membrana se hace necesario llevar a cabo un pre tratamiento para el cuidado de los equipos.

Ahora bien, ya que se tienen claros los contaminantes a eliminar dentro del proceso de tratamiento, así como también la cierta compatibilidad que poseen las diversas tecnologías de regeneración de aguas, es necesario recurrir a la etapa de diseño del equipo.

Tomando en cuenta aspectos básicos como el hecho de que los procesos tanto de mantenimiento como de operación tienen que ser llevados a cabo preferentemente en una sola etapa, es decir la integración de este tipo de tratamientos posee una naturaleza híbrida no solo a la hora de operar si no también se hace necesaria la elaboración de una planificación de mantenimiento específico para el equipo tecnológico en cuestión.

Un claro ejemplo de esto se da cuando se integran las tecnologías de ultrasonido y ultravioleta, en donde la primera contribuye a mejorar la limpieza de las lámparas de UV.

Por dichas razones dentro del siguiente apartado se describe el desarrollo pre-experimental del proyecto en cuestión en donde se detalla la selección de los equipos tecnológicos a emplear acorde de las necesidades u objetivos fijados en relación a la regeneración de aguas residuales tratadas, así como también las características de los posibles diseños obtenidos producto de la unión sinérgica entre las tecnologías de electrooxidación y filtración selectiva.

Tabla 5.5 Comparación de sistemas: seriados / integrados

Tipo de Sistema	Espacio	Consumo Energetico	Eficiencia	Velocidad de tratamiento	Tiempo de retención	Inversión Inicial	Mantenimiento
Etapas [E]							
Sinérgico [S]	E>>S	E>>>S	E<<S	E<S	E>S	E<<S	E>S



5.8 Metales y la química metalúrgica.

“La historia de los metales y su conocimiento por el hombre es la historia misma del desarrollo de la humanidad. Cabe destacar que el elemento más abundante en la Tierra es el hierro, un metal.

Desgraciadamente, en la corteza terrestre la abundancia de hierro no es tan grande, aunque sí considerable: asciende a un 4.7%. Sin embargo, como la mayoría de los metales, el hierro no existe de forma nativa en la superficie de la Tierra (salvo como constituyente de meteoritos).

Para lograr obtenerlos en forma elemental, los compuestos que constituyen los metales requieren ser tratados químicamente. El procesamiento a gran escala de los minerales metálicos para obtener los metales libres recibe el nombre de *metalurgia*.

El uso de los metales resulta fundamental para nuestra vida diaria ya que es posible observarlos en una pluma o lápiz, en la mesa o en sillas de trabajo, ventanas, en un automóvil, un poste etc. Todos ellos han sido elaborados por el hombre gracias a la química metalúrgica.⁵⁹”

En la siguiente sección se presentan en detalle las fuentes y reservas naturales de los principales metales contenidos en la corteza terrestre denominada como la litosfera.

Tabla 5.6 Relación elemento químico - utilización industrial⁶⁰.

Elemento Químico	Utilización Industrial
Hierro	Maquinaria Vehículos Herramientas Vigas para construcción
Cobre	Material Eléctrico (cables) Tuberías Aleaciones
Plomo	Productos químicos Baterías Aleaciones
Zinc	Productos químicos Aleaciones
Aluminio	Carrocerías de vehículos Marcos de ventanas y puertas
Silicio	Componentes eléctricos en ordenadores
Estaño	Chapa Productos químicos Objetos

⁵⁹ Sin Autor. III La Litosfera, metales y metalurgia. Recuperado el día: 25/04/15 URL:http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/097/htm/sec_9.htm

⁶⁰ Sin autor. UNIDAD 8: La litosfera terrestre. Unidad Didáctica adaptada ciencias de la naturaleza. Recuperado el día: 30/04/15 URL:http://sauce.pntic.mec.es/1ded0003/adaptaciones%20curriculares/ccnn/1eso/u08_la_litosfera_terrestre.pdf



Por otra parte, se destaca que los minerales son de gran importancia para la economía de los países, ya que de ellos se extraen las sustancias con las cuales se fabrican los objetos que utilizamos a diario. En la tabla 5.5 se destaca la relación entre una serie de elementos con respecto a los principales usos industriales.

5.8.1 Litosfera.

“La litosfera conforma la parte sólida de la corteza terrestre. Es primordial remarcar que los elementos que en ella predominan son oxígeno (O), azufre (S), aluminio (Al), hierro (Fe), calcio (Ca), sodio (Na), potasio (K) y magnesio (Mg), de ahí que los compuestos más comunes están formados en primer lugar por oxígeno, como los óxidos.

Además de este elemento, otros contienen silicio, formando silicatos, y otros más incorporan también aluminio en los aluminosilicatos.⁶¹ Una de las clasificaciones más útiles de los elementos los agrupa en tres grandes sistemas.

1. Elementos siderófilos. Se encuentran en forma metálica como el oro (Au), el platino (Pt) y la plata (Ag).
2. Elementos calcófilos. Se encuentran en forma de sulfuros, como el hierro (Fe), el cobre (Cu), el plomo (Pb) y el mercurio (Hg).
3. Elementos litófilos. Se encuentran formando silicatos, como el aluminio (Al), el calcio (Ca) y el magnesio (Mg).

“Los ocho elementos más abundantes que forman parte de la litosfera se llaman elementos geoquímicos⁶² presentados en la tabla 5.6”.

Tabla 5.7 Distribución porcentual de elementos en la litosfera

Elemento Geoquímico	Símbolo	Porción (% en peso)
Oxígeno	O	49.50
Silicio	Si	27.72
Aluminio	Al	8.13
Hierro	Fe	5.00
Magnesio	Mg	2.09
Calcio	Ca	3.63
Sodio	Na	2.83
Potasio	K	2.59

⁶¹ Sin Autor. III La Litosfera, metales y metalurgia. Recuperado el día: 25/04/15 URL: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/097/htm/sec_9.htm

⁶² Sin autor. UNIDAD 8 La litosfera terrestre. Unidad Didáctica adaptada ciencias de la naturaleza. Recuperado el día: 30/04/15 URL: http://saucedpntic.mec.es/lded0003/adaptaciones%20curriculares/ccnn/leso/u08_la_litosfera_terrestre.pdf



Cabe destacar que los porcentajes de muchos elementos presentes en la corteza terrestre que son fundamentales para muchos equilibrios medioambientales; no son presentados en la tabla anterior puesto que los valores máxicos con respecto a los otros elementos son muy bajos.

Sin embargo, los porcentajes de abundancia para elementos metálicos como el “Níquel o el Cromo son 0.019% y 0.035%⁶³” respectivamente. Valores que resultan ser cruciales de tomar en cuenta cuando se trata de evaluar el equilibrio medio ambiental con respecto a las actividades humanas y sus posibles impactos antropogénicos.

5.8.2 Elementos - Equilibrio Ecológico

El equilibrio ecológico se define como “el resultado de la interacción de los diferentes factores del ambiente, que hacen que el ecosistema se mantenga con cierto grado de estabilidad dinámica.

La relación entre los individuos y su medio ambiente determinan la existencia de un equilibrio ecológico indispensable para la vida de todas las especies, tanto animales como vegetales⁶⁴”.

Como se mencionó anteriormente los porcentajes citados corresponden a las cantidades ideales o adecuadas para el buen equilibrio de los sistemas ecológicos; a modo de ejemplo se tiene que se le llaman “elementos químicos esenciales a una serie de elementos químicos que se consideran esenciales para la vida o para la subsistencia de organismos determinados.

Para que un elemento se considere esencial, este debe cumplir ciertas condiciones:

- La ingesta insuficiente del elemento provoca deficiencias funcionales, reversibles si el elemento vuelve a estar en las concentraciones adecuadas.
- Sin el elemento, el organismo no crece ni completa su ciclo vital.

⁶³ Lennech Elementos químicos ordenados por su abundancia. 1998-2015. Recuperado el día: 03/05/15 URL: <http://www.lenntech.es/tabla-peiodica/abundancia.htm>

⁶⁴ Sin Autor. ¿Qué es Equilibrio Ecológico?, Enciclopedia de Tareas. Recuperado el día: 04/05/15 URL: <http://www.enciclopediadetareas.net/2012/05/que-es-el-equilibrio-ecologico.html>



- El elemento influye directamente en el organismo y está involucrado en sus procesos metabólicos.
- El efecto de dicho elemento no puede ser reemplazado por ningún otro elemento.⁶⁵

A modo de ejemplificar la importancia de los metales para los ciclos biológicos se citan a continuación los elementos o especies indispensables para el sano desarrollo de una planta se divididos en: macro y micro nutrientes, cabe destacar que el equilibrio entre la disposición de estos nutrientes y su concentración juegan un papel fundamental en el metabolismo celular y el sano crecimiento de las plantas.

En las tablas citadas a continuación se presentan los 17 elementos esenciales para sustentar la vida de las plantas y las formas químicas de los metales en el suelo con respecto a su disponibilidad relativa para las plantas; respectivamente.

TABLA 5.8:
Elementos
esenciales para las
plantas⁶⁶

	ELEMENTO	CONC	FORMA DE ABSORCION
Macro - Elementos	Carbono	45%	CO ₂
	Hidrogeno	6%	H ₂ O - H ⁺
	Oxigeno	44%	CO ₂ - SO ₄ ⁼
	Nitrógeno	1 - 3 %	NO ₃ ⁻ - NH ₄ ⁺
	Fosforo	0.1 - 0.3 %	PO ₄ ⁼ HPO ₄ ⁼ H ₂ SO ₄ ⁼
	Potasio	1 - 5 %	K ⁺
	Calcio	0.1 - 0.2 %	Ca ⁺²
	Azufre	0.1 - 1.5 %	SO ₄ ⁼
	Magnesio	0.05 - 0.1 %	Mg ⁺²
E - I *	Hierro	100- 1000 ppm	Fe ⁺² - Fe ⁺³
Micro- Elementos	Zinc	10 - 20 ppm	Zn ⁺²
	Manganeso	50 -300 ppm	Mn ⁺²
	Boro	50- 300 ppm	BO ₃ ⁼ HBO ₃ ⁼ H ₂ BO ₃ ⁼
	Cobre	10 - 40 ppm	Cu ⁺²
	Molibdeno	10 - 40 ppm	MoO ₄ ⁼
	Cloro	0.05 - 0.1 %	Cl ⁻
	Sodio	0.05 - 0.1 %	Na ⁺

*Elemento Intermedio

⁶⁵ Castillo,M. Elementos Esenciales en las plantas. Ciencia, Agricultura y Ecología.2011. Recuperado el día: 03/05/15 URL: <http://ecoloagro.blogspot.mx/2011/05/elementos-esenciales-en-las-plantas.html>

⁶⁶ Castillo,M. Elementos Esenciales en las plantas. Ciencia, Agricultura y Ecología.2011. Recuperado el día: 03/05/15 URL: <http://ecoloagro.blogspot.mx/2011/05/elementos-esenciales-en-las-plantas.html>



Tabla 5.9 “Formas químicas de los metales en el suelo y su disponibilidad relativa para las plantas⁶⁷”.

Formas de Retención en el suelo	Disponibilidad Relativa
Ion en la disolución del suelo	Fácilmente disponible
Ion en complejo de intercambio orgánico o inorgánico	Disponible
Metales compleja dos o quilatados por compuestos orgánicos	Menos disponible
Metal precipitado o precipitado	Disponible solo si ocurre una alteración química
Incorporado en la matriz biológica	Disponible después de la descomposición
Metal en la estructura mineral	Disponible después de la alteración mineral

El ejemplo citado anteriormente permite analizar la estrecha línea de equilibrio entre las concentraciones de metales, mecanismos y formas de absorción. En base a estos datos es posible destacar la importancia que juega el control de las cargas metálicas disueltas en el agua.

Puesto que un incremento gradual y descontrolado de dichos contaminantes no solo impactará en el desarrollo de la flora ya que existe una concentración la cual al ser rebasada se desarrollan efectos tóxicos que degradan la calidad de vida del ser vivo en cuestión.

Por otra parte, la acumulación de metales en los tejidos vegetativos trae consigo un efecto cadena de contaminación cruzada tras el consumo (animales de ganado) de las plantas expuestas a la contaminación.

Tal y como se muestra en la imagen 7.5 del ciclo de ruta de exposición del Cadmio, el cual "es tóxico y el envenenamiento se produce al inhalarlo o ingerirlo, tiene gran tendencia a formar compuestos complejos acuosos en los

⁶⁷ A, Roca. Contaminación de suelos por metales pesados. Centro de Investigaciones Agrarias de Mabegondo. INGACAL. Xunta de Galicia. Recuperado el día: 28/04/15
URL: http://www.infoagro.com/abonos/contaminacion_suelos_metales_pesados.htm



que se une de uno a cuatro ligandos. Sus compuestos más importantes en la industria son el cianuro, la amina y varios complejos de haluros^{68 69}.

Imagen 5.6 “Ciclo de exposición: Cadmio⁷⁰”



A fin de analizar más fondo las consecuencias que conlleva la contaminación de metales pesados; en la siguiente sección de este trabajo se detallara a fondo su correspondiente definición, sus características más trascendentales, los principales procesos generadores, toxicidad e impactos medioambientales.

⁶⁸ Sin Autor. Contaminación del agua por metales. Centro Virtual de Información del Agua. Recuperado el día: 25/04/2015
URL: http://www.agua.org.mx/h2o/index.php?option=com_content&view=article&id=3218:contaminacion-del-agua-por-metales&catid=1291:saneamiento-basico&Itemid=100148

⁶⁹ Sin Autor. Metales Pesados. Instituto Nacional de Ecología y cambio climático, México
Recuperado: 25/04/15 URL: <http://www.inecc.gob.mx/sqre-temas/763-aqr-metales>

⁷⁰ Gonzalez, Diego. Definiciones de interés en toxicología. Recuperado el día: 10/05/15
URL: http://www.bvsde.paho.org/bvstox/e/cursos/peru_julio07/dia04/03_Gonzalez.pdf



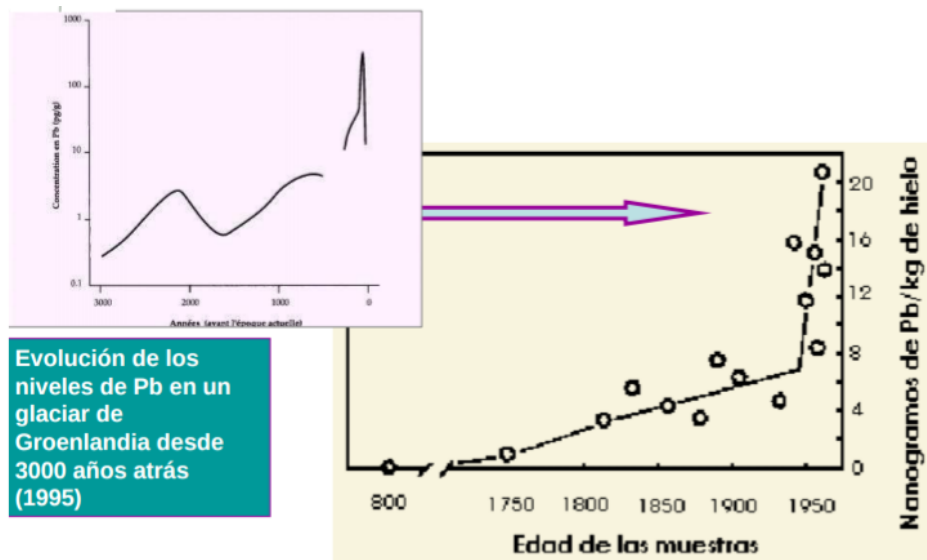
5.8.3 Metales pesados.

“Estrictamente los metales pesados están constituidos por elementos de transición y post-transición incluyendo algunos metaloides como el arsénico y selenio. Estos elementos tienen una gravedad específica significativamente superior a la del sodio, calcio, y otros metales ligeros.

Por otro lado, estos elementos se presentan en diferente estado de oxidación en agua, aire y suelo y presentan diversos grados de reactividad, carga iónica y solubilidad en agua.⁷¹”.

A modo de ejemplificación en la imagen 7.6 se muestra la “evolución histórica de los niveles de contaminación por Plomo en depósitos de hielo⁷²”, claramente se puede apreciar como dicho contaminante tiende a acumularse de manera continua a través del tiempo.

Imagen 5.7 Evolución histórica de los niveles de contaminación por Plomo en depósitos de hielo.



⁷¹ Sin Autor. Contaminación del agua por metales. Centro Virtual de Información del Agua. Recuperado el día: 25/04/2015
URL: http://www.agua.org.mx/h2o/index.php?option=com_content&view=article&id=3218:contaminacion-del-agua-por-metales&catid=1291:saneamiento-basico&Itemid=100148

⁷² Sin Autor. Contaminación por metales. Recuperado: 09/05/15
URL: http://www2.uah.es/tejedor_bio/bioquimica_ambiental/T11-metales.pdf



Por otra parte una forma opcional de nombrar al grupo de metales pesados es como “elementos tóxicos”, los cuales, de acuerdo a la lista de contaminantes prioritarios de la “Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), incluyen a los siguientes elementos: Arsénico, cromo, cobalto, níquel, cobre, zinc, plata, cadmio, mercurio, titanio, selenio y plomo.⁷³”

Cabe destacar que dentro de las principales razones por las cuales los metales pesados son considerados tan dañinos para los sistemas biológicos se encuentran:

1. “Entran en la cadena alimenticia y se acumulan en los tejidos grasos de los seres vivos.
2. Son altamente tóxicos
3. Se evaporan y viajan distancias en el aire y en el agua lo que hace aún más difícil el control y la determinación del grado de contaminación en áreas con precisión.
4. Son persistentes, en otras palabras, duran años o bien largos periodos de tiempo den degradarse en compuestos menos dañinos.⁷⁴”

5.8.3.1 Principales fuentes de emisión y generación ^{75 76}

“Los metales pesados se encuentran en forma natural en la corteza terrestre. Estos se pueden convertir en contaminantes si su distribución en el ambiente se altera mediante actividades humanas.⁷⁷”

En general esto puede ocurrir durante la extracción minera, el refinamiento de productos mineros o por la liberación al ambiente de efluentes industriales y emisiones vehiculares.

Además, la inadecuada disposición de residuos metálicos también ha ocasionado la contaminación del suelo, agua superficial y subterránea y de ambientes acuáticos.

⁷³ Sin Autor. EPA. Heavy Metals Removal from Contaminated Water Solutions. Recuperado el día: 03/05/15 URL:<http://cfpub.epa.gov/ncer/abstracts/index.cfm/fuseaction/display.abstractdetail/abstract/5291/report/0>

⁷⁴ Sin autor. 3. Introducción, 3.1 Contaminación por metales pesados. Recuperado el día: 28/04/15 URL:http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lbi/lobos_s_vn/capitulo3.pdf

⁷⁵ Sin Autor. Contaminación del agua por metales. Centro Virtual de Información del Agua. Recuperado el día: 25/04/2015 URL:http://www.agua.org.mx/h2o/index.php?option=com_content&view=article&id=3218:contaminacion-del-agua-por-metales&catid=1291:saneamiento-basico&Itemid=100148

⁷⁶ Sin Autor. Metales Pesados. Instituto Nacional de Ecología y cambio climático, México. Recuperado: 25/04/15 URL:<http://www.inecc.gob.mx/sqre-temas/763-aqre-metales>

⁷⁷ Sin Autor. III La Litosfera, metales y metalurgia. Recuperado el día: 25/04/15 URL:http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/097/htm/sec_9.htm



Tanto las fuentes naturales como antropogénicas pueden contribuir importantemente a la emisión de elementos metálicos a la atmósfera. Cabe señalar que, al comparar las emisiones globales, la emisión de elementos como selenio, mercurio y manganeso se realizan en su mayoría por fuentes naturales.

Sin embargo, en el plano regional las fuentes antropogénicas pueden contribuir de manera importante y estos metales se convierten en contaminantes en la escala local.

Entre las principales fuentes de emisión de los metales de mayor preocupación en México se tiene:

Mercurio

- “Actividades mineras de extracción de oro, plata y cobre.”⁷⁸”
- Fundición primaria y secundaria de metales.
- Producción de carbón y coque.
- Combustión de combustóleo y carbón en la generación de electricidad.
- “Industrial de cloro-sosa.”⁷⁹”
- Incineración de residuos peligrosos y biológico infecciosos.

Plomo

- Fundición primaria y secundaria de metales.
- Loza vidriada
- Producción de pinturas
- Elaboración de latas soldadas con plomo
- Industria electrónica y de cómputo
- “Uso de gasolina con plomo”⁸⁰”

⁷⁸ PNUMA. Modulo 3. El uso del mercurio en la minería del oro artesanal y en pequeña escala. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2008. Recuperado el día: 12/05/15

URL:http://www.unep.org/chemicalsandwaste/Portals/9/Mercury/AwarenessPack/Spanish/UNEP_Mod3_Spanish_Web.pdf

⁷⁹ Castellan, Gilbert. Equilibrio en celdas electroquímicas; Electrodo de mercurio-óxido mercúrico. 1987 pg. Segunda Edición 408.

⁸⁰ William, J. Kolb, D. Química para el nuevo milenio. Octava Edición 1999. pp 356-358.



Cadmio

- Baterías Recargables de Níquel/Cadmio ⁸¹
- Fertilizantes
- “Pigmentos y Estabilizadores en Plástico y PVC⁸²”
- “Pigmentos en Pinturas⁸³”
- Galvanización
- Catalizadores y Conservadores en la Industria del Plástico
- Elaboración de Pinturas
- Aleaciones

5.8.4 Contaminación del agua por metales.

“Las aguas procedentes de las industrias como la minera, la de recubrimientos metálicos, las fundidoras y otras empresas más contaminan el agua con diversos metales.

Cabe resaltar que las sales de metales como el plomo, el zinc, el mercurio, la plata, el níquel, el cadmio y el arsénico son muy tóxicas para la flora y la fauna terrestres y acuáticas.⁸⁴”

Tal y como sucedió el “el 6 de agosto de 2014 fueron derramados 40,000 metros cúbicos de sulfato de cobre acidulado en el arroyo Tinajas, municipio de Cananea, Sonora, provenientes de la minera Buenavista del Cobre, subsidiaria de Grupo México, una de las empresas más grandes del sector a nivel internacional.

Según la versión del gobierno federal –fundamentada en un dictamen técnico–, el derrame se ocasionó por la falla en el amarre de un tubo de polietileno, en una de las piletas de lixiviados, así como por la falta de una válvula de alivio en la piletta de demasías.

Derrame mostrado en la imagen 7.7. Los contaminantes detectados con las revisiones son cobre, arsénico, aluminio, cadmio, cromo, fierro, manganeso y plomo.

⁸¹ A, Steven. F. Beck. P. Clark. A. Keeley. R. Ludwig. R. Ross. R. Wilkin. EPA: NRMLM, Performance Evaluation of Organic Carbon Substrate and Limestone-Based PRB for Treatment of Heavy Metals, Arsenic, and Acidity. Recuperado el día: 03/05/15. URL: http://www.epa.gov/ada/gw/pdfs/research_02.pdf

⁸² Gonzalez, Diego. Cadmio. Recuperado el día: 12/05/15 URL: <http://www.bvsde.paho.org/texcom/cd051461/gonzalca.pdf>

⁸³ Gonzalez, Diego. Cadmio. Recuperado el día: 12/05/15 URL: <http://www.bvsde.paho.org/texcom/cd051461/gonzalca.pdf>

⁸⁴ Eróstequi, Carlos. Contaminación por metales pesados. Rev Cient Cienc Méd v.12 n.1 Cochabamba 2009. Recuperado el día: 12/05/15 URL: http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1817-74332009000100013



Imagen 5.8 “Derrame de sulfato de cobre en Sonora.⁸⁵”



La contaminación afectó 17.6 kilómetros del arroyo Tinajas, 64 kilómetros del río Bacanuchi, y 190 kilómetros del río Sonora. La sustancia llegó hasta la Presa el Molinito que, de acuerdo con el titular de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat).⁸⁶

Cabe destacar que la norma oficial mexicana: “NOM-002-ECOL-1996 contra la contaminación ambiental, publicada en el Diario Oficial del 18 de octubre de 1993⁸⁷”, considera metales contaminantes del agua (en orden de importancia por su abundancia) a:

Aluminio	Manganeso	Estaño
Plata	Níquel	Boro
Cadmio	Zinc	Molibdeno
Arsénico	Magnesio	Tungsteno
Cobre	Antimonio	Germanio
Fierro	Cromo	Bismuto
Mercurio	Selenio	Plomo
Cobalto	Titanio	Telurio
Vanadio	Berilio	

⁸⁵ Noticiero Televisa. Supervisan zona donde se derramó sulfato de cobre en Sonora. Noticia: 14/08/2015. Recuperado: 12/05/15 URL:<http://noticieros.televisa.com/mexico-estados/1408/supervisan-zona-donde-se-derramo-sulfato-cobre-sonora/>

⁸⁶ Cisneros, Jose. Derrame en el río Sonora: lo que sabemos y lo que no sobre el caso. CNN Mexico. Noticia publicada el: 28 de agosto de 2014. Recuperado: 12/05/15. URL:<http://mexico.cnn.com/nacional/2014/08/28/derrame-en-el-rio-sonora-lo-que-sabemos-y-lo-que-no-sobre-el-caso>

⁸⁷ SEGOB. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Diario Oficial de la Federación. Recuperado: 12/05/15. URL: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4881304&fecha=03/06/1998



La consulta de la norma oficial mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996 ofrece valiosa información en relación a los límites máximos permisibles de contaminantes en afluentes comerciales, domésticos e industriales que serán descargados al sistema de alcantarillado en promedios mensuales, diarios e instantáneos.

Dicha norma rige un control específico con respecto a la concentración de metales tales como el cobre, níquel, zinc y el mercurio todos estos citados en la tabla 7.5 presentada a continuación.

Es importante remarcar que a pesar de que una empresa se encuentre dentro de los límites máximos permisibles de descarga de un metal como el cobre esta representa una fuente de contaminación con un impacto ambiental determinado, puesto que la norma permite una descarga promedio mensual de 10 miligramos por litro de descarga.

Si nos encontramos hablando de una empresa que descarga un metro cúbico de agua por día nos encontramos con una contaminación de 10 gramos de cobre que entran al sistema de alcantarillado.

Lo cual representa un problema puesto que como se ha estipulado anteriormente los tratamientos de aguas residuales urbanas no están adaptados para una remoción eficiente de la carga metálica, por lo que gran parte del cobre terminara incorporándose a cuerpos acuíferos, causando un desequilibrio ambiental.

Tabla 5.10 Límites Máximos Permisibles de la NOM-002-SEMARNAT-1996

PARAMETROS (miligramos por litro, excepto cuando se especifique otra)	Promedio Mensual	Promedio Diario	Instantáneo
Grasas y Aceites	50	75	100
Sólidos Sedimentables	5	7.5	10
Arsénico Total	0.5	0.75	1
Cadmio Total	0.5	0.75	1
Cianuro Total	1	1.5	2
Cobre Total	10	15	20
Cromo Hexavalente	0.5	0.75	1
Mercurio Total	0.01	0.015	0.02
Níquel Total	4	6	8
Plomo Total	1	15	2
Zinc Total	6	9	12



5.8.4.1 Contaminación del agua por metales pesados: plomo, mercurio y cadmio.

Las sales solubles en agua de los metales pesados como el plomo, cadmio y mercurio son muy tóxicas y acumulables por los organismos que los absorben, los cuales a su vez son fuente de contaminación de las cadenas alimenticias al ser ingeridos por alguno de sus eslabones.

Al ser ingeridos por el hombre en el agua y alimentos contaminados por los compuestos de mercurio, plomo o cadmio le provocan ceguera, amnesia, raquitismo, miastenia o hasta la muerte.

A continuación, se detallarán brevemente las principales características de ciertos metales pesados. La contaminación por metales puede derivar en diversos efectos a la salud y al ambiente, dependiendo del elemento en particular. Los efectos a la salud y al ambiente para los elementos metálicos de mayor preocupación en México se enlistan a continuación⁸⁸:

5.8.4.1.1 Plomo^{89 90}

El plomo es un metal escaso, se calcula en un 0.00002 % de la corteza terrestre, tiene un punto normal de fusión de 327.4 °C, un punto normal de ebullición de 1770 °C y una densidad de 11.35 g/mL.

Forma compuestos con los estados de oxidación de +2 y +4, siendo los más comunes los del estado de oxidación +2.

“El plomo es anfótero por lo que forma sales plumbosas y plúmbicas, así como plumbitos y plumbatos. Se encuentra en minerales como la galena (sulfuro de plomo, PbS) que se utiliza como fuente de obtención del plomo, la anglosita (sulfato de plomo II, PbSO₄) y la cerusita (carbonato de plomo, PbCO₃).⁹¹”

Gran parte del plomo se obtiene por reciclado de chatarras como las placas de baterías y de las escorias industriales como soldaduras, metal para cojinetes, recubrimientos de cables, etc.

⁸⁸ Sin Autor. Contaminación del agua por metales. Centro Virtual de Información del Agua. Recuperado el día: 25/04/2015 URL: http://www.agua.org.mx/h2o/index.php?option=com_content&view=article&id=3218:contaminacion-del-agua-por-metales&catid=1291:saneamiento-basico&Itemid=100148

⁸⁹ Sin Autor. Contaminación del agua por metales. Centro Virtual de Información del Agua. Recuperado el día: 25/04/2015 URL: http://www.agua.org.mx/h2o/index.php?option=com_content&view=article&id=3218:contaminacion-del-agua-por-metales&catid=1291:saneamiento-basico&Itemid=100148

⁹⁰ Sin Autor. Metales Pesados. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, México. Recuperado: 25/04/15 URL: <http://www.inecc.gob.mx/sqre-temas/763-aqre-metales>

⁹¹ Higuera, Pablo. Oyarzun, Roberto. Maturana, Hugo. Minería y toxicología. Universidad de Castilla la Mancha. Recuperado el día: 11/05/15 URL: http://www.uclm.es/users/higuera/mam/Mineria_Toxicidad4.htm#Cd



La contaminación del agua por plomo no se origina directamente por el plomo sino por sus sales solubles en agua que son generadas por las fábricas de pinturas, de acumuladores, por alfarerías con esmaltado, en fototermografía, en pirotécnica, en la coloración a vidrios o por industrias químicas productoras de tetraetilo de plomo (se usa como antidetonante en gasolinas) y por algunas actividades mineras, etc.

Las dos principales vías de acceso de los compuestos de plomo al organismo son el tracto gastrointestinal y los pulmones. Cerca del 10 % del plomo ingerido es excretado en la orina y en menor cantidad en el sudor, en el pelo y en las uñas.

El 90 % del plomo que se encuentra en el cuerpo humano se deposita en el esqueleto óseo y es relativamente inerte, y el que pasa a través del torrente sanguíneo puede depositarse en los tejidos. "El particulado fino de plomo (10-100 μm) puede ser extremadamente peligroso por las siguientes razones:

- Se adhiere más fuertemente a la piel.
- Es más soluble que el particulado grueso en el tracto gastrointestinal.
- Es fácilmente absorbible a través del sistema respiratorio.⁹²

Los signos más comunes de intoxicación por plomo son los gastrointestinales y sus síntomas comprenden anorexia, náusea, vómito, diarrea y constipación, seguida de cólicos.

El plomo puede afectar la síntesis de la hemoglobina y el tiempo de vida media de los glóbulos rojos, así como, al sistema nervioso central y periférico. La contaminación por el plomo en los riñones produce cambios en las mitocondrias e inflamación de las células del epitelio del túbulo proximal y alteraciones funcionales que provocan aminoaciduria, glucosuria e hiperfosfaturia: síndrome de Fanconi⁹³.

"Todos los compuestos de plomo son tóxicos en diferente grado, dependiendo de su naturaleza química y grado de solubilidad de cada compuesto, los más tóxicos son los compuestos orgánicos.

Desde hace mucho tiempo se sabe que el plomo es venenoso, tiene efectos tóxicos para las plantas, el plancton y demás organismos acuáticos. Los compuestos de plomo en los peces les origina la formación de una película coagulante y les

⁹² Higuera, Pablo. Oyarzun, Roberto. Maturana, Hugo. Minería y toxicología. Universidad de Castilla la Mancha. Recuperado el día: 11/05/15 URL: http://www.uclm.es/users/higuera/mam/Mineria_Toxicidad4.htm#Cd

⁹³ Valverde, Carlos. Síndrome de Fanconi. Presentación de caso y revisión de la literatura. Salud univorte. Barranquilla. Col. 14(1) 14-22. 1999. Recuperado el día: 11/05/15 URL: <http://rcientificas.univorte.edu.co/index.php/salud/article/viewFile/4210/2589>



provoca alteraciones hematológicas. En el hombre provoca saturnismo, enfermedad que engloba trastornos nerviosos, digestivos y renales⁹⁴.

“La Organización Mundial de la Salud recomienda que para los niños el nivel de plomo en sangre no debe rebasar los 30 mg/100 mL de sangre y tomar medidas drásticas cuando el nivel de plomo en la sangre de los adultos alcanza los 40 mg/100 mL de sangre.

Limitan la exposición a compuestos inorgánicos de plomo a 50 mg/m³ de aire durante un tiempo promedio de 8 horas para un trabajador sin mascarilla para respirar. Las medidas sanitarias para controlar la exposición a compuestos de plomo recomiendan el uso de ventilación, de mascarillas para respirar y ropa apropiada.⁹⁵”

5.8.4.1.2 Mercurio ^{96 97}

El mercurio se ha visto siempre con fascinación y asombro porque es el único metal líquido en condiciones ambientales. El mercurio líquido no es venenoso pero sus vapores y sus compuestos son muy tóxicos, por lo que en la Edad Media se utilizaban como agentes de asesinato y de suicidio.

Como el mercurio y sus compuestos son casi insolubles en agua no eran considerados, durante mucho tiempo, como contaminantes y mucho menos como contaminantes potenciales. El mercurio se utilizaba como componente de las amalgamas dentales.

“En 1967 el reporte del envenenamiento de 111 personas y la muerte de otras 45 en la Bahía de Minamata, en la región costera de Japón, hizo que se pusiera atención a los compuestos de mercurio. Los pescadores, sus familias y sus gatos fueron afectados por una misteriosa enfermedad que les debilitaba los músculos, les afectaba la visión, les producía retraso mental y en ocasiones parálisis y hasta la muerte.

Encontraron que las aguas que recibía de las industrias (como la que fabricaba el cloruro de polivinilo, PVC) la Bahía, contenía compuestos de mercurio como el metilmercurio, H₃C-Hg-CH₃, que también era usado en pesticidas y

⁹⁴ Valverde, Carlos. Síndrome de Falconi. Presentación de caso y revisión de la literatura. Salud uninorte. Barranquilla. Col. 14(1) 14-22. 1999. Recuperado el día: 11/05/15

URL: <http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/salud/article/viewFile/4210/2589>

⁹⁵ Higuera, Pablo. Oyarzun, Roberto. Maturana, Hugo. Minería y toxicología. Universidad de Castilla la Mancha. Recuperado el día: 11/05/15 URL: http://www.uclm.es/users/higuera/mam/Mineria_Toxicidad4.htm#Cd

⁹⁶ Sin Autor. Contaminación del agua por metales. Centro Virtual de Información del Agua. Recuperado el día: 25/04/2015 URL: http://www.agua.org.mx/h2o/index.php?option=com_content&view=article&id=3218:contaminacion-del-agua-por-metales&catid=1291:saneamiento-basico&Itemid=100148

⁹⁷ Sin Autor. Metales Pesados. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, México. Recuperado: 25/04/15 URL: <http://www.inecc.gob.mx/sqre-temas/763-aqre-metales>



fungicidas. Encontraron concentraciones de hasta 2000 ppm de mercurio en los sedimentos y de 1.6 a 3.6 ppb en el agua.⁹⁸.

En la imagen 7.8 se muestra la ubicación de la fábrica Chisso principal fabrica responsable de las altas descargas de mercurio en las aguas de la Bahía Minamata. Es importante hacer ver que la propia estructura geográfica de la bahía genera puntos muertos, es decir zonas en donde el flujo del agua tiene velocidades muy bajas, por lo que la exposición a los seres vivos se incrementa significativamente.

Imagen 5.9 “Contaminación en Bahía de Minamata⁹⁹”



Posteriormente, los investigadores encontraron que el mercurio y algunos compuestos inorgánicos de mercurio pueden ser metilados (formar metilmercurio, $H_3C-Hg-CH_3$, es muy venenoso) por bacterias anaerobias en el

lodo del fondo de los lagos y también por los peces y los mamíferos.

Por lo que, los desechos que contienen mercurio o sus derivados que se han ido acumulando en los fondos fangosos de los lagos constituyen fuentes potenciales de contaminación y por procesos bioquímicos pueden incorporarse a las diversas cadenas alimenticias.

Además los compuestos de mercurio son del tipo de sustancias acumulables en los organismos y pueden llegar a alcanzar concentraciones lo suficientemente altas para ser venenosos.

La contaminación del agua por mercurio es producido por industrias químicas que producen cloro, fábricas de fungicidas y de pinturas contra hongos, de plásticos, por minas de cinabrio (sulfuro de mercurio, HgS), en la extracción de oro y de plata por el método de amalgamación y por las refinerías del petróleo.

⁹⁸ Sin Autor. Contaminación por metales. Recuperado: 09/05/15
URL:http://www2.uah.es/tejedor_bio/bioquimica_ambiental/T11-metales.pdf

⁹⁹ Sin Autor. Mapa en inglés de la ubicación de la Empresa Chisso y su relación con el río y bahía de Minamata. Wikipedia. Recuperado: 11/05/15
URL:http://es.wikipedia.org/wiki/Enfermedad_de_Minamata#/media/File:Minamata_map_illustrating_Chisso_factory_effluent_routes2.png



Se considera que la mitad del mercurio extraído es arrojado al medio ambiente, una parte en forma de vapor a la atmósfera y otra en los desechos industriales al suelo y al agua.

Por ejemplo, en la "electrólisis del cloruro de sodio en solución se utiliza el mercurio como electrodo y cuando en la sal muera (solución concentrada de cloruro de sodio)¹⁰⁰" disminuye su concentración, es desechada a las alcantarillas.

Estos desechos contienen mercurio y siguen el curso del agua hasta llegar a los lagos, ríos y hasta el mar, donde pueden incorporarse a las diferentes cadenas alimenticias, reaccionar y transformarse en metilmercurio. Luego el hidróxido de sodio obtenido que está contaminado por mercurio se utiliza como materia prima de otros procesos.

"En la agricultura se usan fungicidas de compuestos organomercuriales como el 2-cloro-4-hidroxifenilmercurio y el acetato de 2-(fenil-mercuriamino) etanol, y fungicidas de follaje como el acetato de 2-(fenil-mercuriamino)etanol. El cloruro mercúrico, HgCl_2 , es muy venenoso y peligroso por su gran solubilidad en agua (71.5 g/L a 25 °C). El fulminato mercúrico, $\text{Hg}(\text{ONC}_2)_2$, es soluble en agua, en solventes orgánicos y se usa como detonador de explosivos. El acetato fenilmercúrico se usa en pinturas látex como conservador y como contra el ataque de hongos o el enmohecimiento.¹⁰¹"

"Los compuestos de mercurio son muy tóxicos a ciertas concentraciones, en los peces ocasionan alteraciones en los epitelios branquiales y dérmicos y hasta la muerte.

En el hombre los compuestos de mercurio provocan alteraciones en la mucosa intestinal e inhibición de ciertas enzimas; y en las mujeres embarazadas puede provocar trastornos teratogénicos graves, también se considera que puede producir alteraciones genéticas, lesiones renales y del sistema nervioso central y hasta la muerte.

También ocurren efectos tóxicos por inhalación de vapor de mercurio, el cual daña especialmente el sistema nervioso. Las exposiciones leves están caracterizadas por pérdida de la memoria, temblores, inestabilidad emocional (angustia e irritabilidad), insomnio e inapetencia.

A exposiciones moderadas, se observan desórdenes mentales más importantes y perturbaciones motoras, así como afecciones renales. Las exposiciones breves a altos niveles de vapor de mercurio pueden producir daños

¹⁰⁰ Castellan, Gilbert. Equilibrio en celdas electroquímicas; Electrodo de mercurio-óxido mercúrico. 1987 pg. Segunda Edición 408.

¹⁰¹ EPA. Capítulo 15: Fungicidas. Recuperado: 11/05/15

URL: <http://www.epa.gov/oppead1/safety/spanish/healthcare/handbook/Spch15.pdf>



pulmonares y la muerte. El empleo de cosméticos y medicamentos que contienen mercurio, es una fuente adicional de exposición.¹⁰²

Algunos compuestos de mercurio alcanzan una considerable biomagnificación en las plantas e invertebrados acuáticos y en los peces, de los cuales se tiene algunos ejemplos a continuación:

Tabla 5.11 Relación de compuesto - biomagnificación¹⁰³

Compuesto / Especie	Biomagnificación
Mercurio inorgánico y cloruro mercúrico	8537
Algas	70
Lenteja de agua	664
Caracoles de laguna	795
Camarones	333
Mosca de mayo	38
Trucha arco iris	5 – 26
Acetato de fenilmercurio	
Caracol de laguna	1280
Pulga acuática	3570
Mosca de mayo	900
Cloruro de metilmercurio	
Lucio (hígado)	2000
Trucha arco iris (cuerpo entero)	4225 - 8033

Los compuestos “alquilmercúricos son muy tóxicos y de larga duración, son de efectos destructivos del cerebro y del sistema nervioso central, donde tienden a acumularse. Se usaban como desinfectantes de semillas pero se prohibió el uso de todos los derivados del mercurio en la agricultura. Sólo se permite el uso del cloruro mercúrico y mercurioso para controlar hongos en el pasto.¹⁰⁴

¹⁰² Ramiro, Augusto. Intoxicación ocupacional por mercurio. American College of Occupational and Environmental Medicine. Scielo. An Fac med. 2008;69(1):46-51 Recuperado: 11/05/15
URL: <http://www.scielo.org.pe/pdf/afm/v69n1/a10v69n1.pdf>

¹⁰³ Sin Autor. Metales Pesados. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, México. Recuperado: 25/04/15 URL: <http://www.inecc.gob.mx/sqre-temas/763-aqre-metales>

¹⁰⁴ NIOSH. Mercury (organo) alkyl compounds (as Hg). Pocket Guide to Chemical Hazards. Recuperado el día: 11/05/15 URL: <http://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0384.html>



5.8.4.1.3 Cadmio ^{105 106}

“El cadmio es tóxico y el envenenamiento se produce al inhalarlo o ingerirlo, tiene gran tendencia a formar compuestos complejos acuosos en los que se une de uno a cuatro ligandos. Sus compuestos más importantes en la industria son el cianuro, la amina y varios complejos de haluros.

La contaminación del agua por cadmio es provocada por las principales áreas de aplicación que arrojan sus desechos a las alcantarillas, como son el acabado de metales, la electrónica, la manufactura de pigmentos (pinturas y agentes colorantes), de baterías (cadmio níquel), de estabilizadores plásticos, de plaguicidas (fungicidas), la electrodeposición o la aleaciones de hierro, en la producción de hierro y zinc, y en el uso de reactores nucleares.¹⁰⁷”

Los alquil y aril cadmios se usan como catalizadores y sus sales de los ácidos orgánicos (laurato, estearato, palmitato, fenolato, naftenato y benzoato de cadmio) como estabilizadores térmicos y de luz en los plásticos como el cloruro de polivinilo. El uso de estabilizadores de bario-cadmio en plásticos contaminan los alimentos almacenados en ellos.

“En 1965 se informó en Japón de la muerte de más de 100 personas por contaminación por cadmio, el cual afecta principalmente a los huesos.

El cadmio es tóxico para todas las formas de vida y en el hombre puede provocar daños en el aparato digestivo, en riñones y en los huesos (produce descalsificación y lesiones en la médula ósea) e inhibir algunos procesos enzimáticos, dicha sintomatología es característica de la Enfermedad Itai-Itai.

La inhalación de sus vapores produce severas lesiones en los pulmones. Además se ha observado que el cadmio tiene relación con la hipertensión arterial, la que origina enfermedades cardíacas.¹⁰⁸”

¹⁰⁵ Sin Autor. Contaminación del agua por metales. Centro Virtual de Información del Agua. Recuperado el día: 25/04/2015 URL: http://www.agua.org.mx/h2o/index.php?option=com_content&view=article&id=3218:contaminacion-del-agua-por-metales&catid=1291:saneamiento-basico&Itemid=100148

¹⁰⁶ Sin Autor. Metales Pesados. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, México. Recuperado: 25/04/15 URL: <http://www.inecc.gob.mx/sqre-temas/763-aqre-metales>

¹⁰⁷ Gonzalez, Diego. Cadmio. Recuperado el día: 12/05/15 URL: <http://www.bvsde.paho.org/texcom/cd051461/gonzalca.pdf>

¹⁰⁸ Sakurai, Kunitoshi. Contaminación de suelo pro Cadmio en Japón. Contaminación y proteccion ambiental. 1982. Recuperado: 11/05/15 URL: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan2/012435/012435.pdf>



“Como medida de seguridad, se recomienda que los trabajadores no sean expuestos por más de 8 horas a concentraciones mayores de 40 mg/m³ de cualquiera de sus compuestos del cadmio en el aire.¹⁰⁹”

Es importante también hacer ver que cuando el agua está contaminada por ácidos es más fácil la contaminación por metales que cuando no contiene ácidos, por ejemplo, cuando hay cadmio y ácido clorhídrico se puede representar mediante la ecuación química:



También se desechan aguas residuales industriales que contienen sustancias muy tóxicas como los cianuros que son arrojados a las alcantarillas por industrias dedicadas a la galvanoplastia o a la refinación y limpieza de metales.

Los procesos para reciclar y extraer del aire, del agua o del suelo a los contaminantes de los metales pesados como el plomo, el mercurio y el cadmio son muy costosos, por lo que hay que evitar arrojarlos al medio ambiente, además de los graves daños que causan en los seres vivos.

5.8.5 Equilibrio químico - Estabilidad de compuestos metálicos ¹¹⁰

Es menester destacar que el equilibrio químico representa un balance entre las reacciones directa e inversa. Los cambios en las condiciones experimentales pueden alterar el balance y desplazar la posición del equilibrio para que se forme mayor o menor cantidad de producto deseado.

Por ejemplo dentro de la dispersión de un tinte en medio acuoso el desplazamiento se lleva por un gradiente de concentración; ciertas condiciones favorecen o desfavorecen dicha transferencia de una mayor concentración del tinte hacia la zona de menor concentración.

Las variables que pueden influenciar directamente en la posición del equilibrio hacia la derecha es decir la formación de productos o viceversa (hacia la izquierda) son:

- Concentración
- Presión
- Volumen

¹⁰⁹ Higuera, Pablo. Oyarzun, Roberto. Maturana, Hugo. Minería y toxicología. Universidad de Castilla la Mancha. Recuperado el día: 11/05/15 URL: http://www.uclm.es/users/higuera/mam/Mineria_Toxicidad4.htm#Cd

¹¹⁰ Chang, R. Química. Mc Hill. Séptima Edición. 2002. Pg 582



- Temperatura

Cabe destacar que la estabilidad de los metales disueltos en el agua a tratar es fuertemente influenciada por las variables citadas anteriormente, por lo que dentro de la siguiente sección se detallaran las principales condiciones a tomar en cuenta para analizar y comprender los resultados obtenidos dentro de la etapa experimental planteada para este proyecto, facilitando de este modo la toma de decisiones.

5.8.5.1 Principio de Le Chatelier- Concentración.

“En 1884 el químico francés Henri Luis Le Chatelier enunció el principio que lleva su nombre en los siguientes términos:

-Todo sistema en equilibrio químico estable sometido a la influencia de una causa exterior que tiende a hacer variar su temperatura o su condensación (presión, concentración, número de moléculas por unidad de volumen) en su totalidad o solamente en alguna de sus partes sólo puede experimentar unas modificaciones interiores que, de producirse solas, llevarían a un cambio de temperatura o de condensación de signo contrario al que resulta de la causa exterior¹¹¹”

En otras palabras, existe una regla general que ayuda a predecir en qué dirección se desplazara una reacción en equilibrio cuando hay un cambio de concentración, presión volumen o temperatura.

Esta regla es conocida como principio de Le chatelier, establece que, si se aplica una tensión externa a un sistema en equilibrio, el sistema se ajusta de tal manera que se cancela parcialmente dicha tensión alcanzando una nueva posición de equilibrio.

Cabe destacar que el termino tensión en este caso significa un cambio de las variables tensiones citadas en la sección anterior, que alteran el estado de equilibrio de un sistema¹¹²”.

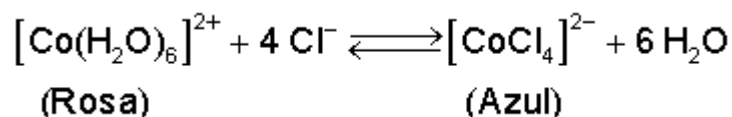
¹¹¹ Garcia, R. El principio de Le Chatelier. Recuperado el día: 17/05/15 URL: <http://www.unlu.edu.ar/~qgeneral/lechatlier.PDF>

¹¹² Chang, R. Química. Mc Hill. Séptima Edición. 2002. Pg 582



“Una reacción muy citada para mostrar dicho principio es el equilibrio que se establece entre el catión hexaacuacobalto(II), que se forma cuando una sal de cobalto(II) se disuelve en agua, y el anión tetraclorurocobalto(II).

En el primero el número de coordinación del cobalto es seis y tiene una coloración rosada, mientras que en el segundo el cobalto tiene un índice de coordinación cuatro y presenta un color azul fuerte característico (azul cobalto):



A temperatura ambiente el equilibrio se encuentra desplazado hacia la izquierda y la disolución presenta un color rosado intenso. Si añadimos cloruro, o calentamos, el equilibrio se desplazará hacia la derecha (el Cl^- se consume para formar el complejo y en ese sentido la reacción es endotérmica).

Si tratamos de añadir iones cloruro disolviendo cloruro de sodio, ocurre que la disolución se satura antes de que el cambio de color sea apreciable. Al calentar (5 min) se logra el desplazamiento del equilibrio hacia la derecha por el aumento de la temperatura, desplazamiento que será visible por el cambio de color. Una vez obtenido el color azul se puede desplazar la reacción nuevamente hacia la izquierda añadiendo agua o enfriando¹¹³”

“Finalmente es preciso hacer ver como el Principio de Le Chatelier establece que si una reacción en equilibrio es perturbada desde el exterior, el sistema evoluciona en el sentido de contrarrestar los efectos de dicha perturbación.¹¹⁴”

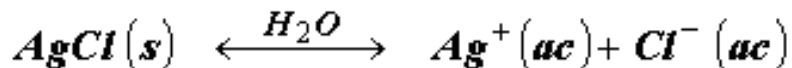
¹¹³ Autor Desconocido. Equilibrio Químico. Principio de Le Chatellier. Fisquiweb. Recuperado el día: 17/05/15 URL: <http://web.educastur.princast.es/proyectos/fisquiweb/Videos/EquilibrioQ/>

¹¹⁴ Garcia, R. El principio de Le Chatelier. Recuperado el día: 17/05/15 URL: <http://www.unlu.edu.ar/~qgeneral/lechatlier.PDF>



5.8.5.2 Producto de solubilidad - K_{ps} ¹¹⁵

Consideremos una sal poco soluble como el cloruro de plata, $AgCl$. Al disolverse, se producirá el siguiente equilibrio heterogéneo:



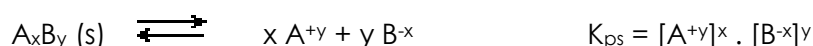
Cuya constante de equilibrio será:

$$K = \frac{[Ag^+] \cdot [Cl^-]}{[AgCl]}$$

Al ser el cloruro de plata una sustancia sólida, en el equilibrio prácticamente permanece constante, por lo que se define el producto de solubilidad K_{ps} como:

$$K_{ps} = K \cdot [AgCl] = [Ag^+] \cdot [Cl^-]$$

En general, para una sustancia iónica insoluble o poco soluble en agua A_xB_y , su producto de solubilidad será:



Donde:

- si $[A^{+y}]^x \cdot [B^{-x}]^y > K_{ps}$ "las concentraciones de los iones deberán disminuir, de manera que, habrá precipitación hasta que la disolución quede saturada.
- si $[A^{+y}]^x \cdot [B^{-x}]^y = K_{ps}$ no hay precipitación, pero la disolución está saturada, está en el límite para que no haya precipitación.
- si $[A^{+y}]^x \cdot [B^{-x}]^y < K_{ps}$ no hay precipitación, pudiendo albergar la disolución más cantidad de soluto, es decir, no está saturada.¹¹⁶

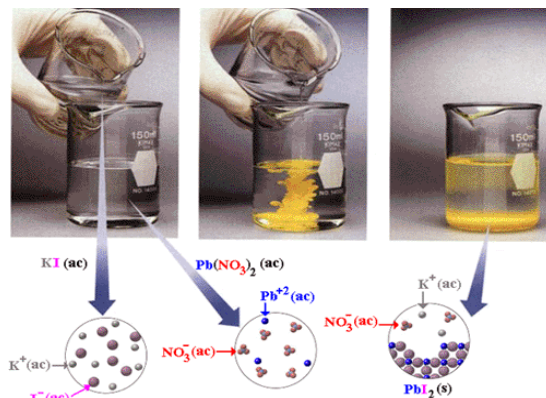
¹¹⁵ Sin Autor. 10.3 Producto de solubilidad. Recuperado el día: 25/04/2015
URL: <http://www.100ciaquimica.net/temas/tema10/punto3.htm>

¹¹⁶ Sin Autor. Equilibrio químico. Recuperado el día: 23/04/15 URL: <http://www.qfa.uam.es/labqui/presentaciones/Tema7.pdf>



Es decir, el producto de solubilidad es el producto de las concentraciones máximas de los iones en disolución a una temperatura dada. Los productos de solubilidad K_{ps} sólo se definen para sustancias muy poco solubles, ya que para las sustancias muy solubles, la saturación de sus disoluciones se produce a concentraciones tan elevadas que no se cumple la ley de acción de masas.

Imagen 5.10 Precipitación de Plomo en medio acuoso ¹¹⁷.



A continuación, te damos en la siguiente tabla los productos de solubilidad de algunas sustancias a 15 °C¹¹⁸:

Tabla 5.12 Productos de solubilidad de diversas sales

Tipo de Sal	Nomenclatura	Expresión	K_{ps}
Cloruros			
Cloruro de plata	AgCl	$[Ag^{+2}].[Cl^{-1}]$	$1'0.10^{-10}$
Cloruro de mercurio (II)	HgCl ₂	$[Hg^{+2}].[Cl^{-1}]^2$	$2'0.10^{-18}$
Cloruro de plomo (II)	PbCl ₂	$[Pb^{+2}].[Cl^{-1}]^2$	$1'7.10^{-5}$
Hidróxidos			
Hidróxido de aluminio	Al(OH) ₃	$[Al^{+3}].[OH^{-1}]^3$	$2'0.10^{-33}$
Hidróxido de hierro (III)	Fe(OH) ₃	$[Fe^{+3}].[OH^{-1}]^3$	$1'1.10^{-36}$
Hidróxido de hierro (II)	Fe(OH) ₂	$[Fe^{+2}].[OH^{-1}]^2$	$1'6.10^{-14}$
Hidróxido de cinc	Zn(OH) ₂	$[Zn^{+2}].[OH^{-1}]^2$	$1'8.10^{-14}$
Hidróxido de plata	Ag(OH)	$[Ag^{+}].[OH^{-}]$	$1'0.10^{-8}$
Sulfatos			
Sulfato de bario	BaSO ₄	$[Ba^{+2}].[SO_4^{-2}]$	$1'0.10^{-10}$
Sulfato de calcio	CaSO ₄	$[Ca^{+2}].[SO_4^{-2}]$	$2'0.10^{-4}$
Carbonatos			
Carbonato de magnesio	MgCO ₃	$[Mg^{+2}].[CO_3^{-2}]$	$2'6.10^{-5}$
Carbonato de plomo (II)	PbCO ₃	$[Pb^{+2}].[CO_3^{-2}]$	$3'3.10^{-14}$

¹¹⁷ Sin Autor. 10.3 Producto de solubilidad. Recuperado el día: 25/04/2015
URL: <http://www.100ciaquimica.net/temas/tema10/punto3.htm>

¹¹⁸ Sin Autor. 10.3 Producto de solubilidad. Recuperado el día: 25/04/2015
URL: <http://www.100ciaquimica.net/temas/tema10/punto3.htm>



Es importante resaltar la interpretación de los valores citados en la tabla anterior; a modo de ejemplo consideremos que experimentalmente se tienen los cationes de Hierro y Plata en una misma solución y se comienza a agregar poco a poco hidróxido de sodio en baja concentración,

Dicha experimentación lograría generar una separación diferencial entre la plata y el hierro puesto a la gran diferencia existente en los productos de solubilidad de las especies básicas de los anualitos en cuestión, citando los datos de la tabla anterior el valor de K_{ps} para Hidróxido de Hierro (III) es de $1 \cdot 10^{-36}$.

Esta cifra representa la cantidad máxima disuelta del Hierro antes de comenzar a precipitar por la formación de su hidróxido. Si comparamos este valor con el producto de solubilidad del Hidróxido de Plata cuyo producto de solubilidad es de $1 \cdot 10^{-8}$.

Es posible determinar que el primer producto en precipitar sería el hidróxido de hierro (III) puesto a que es mucho más inestable que el hidróxido de plata, al ocupar una mínima cantidad de hidróxido para comenzar a precipitar.

Una manera sencilla de identificar la estabilidad de estos compuestos es prestar atención al orden exponencial en los valores del producto de solubilidad puesto que entre más negativa sea el exponente en el K_{ps} más sencillo será hacer precipitar el anualito en cuestión y por ende más inestable en matriz acuosa será.

Por los motivos expuestos anteriormente es importante resaltar que los equilibrios heterogéneos son dinámicos, es decir, que con la misma velocidad que el sólido se disuelve, los iones en disolución interaccionan para volver a dar el sólido precipitado.

A diferencia del equilibrio homogéneo, la adición de más sólido no causa cambio alguno en la concentración de los iones en solución, ya que al estar la disolución saturada, todo lo que añadamos de sólido, al no poderse disolver, precipitará directamente.¹¹⁹

¹¹⁹ Sin Autor. 10.3 Producto de solubilidad. Recuperado el día: 25/04/2015
URL: <http://www.100ciaquimica.net/temas/tema10/punto3.htm>



5.8.5.3 Cambios de temperatura.

“Primeramente hay que recordar que la solubilidad se define como la máxima cantidad de un soluto que se puede disolver en una determinada cantidad de un disolvente a una temperatura específica. La temperatura afecta la solubilidad de la mayoría de la sustancia.

En la mayoría de los casos, aunque no en toda la solubilidad de una sustancia sólida aumenta con la temperatura. Sin embargo, no hay una correlación clara entre el signo de ΔH de la disolución (entalpía) y la variación de la solubilidad con la temperatura.

Por ejemplo, el proceso de disolución del cloruro de calcio es exotérmico y el del nitrato de amonio es endotérmico. Pero la solubilidad de ambos compuestos aumenta al incrementarse la temperatura.

En general el efecto de la temperatura sobre la solubilidad debe determinarse en forma experimental. Por lo tanto, cabe destacar que la dependencia de la solubilidad de un sólido con respecto a la temperatura varía de manera considerable; a modo de ejemplo se tiene que la solubilidad del nitrato de sodio aumenta rápidamente con la temperatura, mientras que la del bromuro de sodio casi no cambia.

Esta gran variación proporciona una forma para obtener sustancias puras apartar de mezclas. La cristalización fraccionada es la separación de una mezcla de sustancias en sus componentes puro con base a sus diferentes solubilidades.

A modo de ejemplificación se tiene una muestra de 90 g de KNO_3 contaminada con 10 g de NaCl . La purificación del nitrato de potasio la mezcla se disuelve en 100 ml de agua a 60 Celsius, una vez que la solución esta homogénea y totalmente en disolución se procede a llevar a cabo un enfriamiento gradual hasta 0 C.

A esta temperatura las solubilidades de KNO_3 y de NaCl son de 12.1 g/100 ml de agua y 34.2 g/100 mL de agua respectivamente. De este modo se separaran de la disolución 78 g de KNO_3 pero todo el NaCl permanecerá disuelto.

De esta forma se tiene alrededor de 90% de la cantidad original de KNO_3 en forma pura. Los cristales de KNO_3 se pueden separar de ladi solución por filtración.

Muchos del compuesto sólidos inorgánicos y orgánicos que se utilizan en el laboratorio se purifican mediante esta técnica de cristalización fraccionada.



Por lo general el método funciona mejor si el compuesto que se va a purificar tiene una curva de solubilidad con una gran pendiente, es decir, si es mucho más soluble a altas temperaturas que a menores temperaturas.

De otra manera una gran parte del compuesto permanecerá disuelto a medida que se enfría la disolución. La cristalización fraccionada también funciona bien si la cantidad de impurezas en la disolución es relativamente pequeña.¹²⁰

De este modo se demuestra la fuerte influencia que tiene la temperatura dentro de la solubilidad de ciertos compuestos o sustancias disueltas en el agua, ahora bien extrapolando estos principios a nuestro sistema experimental se sabe que el incremento de la temperatura aumentara de manera significativa la solubilidad de los metales contaminantes con lo que la retención de los cationes en la matriz sólida (sílice micro amorfa) sería menos eficiente.

Es decir, se efectúa un desplazamiento hacia la derecha en cuanto al equilibrio de solubilidad de los compuestos metálicos, con lo que la capacidad de eliminación de los contaminantes metálicos en solución acuosa tendera a disminuir.

5.8.5.4 Cambios de volumen y presión¹²¹

Los cambios de presión normalmente no alteran las concentraciones de las especies reactivas en fase condensada (por ejemplo, en disolución acuosa) ya que los líquidos y los sólidos son prácticamente incompresibles.

A diferencia de la concentración de sustancias en estado gaseoso las cuales son muy susceptibles a los cambios de presión.

Por lo que cabe destacar que dichas variables se consideran constantes para la etapa experimental llevada a cabo dentro de esta investigación.

¹²⁰ Chang, R. Química. Mc Hill. Séptima Edición. 2002. Pg 475, 476.

¹²¹ Chang, R. Química. Mc Hill. Séptima Edición. 2002. Pg 584



5.8.6 Relevancia en México¹²²

Los principales convenios internacionales en los que participa nuestro país y de los cuales se han derivado diversos compromisos y oportunidades para el control de la contaminación por metales pesados son:

- “Convenio de Basilea, 1989. El objetivo de este convenio, es el de regular los movimientos transfronterizos de materiales y residuos peligrosos.¹²³”
- “Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE), 1990. En 1990, el Consejo de la OCDE adoptó la Decisión/Recomendación para la Cooperación en la Investigación y la Reducción de Riesgos de las Sustancias Químicas existentes [C(90) 163/Final].

Esta Acta del Consejo de la OCDE trata de la reducción de riesgos de sustancias químicas al ambiente, o que dañen la salud de la población o los trabajadores.

Se basa en la premisa de la cooperación internacional en actividades de reducción de riesgos que favorezcan los aspectos institucionales y técnicos del manejo de riesgos en los países miembros al compartir esfuerzos y reducir la duplicación de éstos. Dentro de la OCDE se manejan cuatro sustancias, tres de las cuales son metales pesados: cadmio, mercurio, plomo.¹²⁴”

- “Grupo de Trabajo para la Selección de Sustancias Químicas de la Comisión de la Cooperación de América del Norte. Este grupo de trabajo, el cual forma parte del Grupo de Trabajo de Manejo Adecuado de Sustancias Químicas (MASQ) está trabajando para la nominación del Plomo como sustancia para la cual se tomen acciones para su control en Canadá, Estados Unidos y México.¹²⁵”
- “Declaración para la Reducción de Riesgos por Plomo, 1996. Esta declaración fue adoptada por los gobiernos de los países miembros de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) en la reunión del Comité de Políticas Ambientales a nivel Ministerial.¹²⁶”

¹²² Sin Autor. Metales Pesados. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, México. Recuperado: 25/04/15 URL: <http://www.inecc.gob.mx/sqre-temas/763-aqre-metales>

¹²³ Semarnat. Convenio de Basilea. Modificado: Dom, 2013-12-01 17:52 por Unidad Coordinadora de Asuntos Internacionales. Recuperado el día: 17/05/15 URL: <http://www.semarnat.gob.mx/temas/agenda-internacional/convenio-de-basilea>

¹²⁴ OCDE. Acerca de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos. Recuperado el día: 17/05/15 URL: <http://www.oecd.org/centrodemexico/laocde/>

¹²⁵ Hamilton, A. Cooperación para el manejo adecuado de sus tancias químicas en América del Norte. En Breve. Recueperado el día: 17/05/15 URL: http://www.cec.org/Storage/43/3495_smocs_ES.pdf

¹²⁶ Wilson, B. Reducción del riesgo de la exposición al plomo. El compromiso de cooperación de la industria. The International Lead Management Center. Recuperado: 17/05/15 URL: <http://www.ilmc.org/Workshops/Basel/Trinidad/Notes/Spanish/centro.html>



5.9 Toxicidad y Dosis Letal Media (DL50)¹²⁷

Para comprender más a fondo lo perjudicial que puede llegar a resultar la exposición de los metales pesados con respecto a los seres vivos es importante resaltar el término toxicidad, el cual se emplea para describir “la naturaleza de los efectos perjudiciales producidos y las condiciones necesarias para su producción. La toxicología estudia las relaciones entre la cantidad de sustancia introducida en el organismo y el efecto biológico obtenido, tanto a nivel cualitativo como cuantitativo.

Esta ocurre toda vez que una sustancia entra en contacto con una superficie corporal como la piel, los ojos o la mucosa del sistema digestivo o respiratorio ¹. En la sociedad moderna, la toxicología es ya un elemento importante de la salud ambiental y de la salud en el trabajo.

Muchas organizaciones, tanto gubernamentales como no gubernamentales, utilizan la información toxicológica para evaluar y regular los peligros presentes tanto en el lugar de trabajo como en el medio ambiente general.

La toxicología es un componente crucial de las estrategias de prevención, pues proporciona información sobre peligros potenciales en los casos en que no hay una exposición humana amplia.

Si se fuese a establecer el origen de la toxicología se debería situar paralelamente con el origen de la biología, porque en el momento en que aparece la vida, aparece el riesgo que ésta entre en contacto con agentes nocivos que ponen en peligro el funcionamiento normal del organismo.

La toxicidad es la capacidad de una sustancia de causar algún efecto nocivo sobre organismos vivos depende de:

- Cantidad administrada o absorbida
- Vía de ingreso al organismo
- Distribución a lo largo del tiempo después de su administración.
- Naturaleza y severidad del daño producido.
- Tiempo necesario para producir el efecto.¹²⁸

¹²⁷ Gamez, Catalina. Emilce, Ramirez. Determinacion de la concentración Letal Media (CL50-48) del herbicida roundup 747 sobre ecosistemas acuáticos mediante pruebas toxicológicas con Daphnia magna. UNIVERSIDAD DE LA SALLE FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA BOGOTÁ D.C 2008 Recuperado el día: 17/05/15
URL:<http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14062/T41.08%20G145d.pdf?sequence=1>

¹²⁸ Gamez, Catalina. Emilce, Ramirez. Determinacion de la concentración Letal Media (CL50-48) del herbicida roundup 747 sobre ecosistemas acuáticos mediante pruebas toxicológicas con Daphnia magna. UNIVERSIDAD DE LA SALLE FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA BOGOTÁ D.C 2008 Recuperado el día: 17/05/15
URL:<http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14062/T41.08%20G145d.pdf?sequence=1>



5.9.1 Categorías de toxicidad y clasificación de la toxicidad.

“Las categorías de toxicidad se refieren a una calificación arbitraria de las dosis o niveles de exposición que causan efectos tóxicos. Se habla así de sumamente tóxico, muy tóxico y moderadamente tóxico.

Lo más frecuente es que estas expresiones se apliquen a la toxicidad aguda. La clasificación de la toxicidad se refiere a la agrupación de las sustancias químicas en categorías generales conforme a su efecto tóxico principal. Se habla así de sustancias alergénicas, neurotóxicas y carcinógenas.

Los tóxicos son definidos por la OSHA (Administración para la seguridad y salud ocupacional) como un producto químico que se encuentra en una de estas 3 categorías:

1. Un producto químico que tiene una dosis letal media (DL50) de más de 50 miligramos por kilogramos pero no más de 500 miligramos por kilogramo de peso corporal cuando administrado oralmente a ratas albinas de entre 200 y 300 gramos de peso.
2. Un producto químico que tiene una dosis letal media (DL50) de más de 200 miligramos por kilogramo pero no más de 1000 miligramos por kilogramo de peso corporal cuando administrado por contacto continuo durante 24 horas (o menos si la muerte ocurre durante las siguientes 24 horas) con la piel desnuda de conejos albinos de entre 2 a 3 kilogramos de peso.
3. Un producto químico que tiene una concentración letal media (CL50) en el aire de más de 200 partes por millón pero no más de 2000 partes por millón por volumen de gas o vapor, o más de 2 miligramos por litro pero no más de 20 miligramos por litro de niebla, humo, o polvo, cuando administrado por inhalación continua durante una hora (o menos si la muerte ocurre en menos de una hora) a ratas albinas de entre 200 y 300 gramos de peso.¹²⁹

¹²⁹ Gamez, Catalina. Emilce, Ramirez. Determinacion de la concentración Letal Media (CL50-48) del herbicida roundup 747 sobre ecosistemas acuáticos mediante pruebas toxicológicas con *Daphnia magna*. Universidad de la Salle Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria Bogotá.. 2008 Recuperado el día: 17/05/15
URL:<http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14062/T41.08%20G145d.pdf?sequence=1>



5.9.2 Relación dosis-respuesta.

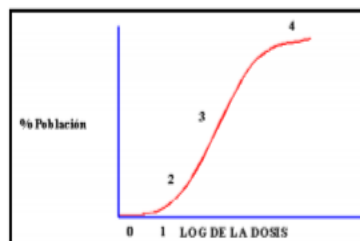
“Es la relación entre la dosis y el porcentaje de individuos que presentan un determinado efecto. Al incrementarse la dosis lo normal es que aumente el número de individuos afectados en la población expuesta.

Pueden establecerse varias curvas de dosis-respuesta respecto de una misma sustancia química (una curva para cada tipo de efecto). En la mayoría de los efectos tóxicos, cuando se estudian en poblaciones grandes, la curva de dosis respuesta tiene una forma sigmoidea.

En la imagen 5.11 se representa la curva de dosis-respuesta la cual refleja las variaciones entre individuos de una misma población.

La pendiente de la curva varía según la sustancia química de que se trate y también entre los diferentes tipos de efectos, en la siguiente grafica se puede apreciar un tipo de curva dosis respuesta, donde la región NOEC representa la dosis o concentración más alta a la cual no se observa ningún efecto y la región LOEC representa la concentración mínima donde aún se observa efecto de mortalidad.

Imagen 5.11 “Curva Dosis - respuesta¹³⁰”.



Curva Dosis-Respuesta.
0 a 1.-Región NOEC; 2.-LOEC; 3.-Región Lineal; y 4.-Respuesta Máxima

En el caso de algunas sustancias que tienen efectos específicos (carcinógenos, iniciadores, mutágenos) la curva de dosis-respuesta podría ser lineal desde la dosis cero dentro de un determinado intervalo de dosis.

Esto significa que no hay un umbral y que hasta las dosis pequeñas representan un riesgo. Por encima de ese intervalo de dosis, el riesgo puede incrementarse a una tasa superior a la lineal.¹³¹

¹³⁰ Gamez, Catalina. Emilce, Ramirez. Determinación de la concentración Letal Media (CL50-48) del herbicida roundup 747 sobre ecosistemas acuáticos mediante pruebas toxicológicas con *Daphnia magna*. Universidad de la Salle Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria Bogotá. 2008 Recuperado el día: 17/05/15
URL: <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14062/T41.08%20G145d.pdf?sequence=1>

¹³¹ Gamez, Catalina. Emilce, Ramirez. Determinación de la concentración Letal Media (CL50-48) del herbicida roundup 747 sobre ecosistemas acuáticos mediante pruebas toxicológicas con *Daphnia magna*. Universidad de la Salle Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria Bogotá. 2008 Recuperado el día: 17/05/15
URL: <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14062/T41.08%20G145d.pdf?sequence=1>



5.9.3 Toxicología ambiental

“La toxicología ambiental evalúa los impactos que producen en la salud pública la exposición de la población a los tóxicos ambientales presentes en un sitio contaminado en este caso el agua. El impacto producido por cualquier sustancia tóxica se miden por su:

- Exposición Es el contacto de una población o individuo con un agente químico o físico. La magnitud de la exposición se determina midiendo o estimando la cantidad (concentración) del agente que está presente en la superficie de contacto (pulmones, intestino, piel, etc.) durante un período especificado.
- Ruta de exposición Es el camino que sigue un agente químico en el ambiente desde el lugar donde se emite hasta que llega a establecer contacto con la población o individuo expuesto.

El análisis de la ruta de exposición describe la relación que existe entre las fuentes (localizaciones y tipo de derrames ambientales) y los receptores (localización de las poblaciones, patrones de actividad, etc.). Se consideran como rutas significativas las que dan lugar a exposición humana.

Las rutas de exposición consisten generalmente de cuatro elementos:

- Fuentes y mecanismos de emisión de tóxicos.
- Medio de retención y transporte (o medios en el caso de que haya transferencias de un medio a otro).
- Punto de contacto potencial entre el medio contaminado y los individuos
- Vía de ingreso al organismo: Es el mecanismo por medio del cual el tóxico entra en el organismo. Para el propósito de la toxicología ambiental, se consideran de importancia la ingestión, la inhalación y el contacto cutáneo (absorción cutánea).¹³²

¹³² Gamez, Catalina. Emilce, Ramirez. Determinacion de la concentración Letal Media (CL50-48) del herbicida roundup 747 sobre ecosistemas acuáticos mediante pruebas toxicológicas con Daphnia magna. Universidad de la Salle Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria Bogotá. 2008 Recuperado el día: 17/05/15
URL:<http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14062/T41.08%20G145d.pdf?sequence=1>



5.9.4 Indicadores de toxicología.

“Las siguientes unidades de medida expresan los valores de concentración de contaminantes y las dosis recibidas por un organismo, sirviendo como indicadores:

- Dosis Letal 50: Es la dosis individual de una sustancia que provoca la muerte del 50% de la población animal debido a la exposición a la sustancia por cualquier vía distinta a la inhalación. Normalmente expresada como miligramos o gramos de material por kilogramo de peso del animal.¹³³
- Concentración Efectiva CE50: Concentración del tóxico que produce efectos negativos apreciables en el 50 por ciento de la población (pérdida del equilibrio, frecuencia respiratoria, en un tiempo determinado).¹³⁴”

Es fundamental destacar lo importante que resulta el manejo de dichos términos a la hora de proponer y realizar la evaluación de un sistema regenerador de agua puesto que como se ha mencionado en secciones anteriores la calidad del producto obtenido siempre va a ser el factor principal que dictamina la gama de posibles usos del agua tratada.

Ya que una vez conocido el valor de concentración másico para un contaminante dado se facilita en gran manera el cálculo o estimación de los límites máximos permisibles en el agua, dependiendo claro está de la ruta de exposición; con lo que se hace posible trazar metas a alcanzar al momento de diseñar un sistema de tratamiento.

Puesto a que el valor de contaminantes esperado para el efluente de un tratamiento regenerador se espera sea significativamente menor al DL50 o cualquier valor de toxicidad para los seres vivos en contacto del agua producto.

¹³³ Autor Desconocido. Kioskea. Dosis Letal Media- Definicion. Junio 2014. Recuperado el día: 22/05/15
URL:file:///home/chronos/u-66c261b08f6bb2309f785e34cb7131ad432ed883/Downloads/dosis-letal-media-definicion-12755-mv116u.pdf

¹³⁴ Gamez, Catalina. Emilce,Ramirez. Determinación de la concentración Letal Media (CL50-48) del herbicida roundup 747 sobre ecosistemas acuáticos mediante pruebas toxicológicas con Daphnia magna Universidad de la Salle Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria Bogotá.. 2008 Recuperado el día: 17/05/15
URL:http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14062/T41.08%20G145d.pdf?sequence=1



5.10 Fuerzas Intermoleculares ¹³⁵¹³⁶

La denominación a fuerzas intermoleculares está referida a las fuerzas de atracción o repulsión entre las moléculas; dichas fuerzas son las responsables del comportamiento no ideal de los gases; sin embargo, también resulta crucial mencionar que ejercen aún más influencia en las fases condensadas de la materia es decir en los líquidos y en los sólidos.

A medida que baja la temperatura de un gas disminuye de manera considerable la energía cinética promedio de sus moléculas.

Por lo que a una temperatura suficientemente baja las moléculas ya no tienen la energía necesaria para liberarse de la atracción de las moléculas vecinas. En este momento las moléculas se agregan y forman pequeñas gotas de líquido, dicha transición de la fase gaseosa a la fase acuosa se conoce como condensación.

A diferencia de las fuerzas intermoleculares las fuerzas intramoleculares mantienen juntos a los átomos de una misma molécula. Estas fuerzas estabilizan las moléculas individuales, en tanto que las fuerzas intermoleculares son las principales responsables de las propiedades macroscópicas de la materia, un ejemplo de esto son los puntos de fusión y de ebullición.

Es importante destacar que las fuerzas intermoleculares suelen ser más débiles que las intramoleculares por ello se necesita menos energía para evaporar un líquido que para romper los enlaces de sus moléculas. Por ejemplo, para evaporar 1 mol de agua en su punto de ebullición son suficientes alrededor de 41 kJ energía; en cambio para romper dos enlaces O - H en 1 mol de moléculas de agua es necesario aplicar 930 kJ de energía.

En general los puntos de ebullición de las sustancias reflejan la magnitud de las fuerzas intermoleculares que actúan sobre las moléculas. En el punto de ebullición por ejemplo se debe de suministrar suficiente energía para vencer las fuerzas de atracción entre las moléculas a fin de que entren en la fase de vapor.

Para comprender las propiedades de la materia condensada es necesario entender los diferentes tipos de fuerzas intermoleculares. Las fuerzas dipolo - dipolo inducido y las fuerzas de dispersión conforman lo que los químicos denominan como fuerzas de Van der Waals nombradas así en reconocimiento al físico holandés Johannes Van der Waals.

¹³⁵ Autor Desconocido. Fuerzas Intermoleculares. Recuperado el día: 23/10/15

URL: http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/FuerzasIntermoleculares_11310.pdf

¹³⁶ Autor Desconocido. Elementos de Fisicoquímica UNEXPO. Recuperado el día: 20/10/15

URL: <https://fisicoquimicaunexpo.files.wordpress.com/2009/08/fuerzas-intermoleculares.pdf>



Los iones y dipolos se atraen entre sí mediante fuerzas electroestáticas conocidas como fuerzas ion- dipolo que no son fuerzas de Van der Waals.

Son fuerzas de interacción electrostática regidas por la ley de Coulomb. Es también crucial remarcar que el enlace de hidrogeno es un tipo de interacción dipolo - dipolo particularmente fuerte. Dado que solo unos pocos elementos participan en la formación del enlace hidrogeno; este es importante remarcar se trata como categoría aparte.

Según la fase de la sustancia, la naturaleza de los enlaces químicos y los elementos que la componen, en la atracción total entre moléculas pueden actuar distintos tipos de atracciones.

5.10.1 Electronegatividad ¹³⁷ ¹³⁸

Es una magnitud empírica que se define como la tendencia relativa de un elemento a atraer hacia él mismo los dos electrones de un enlace covalente en el que participa. Está relacionada directamente con la energía de ionización del elemento, que a su vez depende directamente de la carga del núcleo, e inversamente de la distancia del electrón al núcleo y del apantallamiento producido por los restantes electrones.

Pauling desarrolló una escala de electronegatividades arbitrarias, en la que el Flúor (elemento con la mayor energía de ionización exceptuando los gases nobles, y por consiguiente de mayor electronegatividad) recibe un valor de 4,0 y el Cesio (el de menor electronegatividad) recibe un valor de 0,7.

Posteriormente Mulliken definió la electronegatividad de un elemento como la media entre su energía de ionización y su afinidad electrónica. La energía de ionización se define como la energía requerida para eliminar un electrón del átomo neutro, produciendo el ión +1. La afinidad electrónica se define como la energía necesaria para eliminar un electrón del ion -1 del elemento en cuestión.

Sin embargo, aunque la definición de Mulliken permite desarrollar una escala de electronegatividades con valores no arbitrarios, en la práctica no se usa casi nunca, y usualmente se emplea la escala de Pauling.

Cuanto mayor sea la diferencia de electronegatividades entre los dos átomos enlazados mayor carácter iónico tendrá en enlace en cuestión.

¹³⁷ Autor Desconocido. Fuerzas de Van der Waals. Recuperado el día: 23/10/15

URL:<https://bioquibi.webs.ull.es/bioquimica%20estructural/Archivoszip/enlacesnocovalentes/Fuerzas%20de%20Van%20der%20Waals.pdf>

¹³⁸ Olmo, M. Consideraciones sobre la energía del enlace químico. Electronegatividad. Recuperado: 20/10/15

URL:<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/chemical/bond.html>



El orden relativo de electronegatividad de varios elementos es el siguiente:

Imagen 5.12
Clasificación de
electronegatividad de
Pauling¹³⁹

F (4,0) > O (3,5) > N, Cl (3,0) > C, S, (2,5) ~ H (2,2), P (2,1)
El número entre paréntesis corresponde a la cuantificación de la electronegatividad según Pauling.

La separación de cargas en un enlace covalente es tanto mayor cuanto mayor sea la diferencia de electronegatividades entre los átomos que lo forman. Esto quiere decir que un enlace entre dos átomos de C, o entre un C y un H tiene una distribución prácticamente homogénea de los electrones, esto es, de la carga, mientras que un enlace C-O tiene la nube electrónica más desplazada hacia el oxígeno, al ser este elemento más electronegativo que el carbono.

Así, en un enlace sencillo C-O el oxígeno tiene aproximadamente un 0,2 de carga negativa (y el C un 0,2 de carga positiva), mientras que en un enlace H-O la carga sobre cada átomo es del orden de 0,4.

También en este caso el exceso de carga negativa corresponde al átomo de oxígeno. Se estima que una diferencia de electronegatividades del orden de 2 unidades supone una carga fraccional de 0,5 o, lo que es lo mismo, que el enlace tiene un 50% de carácter iónico.

Puede ocurrir que una molécula no tenga momento dipolar neto, aunque sus enlaces individualmente considerados sí lo posean; tal es el caso del CO₂, en el que cada doble enlace C=O está polarizado, pero la molécula, al ser totalmente lineal, no lo está: O=C=O.

Tabla 5.13 Momentos Dipolares de algunas moléculas simples

Molécula	Estructura	Momento dipolar (D)
Monóxido de carbono		0,12
Dióxido de carbono		0
Agua		1,83
Metanol		1,66
Acetona		2,72
orto-diclorobenceno		2,59

¹³⁹Autor Desconocido. Fuerzas de Van der Waals. Recuperado el día: 23/10/15

URL: <https://bioquibi.webs.ull.es/bioquimica%20estructural/Archivoszip/enlacesnocovalentes/Fuerzas%20de%20Van%20der%20Waals.pdf>



Por último, para moléculas con varios grupos cargados (aunque globalmente sean eléctricamente neutras) el momento dipolar es mucho mayor, como cabría esperar, que el de moléculas neutras sin carga.

Estos dipolos, aunque globalmente neutros, pueden interaccionar exactamente igual que las moléculas con carga neta, aunque la energía de esa interacción será comparativamente menor dado que la carga presente también lo es.

5.10.2 Momento Dipolar¹⁴⁰¹⁴¹

Muchas moléculas eléctricamente neutras, esto es, sin carga neta, poseen una distribución de cargas no homogénea. Esto se debe a que los átomos que las forman tienen diferente electronegatividad, de tal forma que cuando se crea un enlace covalente, los dos electrones del enlace son atraídos con distinta fuerza por los átomos que los comparten.

En resumen, el orbital molecular pierde su simetría, y la probabilidad de encontrar los electrones se hace mayor en las proximidades del átomo más electronegativo.

Se sigue conservando la neutralidad eléctrica global, pero sobre el átomo más electronegativo hay un predominio de carga negativa mientras que sobre el átomo menos electronegativo hay un predominio de carga positiva: se ha formado un dipolo.

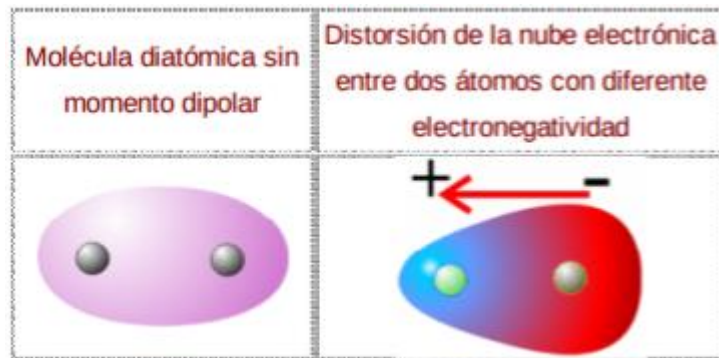
La magnitud de ese dipolo viene definida por lo que se conoce como momento dipolar, y es el producto de la carga fraccional presente sobre cada átomo por la distancia que las separa. La unidad de momento dipolar es el debye; $1 \text{ D} = 3,34 \times 10^{-30} \text{ Culombio} \times \text{m}$.

¹⁴⁰ Autor Desconocido. Fuerzas de Van der Waals. Recuperado el día: 23/10/15
URL: <https://bioquibi.webs.ull.es/bioquimica%20estructural/Archivoszip/enlacesnocovalentes/Fuerzas%20de%20Van%20der%20Waals.pdf>

¹⁴¹ Autor Desconocido. Elementos de Fisicoquímica UNEXPO. Recuperado el día: 20/10/15
URL: <https://fisicoquimicaunexpo.files.wordpress.com/2009/08/fuerzas-intermoleculares.pdf>



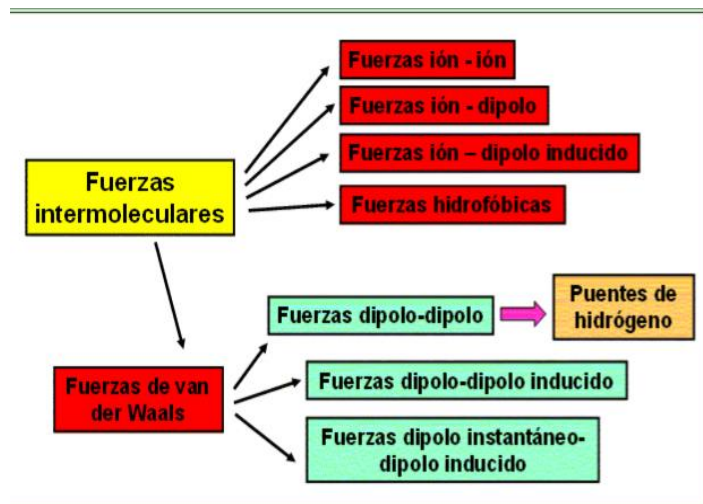
Imagen 5.13 Distorsión de la nube electrónica entre átomos con diferente electronegatividad¹⁴²



5.10.3 Tipos de fuerzas intermoleculares¹⁴³¹⁴⁴¹⁴⁵

- Fuerzas de dispersión de London
- Fuerzas dipolodipolo
- Fuerzas puente de Hidrógeno
- Fuerzas ión-dipolo (Fuerzas Columbianas)
- Fuerzas ión-dipolo inducido

Imagen 5.14 Clasificación de fuerzas intermoleculares ¹⁴⁶



¹⁴² Autor Desconocido. Fuerzas de Van der Waals. Recuperado el día: 23/10/15
URL: <https://bioquibi.webs.ull.es/bioquimica%20estructural/Archivoszip/enlacesnocovalentes/Fuerzas%20de%20Van%20der%20Waals.pdf>

¹⁴³ Autor Desconocido. Fuerzas de Van der Waals. Recuperado el día: 23/10/15
URL: <https://bioquibi.webs.ull.es/bioquimica%20estructural/Archivoszip/enlacesnocovalentes/Fuerzas%20de%20Van%20der%20Waals.pdf>

¹⁴⁴ Autor Desconocido. Fuerzas Intermoleculares. Recuperado el día: 23/10/15
URL: http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/FuerzasIntermoleculares_11310.pdf

¹⁴⁵ Autor Desconocido. Elementos de Fisicoquímica UNEXPO. Recuperado el día: 20/10/15
URL: <https://fisicoquimicaunexpo.files.wordpress.com/2009/08/fuerzas-intermoleculares.pdf>

¹⁴⁶ Gonzales, M. Cursos de Biomoléculas. Fuerzas Intermoleculares. Recuperado el día: 18/10/15
URL: <http://www.ehu.eus/biomoleculas/moleculas/fuerzas.htm>



“Es importante remarcar que las fuerzas de dispersión de London, las fuerzas dipolo-dipolo y dipolo- dipolo inducido integran las llamadas fuerzas de van der Waals.

El puente de hidrógeno es un tipo de interacción dipolo- dipolo particularmente fuerte, que se trata por separado por ser unos pocos los elementos que participan en su formación.

Mientras que por otra parte los iones y los dipolos se atraen entre sí mediante fuerzas electrostáticas ion-dipolo que no son fuerzas de van der Waals.

Por lo tanto, cabe destacar que las moléculas y los iones pueden interactuar de forma no covalente de varios modos: Interacciones carga-carga, carga-dipolo, dipolo-dipolo, carga-dipolo inducido, dipolo-dipolo inducido, Dispersiones, Repulsiones de Van Der Waals.

Todas estas interacciones son de naturaleza electrostática, es decir, dependen de las fuerzas que las cargas eléctricas ejercen entre ellas.¹⁴⁷”

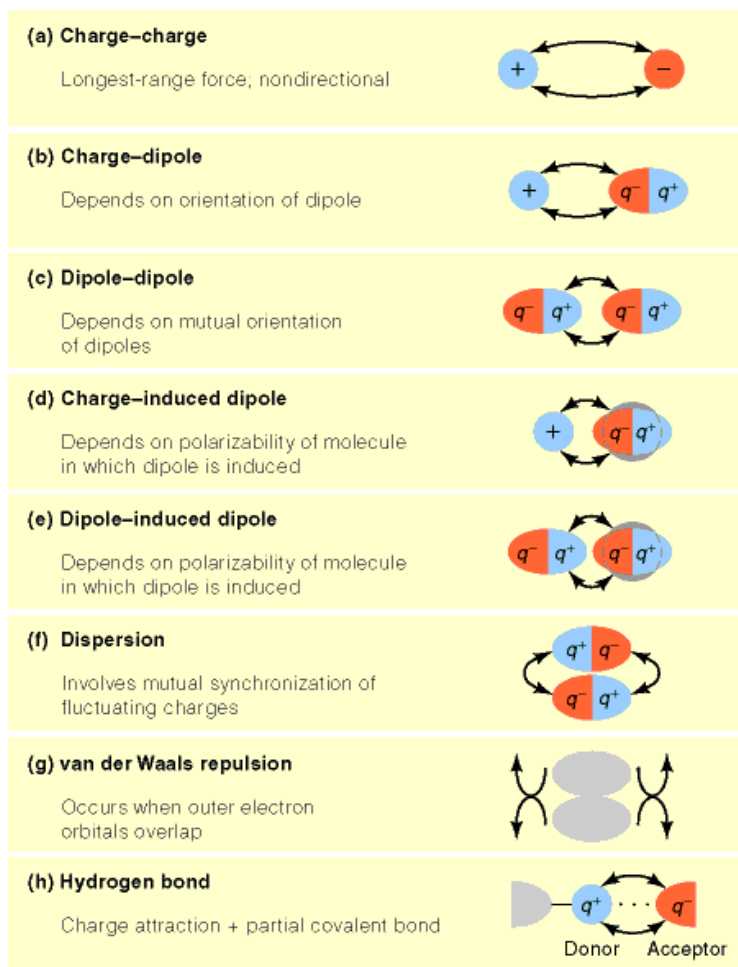


Imagen 5.15 Tipos de fuerzas intermoleculares¹⁴⁸

“La interacción no covalente más sencilla es la interacción electrostática entre un par de partículas cargadas.

La fuerza entre un par de cargas q_1 y q_2 , separadas por una distancia r , viene determinada por la ley de Coulomb.

¹⁴⁷ Sin Autor. Interacciones débiles en medios acuosos. My POV planet. Recuperado: 20/10/15
 URL: <http://pov-planet.webnode.es/bioquimica/el-agua/interacciones-debiles-en-sistemas-acuosos/>

¹⁴⁸ Sin Autor. Interacciones débiles en medios acuosos. My POV planet. Recuperado: 20/10/15
 URL: <http://pov-planet.webnode.es/bioquimica/el-agua/interacciones-debiles-en-sistemas-acuosos/>



Cuando dos cargas eléctricas de igual magnitud ($Q +$ y $Q -$) están separadas por una distancia (d) la fuerza de atracción entre ellas se mide mediante la siguiente fórmula:

$$F = K \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

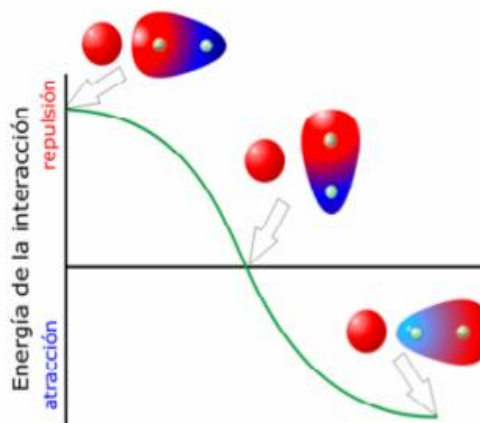
Si q_1 y q_2 tienen el mismo signo, entonces la fuerza es positiva y las cargas se repelen, pero, si hay una carga positiva y otra negativa, la fuerza será negativa de manera que las cargas se atraen. Obsérvese que, a mayor carga, mayor será la fuerza de atracción¹⁴⁹

La constante $K = 1/(4\pi\epsilon_0)$ donde ϵ_0 es la permisividad del vacío

5.10.4 Interacciones entre Dipolos¹⁵⁰¹⁵¹

Una molécula con momento dipolar puede interaccionar con un ion, o bien con otra molécula dipolar. En ambos casos hay una diferencia muy importante con las interacciones iónicas: ahora la orientación de los grupos que interactúan es muy importante, hasta tal punto que, en función de la orientación relativa, puede haber atracción o repulsión entre los grupos interactuantes.

Imagen 5.16 Relación entre la atracción - repulsión molecular con respecto a la energía de interacción ¹⁵²



¹⁴⁹ Sin Autor. Interacciones débiles en medios acuosos. My POV planet. Recuperado: 20/10/15
URL: <http://pov-planet.webnode.es/bioquimica/el-agua/interacciones-debiles-en-sistemas-acuosos/>

¹⁵⁰ Autor Desconocido. Fuerzas de Van der Waals. Recuperado el día: 23/10/15
URL: <https://bioquibi.webs.ull.es/bioquimica%20estructural/Archivoszip/enlacesnocovalentes/Fuerzas%20de%20Van%20der%20Waals.pdf>

¹⁵¹ Autor Desconocido. Elementos de Fisicoquímica UNEXPO. Recuperado el día: 20/10/15
URL: <https://fisicoquimicaunexpo.files.wordpress.com/2009/08/fuerzas-intermoleculares.pdf>

¹⁵² Autor Desconocido. Fuerzas de Van der Waals. Recuperado el día: 23/10/15
URL: <https://bioquibi.webs.ull.es/bioquimica%20estructural/Archivoszip/enlacesnocovalentes/Fuerzas%20de%20Van%20der%20Waals.pdf>



La dependencia de la energía de la interacción respecto la distancia es compleja. En el caso de que la orientación del dipolo o dipolos sea constante, es decir, que los dipolos estén fijos (por ejemplo, si forman parte de la estructura de una macromolécula), la energía varía respecto la distancia en función de $1/r^2$ para una interacción ion-dipolo, y en función de $1/r^3$ para una interacción dipolo-dipolo.

Si, por el contrario, los dipolos pueden moverse libremente, y teniendo en cuenta que las moléculas a temperatura ambiente se mueven constantemente, los efectos estadísticos del movimiento hacen que estas interacciones sean importantes a distancias más cortas, de tal forma que, en el caso de ion-dipolo dependen de $1/r^4$ y en el caso de interacciones dipolo-dipolo de $1/r^6$, es decir, que son importantes sólo cuando están prácticamente en contacto.

Por otra parte, el efecto del apantallamiento del campo eléctrico que se discutió anteriormente es también aplicable a esta situación, por lo que en general este tipo de interacciones son significativas sólo a muy cortas distancias o en medios apolares.

Dentro de este campo destacan por su importancia las interacciones de iones y grupos cargados con moléculas de agua, que originan la denominada "atmósfera de solvatación"

5.10.5 Fuerzas ion - dipolo ¹⁵³ ¹⁵⁴ ¹⁵⁵ ¹⁵⁶

La ley de Coulomb citada en apartados anteriores explica las fuerzas de ion dipolo, las cuales atraen entre sí un ion (catión o anión) y una molécula polar. La intensidad de esta interacción depende de la carga y tamaño de ion, así como de la magnitud del momento dipolar y del tamaño de la molécula.

Las cargas de los cationes están más concentradas puesto que estos iones suelen ser más pequeños que los aniones. En consecuencia, con una carga de igual magnitud un catión experimenta una interacción más fuerte con dipolos que un anión.

¹⁵³ Autor Desconocido. Fuerzas de Van der Waals. Recuperado el día: 23/10/15

URL: <http://bioquibi.webs.ull.es/bioquimica%20estructural/Archivoszip/enlacesnocovalentes/Fuerzas%20de%20Van%20der%20Waals.pdf>

¹⁵⁴ Autor Desconocido. Fuerzas Intermoleculares. Recuperado el día: 23/10/15

URL: http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/FuerzasIntermoleculares_11310.pdf

¹⁵⁵ Gonzalez, Monica. Interaccion Ion - Dipolo. La guía. Publicado 20 de Septiembre 2010. Recuperado: 20/10/15

URL: <http://quimica.laguia2000.com/conceptos-basicos/interaccion-ion-dipolo>

¹⁵⁶ Autor Desconocido. Elementos de Fisicoquímica UNEXPO. Recuperado el día: 20/10/15

URL: <https://fisicoquimicaunexpo.files.wordpress.com/2009/08/fuerzas-intermoleculares.pdf>



En otras palabras cuando nos encontramos hablando de un enlace polar, el átomo con mayor electronegatividad atrae los electrones hacia sí, generando un dipolo negativo en torno a sí mismo, mientras que se forma un dipolo positivo en el área del átomo con menor electronegatividad.

En la interacción ion-dipolo, el catión sufre atracción electrostática por el dipolo negativo, mientras que el anión es atraído por la fuerza electrostática hacia el dipolo positivo.

La hidratación es un ejemplo de interacción ion - dipolo; En una disolución acuosa de cloruro de sodio; los iones Na^+ y Cl^- se rodean de moléculas de agua, las cuales tienen un gran momento dipolar. cuando se disuelve un compuesto iónico como el cloruro de sodio, las moléculas de agua actúan como un aislante eléctrico que separa los iones.

En la molécula de agua, el átomo de oxígeno tiene mayor electronegatividad que el de hidrógeno, por lo tanto, existe un dipolo negativo en torno al oxígeno, y un dipolo positivo en torno al átomo de hidrógeno.

Entonces los cationes Na^+ sufren atracción electrostática por el dipolo negativo del átomo de oxígeno, y los aniones Cl^- , sufren fuerza de atracción electrostática por el dipolo positivo del hidrógeno.

Para poder intervenir en interacciones ion-dipolo, las moléculas polares tienen que tener momento dipolar distinto de cero.

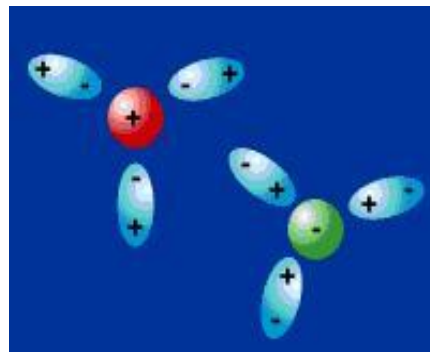
Por lo que, si ahora intentamos disolver cloruro de sodio en tetracloruro de carbono, una molécula no polar carece la capacidad de participar en una interacción ion - dipolo. En consecuencia, el tetracloruro de carbono es un mal disolvente de compuestos iónicos, al igual que la mayoría de los compuestos no polares.

En moléculas tales como el CO_2 o el CCl_4 , a pesar de las diferencias de electronegatividad entre los átomos de oxígeno y carbono, para el primer caso, y de carbono y cloro, para el segundo caso, el momento dipolar es cero. Esto sucede porque son moléculas simétricas, y los vectores de los momentos dipolares parciales de cada enlace covalente se anulan entre sí.



Por otra parte, también es importante hacer ver que ciertas moléculas con momento dipolar igual a cero, pueden tener dipolos transitorios si son sometidas a un campo eléctrico. En este caso se observarán interacciones ion-dipolo inducido. La magnitud de esta interacción depende de la capacidad de la molécula para que se le induzca un dipolo. Esta característica se denomina polarizabilidad.

Imagen 5.17 Interacción ion - dipolo para un catión y un anión¹⁵⁷



En la figura 8.6 se representa la interacción entre un catión y moléculas polares, y un anión y moléculas polares.

5.10.6 Fuerzas de Dispersión ¹⁵⁸

Fuerzas de dispersión de London Hasta ahora hemos considerado interacciones en las que existe, o bien carga neta o bien cargas parciales debida a la diferente electronegatividad de los átomos que están enlazados. Se presenta entre moléculas polares y también en no polares (únicas fuerzas en las no polares).

Al acercarse dos moléculas se origina una distorsión de la nube de electrones en ambas, a mayor cantidad de electrones en la molécula mayor polarizabilidad generándose dipolos transitorios, la intensidad de la fuerza depende de la cantidad de electrones de la molécula.

Podría parecer que las moléculas que carecen de enlaces polares serían incapaces de interactuar entre sí o con moléculas cargadas. Sin embargo, esto no es cierto. Para entenderlo hay que recordar la naturaleza mecanocuántica de los orbitales atómicos y moleculares.

Realmente un orbital es un volumen alrededor del átomo que encierra una determinada probabilidad de encontrar a los electrones.

¹⁵⁷ Autor Desconocido. Fuerzas de Van der Waals. Recuperado el día: 23/10/15
URL: <https://bioquibi.webs.ull.es/bioquimica%20estructural/Archivoszip/enlacesnocovalentes/Fuerzas%20de%20Van%20der%20Waals.pdf>

¹⁵⁸ Autor Desconocido. Elementos de Fisicoquímica UNEXPO. Recuperado el día: 20/10/15
URL: <https://fisicoquimicaunexpo.files.wordpress.com/2009/08/fuerzas-intermoleculares.pdf>



En promedio, la distribución de carga electrónica coincide con el orbital de que se trate, pero en un momento determinado los electrones se pueden encontrar en cualquier lugar del espacio definido por el orbital.

En resumen, a tiempos suficientemente cortos, se puede considerar que la nube electrónica fluctúa alrededor de un valor promedio:

En promedio, la distribución de cargas es simétrica y no hay momento dipolar

A tiempos cortos la nube electrónica fluctúa, creando momentos dipolares instantáneos

En principio, el campo eléctrico producido por un ion o por un dipolo próximos puede distorsionar la nube electrónica de una molécula sin momento dipolar, induciendo la formación de un dipolo que se asocia a la partícula inductora. Son las interacciones ion-dipolo inducido y dipolo-dipolo inducido.

Este tipo de interacciones decaen rápidamente con la distancia (la energía es proporcional a $1/r^6$). Más interesante es el hecho de que dos moléculas que carezcan completamente de carga o de momento dipolar, por ejemplo, dos hidrocarburos alifáticos, pueden unirse entre sí con una intensidad significativa.

Si dos partículas (átomos o moléculas) están suficientemente cercanas, las fluctuaciones de las nubes electrónicas se pueden influir mutuamente, oscilando en sincronía y creándose una atracción entre las partículas.

Este tipo de atracción es universal y siempre es una fuerza de atracción. De hecho, es la fuerza responsable de que se pueda obtener helio, hidrógeno o nitrógeno líquidos o, en su caso sólidos: las moléculas diatómicas (en el caso de los gases nobles, las moléculas son monoatómicas) de estos gases, sin momento dipolar neto, se asocian entre sí a temperaturas suficientemente bajas debido a la aparición de estas fuerzas de dispersión.

Pero no es necesario ir a temperaturas criogénicas: los hidrocarburos alifáticos de más de 4 carbonos son líquidos o sólidos (parafinas) a temperatura ambiente debido a que sus moléculas se asocian por este tipo de enlaces.



5.10.7 Resumen de las interacciones electrostáticas¹⁵⁹

El conjunto de fuerzas que se establecen entre moléculas o átomos, y que no se pueden considerar como enlaces covalentes o enlaces puramente iónicos se conoce colectivamente como "fuerzas de Van der Waals".

Pueden ser tanto atractivas como repulsivas. Un resumen de las diferentes fuerzas de carácter electrostático que actúan sobre moléculas o iones se presenta a continuación:

Tabla 5.14 Relación de los distintos tipos de interacciones y el carácter atractivo o repulsivo¹⁶⁰

Interacción	Naturaleza	Carácter	Dependencia de la orientación	Dependencia de la distancia
Iónica	Entre iones o grupos cargados	Atracción (1) Repulsión (2)	No	$1 / r$
Ion – Dipolo		Atracción (1) Repulsión (2)	Si	$1/r^2 - 1 / r^4$
Dipolo – Dipolo		Atracción (1) Repulsión (2)	Si	$1/r^3 - 1 / r^6$
Ion – Dipolo Inducido		Atracción	No	$1 / r^6$
Fuerzas de dispersión de London	Dipolo – Dipolo Inducido	Atracción	No	$1 / r^6$
Repulsión de Van der Waals		Repulsión	No	$1 / r^6$

(1) Su fuerza depende de la carga

(2) Su fuerza depende de la orientación del dipolo

En resumen, se trata de interacciones que realmente tienen importancia cuantitativa exclusivamente a distancias cortas o muy cortas.

Este fenómeno es extremadamente importante, porque supone que la energía de la interacción entre dos moléculas depende muy estrechamente de lo complementarias que sean sus formas y de la adecuada orientación relativa de los grupos polarizarles.

5.10.8 Enlaces de Hidrógeno ^{161 162}

El enlace de hidrógeno es un tipo específico de interacción no covalente y, por tanto, un enlace débil, el enlace de hidrógeno, tiene una gran importancia bioquímica. La estructura y las propiedades de muchas moléculas biológicas, así

¹⁵⁹ Autor Desconocido. Elementos de Fisicoquímica UNEXPO. Recuperado el día: 20/10/15
URL: <https://fisicoquimicaunexpo.files.wordpress.com/2009/08/fuerzas-intermoleculares.pdf>

¹⁶⁰ Autor Desconocido. Elementos de Fisicoquímica UNEXPO. Recuperado el día: 20/10/15
URL: <https://fisicoquimicaunexpo.files.wordpress.com/2009/08/fuerzas-intermoleculares.pdf>

¹⁶¹ Sin Autor. Interacciones débiles en medios acuosos. My POV planet. Recuperado: 20/10/15
URL: <http://pov-planet.webnode.es/bioquimica/el-agua/interacciones-debiles-en-sistemas-acuosos/>

¹⁶² Autor Desconocido. Fuerzas Intermoleculares. Recuperado el día: 23/10/15
URL: http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/FuerzasIntermoleculares_11310.pdf



como las del agua, el disolvente biológico universal, están determinadas en gran medida por este tipo de enlace.

Un enlace de hidrógeno es una interacción entre un átomo de hidrógeno unido covalentemente a un grupo donador (como -O-H o =N-H) y un par de electrones libres pertenecientes a un grupo aceptor (como O o N).

La longitud del enlace de hidrógeno es la distancia entre los centros de los átomos donador y aceptor.

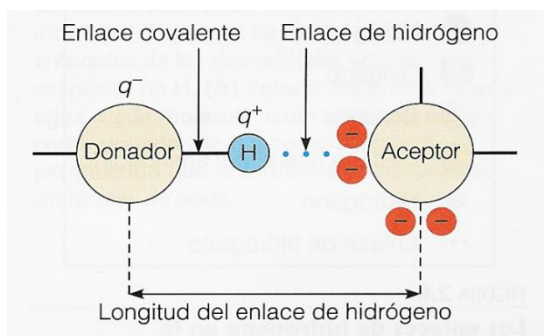


Imagen 5.18 Representación del enlace de hidrógeno a nivel molecular ¹⁶³

Gracias al carácter polar de la molécula de agua puede formar polímeros de hasta ± 8 moléculas a través de enlaces por puentes de hidrógeno que están en continua creación y destrucción. Cuando dos moléculas de agua se aproximan mucho (más de lo que estarían en ausencia del átomo de hidrógeno).

Se establece una atracción electrostática entre la densidad de carga negativa (aceptor) situada sobre el átomo de oxígeno de la molécula agua y la densidad de carga positiva (donador) situada sobre un átomo de hidrógeno de una molécula de agua adyacente.

Los tres átomos que participan en el puente de hidrógeno casi siempre están en línea recta ya que su relativa fuerza hace que sea un enlace altamente direccional, aunque el ángulo de enlace de dichos puentes puede oscilar desde los 0 hasta los 30° . Las propiedades físico-químicas de las moléculas que forman este tipo de enlace (H con F, O, N) se ven alteradas como por ejemplo los puntos de fusión y de ebullición, la viscosidad o la densidad.

¹⁶³ Sin Autor. Interacciones débiles en medios acuosos. My POV planet. Recuperado: 20/10/15
URL: <http://pov-planet.webnode.es/bioquimica/el-agua/interacciones-debiles-en-sistemas-acuosos/>



5.10.9 Radio iónico

El radio iónico se define en relación a iones. Un ion es una especie química con carga, ya sea esta positiva o negativa, y se originan debido a que los elementos tratan de parecerse al gas noble más cercano (elementos del grupo 18), ya que estos tienen una estabilidad superior debido a que sus niveles energéticos se encuentran completos.

El término ion significa "ir hacia" y hace referencia a un circuito eléctrico, es por eso que las sustancias cargadas positivamente se llaman *cationes* (van hacia el cátodo, polo negativo) y las sustancias cargadas negativamente se llaman *aniones* (van hacia el ánodo, polo positivo).

Como un átomo es eléctricamente neutro, cuando, por ejemplo, gana un electrón de más queda con cargado con un -1 mientras que si pierde un electrón queda cargado con un $+1$. La capacidad de un átomo para ganar o perder electrones está dado por su electronegatividad, electro positividad, energía de ionización y electroafinidad (propiedades que se verán más adelante).

El radio iónico de una especie que ha perdido un electrón es menor que el radio atómico original, esto se debe a que como existe una carga positiva más que negativas, los electrones se sienten mucho mas atraídos hacia el núcleo, reduciendo el radio.

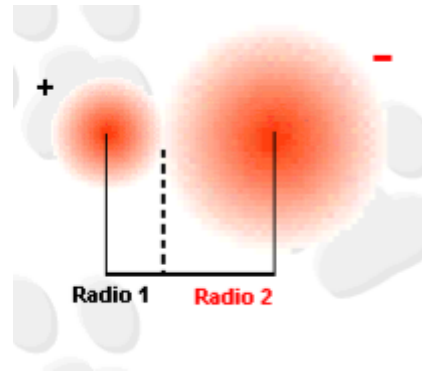
Por su parte, cuando un elemento gana un electrón, su radio iónico es mayor que su radio atómico de origen, debido a que ese último electrón que entró no se encuentra tan atraído hacia el núcleo y hace aumentar el radio.

El radio iónico, al igual que su par atómico, aumenta a medida que se "baja" en un grupo, pero a diferencia del radio atómico, no presenta una tendencia clara de crecimiento en un periodo, ya que depende del ion (y algunos elementos tienen más de un ion posible, como Cu, Fe, Mn, etc.)

En otras palabras, cuando un elemento gana o pierde electrones, se transforma en un ion y el valor de su radio será diferente. La determinación de dichos radios iónicos se hace de manera similar a los radios atómicos pero sobre estructuras cristalinas de compuestos iónicos, formados, como veremos, por iones perfectamente ordenados para maximizar las atracciones entre ellos y minimizar las repulsiones. La distancia que hay entre dos núcleos de dos iones adyacentes en un cristal iónico, es la suma de sus radios iónicos.



Imagen 5.19 Comparación en tamaño de radios iónicos de un anión y un catión



En resumen:

- El radio de un catión, ion positivo, es menor que el del átomo neutro del mismo elemento, ya que al ser menor el número de electrones, aumenta la carga efectiva del núcleo que atraerá más a los electrones restantes por lo que su tamaño disminuirá.
- El radio de un anión, ion negativo, es mayor que el del átomo neutro del mismo elemento, ya que al tener un electrón más, la carga efectiva del núcleo disminuirá y habrá una mayor repulsión entre los electrones, por lo que el radio aumentará.

5.10.10 Adsorción - Interacciones electroestáticas¹⁶⁴

La adsorción es un proceso mediante el cual se extrae materia de una fase y se concentra sobre la superficie de otra fase (generalmente sólida).

Por ello se considera como un fenómeno subsuperficial. La sustancia que se concentra en la superficie o se adsorbe se llama "adsorbato" y la fase adsorbente se llama "adsorbente".

El proceso de cambio iónico supone un intercambio de una sustancia o ion por otra sobre la superficie del sólido.

El término adsorción incluye la adsorción y la absorción conjuntamente, siendo una expresión general para un proceso en el cual un componente se mueve desde una fase para acumularse en otra, principalmente en los casos en que la segunda fase es sólida.

La principal distinción entre sorción (adsorción y absorción) y cambio iónico es que las ecuaciones que describen la sorción consideran solamente una especie química, de manera que la distribución del soluto entre la disolución y el sólido

¹⁶⁴ Sin Autor. Lección 17. Procesos de adsorción. Recuperado el día: 07/11/15
URL: <http://www.agua.uji.es/pdf/leccionHQ17.pdf>



responde a una relación simple, lineal o no. Las ecuaciones para el cambio iónico tienen en cuenta todos los iones que compiten por los lugares de intercambio.

En general, la adsorción desde una disolución a un sólido ocurre como consecuencia del carácter liofóbico (no afinidad) del soluto respecto al disolvente particular, o debido a una afinidad elevada del soluto por el sólido o por una acción combinada de estas dos fuerzas.

El grado de solubilidad de una sustancia disuelta es el factor más importante para determinar la intensidad de la primera de las fuerzas impulsoras. Cuanto mayor atracción tiene una sustancia por el disolvente menos posibilidad tiene de trasladarse a la interfase para ser adsorbida.

5.10.10.1 Tipos de adsorción¹⁶⁵

Cabe distinguir tres tipos de adsorción según que la atracción entre el soluto y el adsorbente sea de tipo eléctrico, de Van der Waals o de naturaleza química. La adsorción del primer tipo cae de lleno dentro del intercambio iónico y a menudo se le llama adsorción por intercambio, que es un proceso mediante el cual los iones de una sustancia se concentran en una superficie como resultado de la atracción electrostática en los lugares cargados de la superficie.

Para dos adsorbatos iónicos posibles, a igualdad de otros factores, la carga del ion es el factor determinante en la adsorción de intercambio. Para iones de igual carga, el tamaño molecular (radio de solvatación) determina el orden de preferencia para la adsorción. La adsorción que tiene lugar debido a las fuerzas de Van der Waals se llama generalmente adsorción física.

En estos casos, la molécula adsorbida no está fija en un lugar específico de la superficie, sino más bien está libre de trasladarse dentro de la interfase. Esta adsorción, en general, predomina a temperaturas bajas.

La adsorción de la mayoría de las sustancias orgánicas en el agua con carbón activado se considera de naturaleza física. Si el adsorbato sufre una interacción química con el adsorbente, el fenómeno se llama adsorción química, adsorción activa o quimisorción.

Las energías de adsorción son elevadas, del orden de las de un enlace químico, debido a que el adsorbato forma unos enlaces fuertes localizados en los centros activos del adsorbente.

¹⁶⁵ Sin Autor. Lección 17. Procesos de adsorción. Recuperado el día: 07/11/15
URL:<http://www.agua.uji.es/pdf/leccionHQ17.pdf>



Esta adsorción suele estar favorecida a una temperatura elevada. La mayor parte de los fenómenos de adsorción son combinaciones de las tres formas de adsorción y, de hecho, no es fácil distinguir entre adsorción física y química.

5.10.10.2 Factores que influyen en la adsorción e intercambio iónicos¹⁶⁶

La adsorción depende de las concentraciones respectivas del catión en el adsorbente y el líquido. La fuerza iónica de la solución determina la intensidad de la adsorción, pues la adsorción relativa es proporcionalmente más intensa en soluciones diluidas que concentradas.

Cuando se incrementa la fuerza iónica de la solución en contacto con la arcilla, la capa difusa se comprime y el potencial eléctrico decae más rápidamente con la distancia a la superficie.

Por consiguiente, la superficie potencial variará en función de la concentración de electrolito y del tipo de carga de la superficie de las partículas (constante o dependiente del pH).

Para una superficie pH dependiente, un incremento en la concentración de electrolito generará un descenso de potencial al producirse un aumento de la distancia a la partícula.

La temperatura influye en la medida que las reacciones de adsorción son normalmente exotérmicas y por tanto, el grado de adsorción será presumiblemente mayor, al disminuir la temperatura, aunque las variaciones normales de temperatura sólo tienen pequeños efectos sobre el proceso de adsorción.

La fuerza de enlace con que los iones son retenidos o adsorbidos en los lugares de cambio depende, asimismo, de otros factores, entre los cuales cabe citar los siguientes:

- Valencia y tamaño del ion
- Densidad de carga, estructura y superficie específica del material de intercambio (dependiente del tamaño de partícula)
- Concentración relativa de los cationes presentes
- Contenido de agua en el sistema (efecto dilución)

¹⁶⁶ Sin Autor. Lección 17. Procesos de adsorción. Recuperado el día: 07/11/15
URL:<http://www.agua.uji.es/pdf/leccionHQ17.pdf>



En general, la fuerza de enlace de los cationes depende de su valencia, tamaño efectivo e hidratación y de las características del adsorbente.

La capacidad de intercambio varía, para un determinado tipo de arcilla, con el tamaño de la partícula, siendo más elevado en tamaños finos, por ser mayor su superficie específica.

Para arcillas diferentes, la capacidad depende de la estructura; así, por ejemplo, en el caso de la montmorillonita, todos los cationes situados dentro de la estructura son intercambiables, mientras que los cationes intercapa de la illita no son tan fácilmente cedidos porque forman parte de la red.

La teoría de Gouy-Chapman predice que los iones de igual carga son adsorbidos con igual fuerza sobre la superficie sólida cargada; en la práctica, sin embargo, el radio hidratado, o bien la polarización del ion, determinan la fuerza de adsorción, siendo más fuertemente retenidos los de menor radio hidratado.

La hidratación es directamente proporcional a la carga del ion e inversamente proporcional al radio iónico. Supone un incremento del tamaño del ion y por tanto reduce su movilidad.

Los radios iónicos hidratados determinan la movilidad en el filtro de arcilla y, por consiguiente, la concentración relativa de los metales en las aguas. Si se asume que las fuerzas de enlace en la adsorción, son esencialmente electrostáticas y que bajo condiciones ordinarias los iones adsorbidos están hidratados.

Los cationes con radios hidratados más pequeños se acercarán a los lugares de carga negativa más fácilmente y serán retenidos con más fuerza que un catión de mayor radio hidratado.



6. DESARROLLO EXPERIMENTAL

6.1 Desarrollo pre- experimental del sistema sinérgico seleccionado.

Este apartado está orientado a la selección del equipo a integrar de forma sinérgica, tomando en cuenta tanto la actuación primaria de eliminación de contaminantes, así como también el efecto secundario de cada uno de las tecnologías seleccionadas.

Para de esta forma predecir las posibles matrices de tratamiento generadas por la integración de los tratamientos regeneradores elegidos; resulta importante mencionar que dicha selección se realizó bajo la creciente necesidad de producir la regeneración de aguas residuales urbanas con menores índices de carga microbiana ya que a mayor calidad de agua la ventana de posibles usos de la misma se incrementa en gran medida.

Ahora bien dentro de esta sección no solo se presentan descripciones de los sistemas de tratamientos integrados en un solo diseño operativo sino que también se resaltan y se enfoca especial atención en la identificación de variables a controlar sobre el sistema visto como un todo.

Es decir dentro de las experimentaciones se llevaran a cabo ciertas modificaciones del sistema global para lograr realizar comparaciones representativas acorde a las eficiencias obtenidas, debido a que estas representan en gran medida un factor decisivo en la obtención de un efecto sinérgico y no a la sumatoria de efectos individuales por parte de las tecnologías seleccionadas.

6.2 Objetivo fijado por el tratamiento regenerador.

Definir claramente este punto, resulta fundamental para alcanzar la elaboración eficiente de un diseño óptimo de tratamiento, por lo tanto, es importante mencionar que dos de las mayores preocupaciones dentro de la regeneración de las aguas residuales con buena calidad se encuentra la eliminación de: carga metálica.

La ausencia de estos contaminantes en un agua obtenida mediante un sistema integrado en un solo paso operativo representa la máxima eficiencia de regeneración, ya que la calidad del agua producto permite su empleo en una gamma mucho más amplia de aplicaciones.



Mientras que por otra parte se remontan a importantes ventajas que recaen en el corto tiempo de tratamiento, el bajo consumo energético, el mantenimiento de un solo equipo y el poco espacio empleado por la instalación.

6.3 Selección y descripción del sistema de tratamiento sinérgico: RET - FIL

La eficiente elección e integración de los sistemas de tratamiento en operaciones de un solo paso, favorecen en gran medida a que se presenten ciertos efectos sinérgicos sobre el agua residual a tratar.

Es decir que el cumplimiento de los objetivos fijados anteriormente depende de manera directa no solo de las posibles matrices de descontaminación alcanzadas por el efecto sinérgico de las tecnologías en selección; si no también del diseño adecuado de las mismas.

Ya que se pueden elegir dos tipos de tratamientos que sean altamente compatibles entre sí, sin embargo, si no se posee una buena gestión del montaje operativo (mantenimiento, distancia de exposición al tratamiento, posicionamiento óptimo de los equipamientos etc.) los resultados obtenidos no serán satisfactorios.

Ahora bien, la integración de un sistema de filtración concreta la función de eliminar en gran medida la carga contaminante disuelta metálica en el agua a tratar; por dichas razones se seleccionó el tratamiento de filtración con material filtrante empacado

Ya que esta tecnología reúne características específicas que encajan de manera eficiente con el sistema de filtración, tal y como lo es la disminución de sólidos suspendidos lo que contribuye en una remoción más eficiente de contaminantes.

6.3.1 Estudio de los subsistemas del sistema sinérgico RET – FIL

Mediante la descripción de los subsistemas es posible identificar ciertas medidas necesarias en relación a la: planeación de operación, mantenimiento y ergonomía del equipo.

Dichos puntos deben de ser tomados en cuenta a la hora de generar el posible diseño experimental que no solo cumpla con los objetivos de regeneración, sino que también resulte rentable; este punto es fundamental debido a que en muchas ocasiones se generan prototipos experimentales que a pesar de ser eficientes a nivel



laboratorio, no son rentables a la hora de extrapolar dicha tecnología a una escala de aplicación real.

Con el objetivo de lograr una mejor comprensión de los mecanismos de regeneración del sistema sinérgico RET - FIL, es necesario estudiar sus componentes principales.

6.3.1.1 Subsistema de Filtración

Como ya se mencionó anteriormente la selección del material filtrante es crucial para la efectividad del sistema RET-FIL. Dentro de esta sección cabe destacar que se remarca el “aprovechamiento de la sílice micro- amorfa de la planta geotérmica de cerro prieto”¹⁶⁷ como un residuo industrial que se genera contante producto de la incrustación en las tuberías de los posos extractores.

Dicho materia se considera como óptimo para la generación de filtros una vez que ya ha sido purificado puesto que posee características como: alta área superficial y capacidad de intercambio catiónico, propiedades que convierten a la sílice en un material ideal para la remoción de sólidos suspendidos así como también cabe la posibilidad de que retenga metales disueltos en la matriz de agua contaminada.

En secciones presentadas a continuación se describirán las propiedades, la obtención y la futura aplicación de la sílice micro- amorfa.

6.3.1.2 Sílice como un material de filtración.

Sin duda, uno de los materiales que a través del tiempo ha estado presente en el uso cotidiano ha sido el material cerámico, a fecha se ha logrado encontrar, aplicar y diseñar una metodología que nos permite el elaborar materiales cerámicos, así como el de llevar a cabo una caracterización: “Fisicoquímica (Análisis Químico y Físico), Mineralógica (Difracción de Rayos X, Microestructural (Microscopia Electrónica de Barrido , Transmisión y Fuerza Atómica), Térmica (Análisis Térmico Diferencial/Gravimétrico, Dilatometría) Óptica (Índice de Refracción, Dispersión, Numero de Abbe, Luminiscencia y Transmisión), Mecánica (Tenacidad, Microdureza Vicker y Knoop, Módulo de Young)¹⁶⁸”

¹⁶⁷ Díaz, Cesar. Tratamiento químico de la escoria de sílice de una planta geotérmica para su aplicación en cerámica y vidrio. BOLSOC.ESP.CERAM.VIDR. 29, 3, 18J-184. 1990. Recuperado el día: 01/12/2014.
URL: <http://boletines.secv.es/upload/199029181.pdf>

¹⁶⁸ Díaz, Cesar. Tratamiento químico de la escoria de sílice de una planta geotérmica para su aplicación en cerámica y vidrio. BOLSOC.ESP.CERAM.VIDR. 29, 3, 18J-184. 1990. Recuperado el día: 01/12/2014.



De tal forma que es posible lograr ubicar a dichos materiales dentro del contexto de investigación científica para su posterior estimación de una aplicación tecnológica.

Dentro del proceso de elaboración, ha sido posible "el poder implementar de igual forma, dicha metodología, para utilizar como materia prima toda aquella considerada convencional: Sílice, óxidos y carbonatos principalmente.

Asimismo el de llevar a cabo una sustitución de uno o varios de los componentes utilizando una serie de residuos sólidos por ejemplo de sílice microamorfa de central geotérmica, cenizas volcánicas, etc.

De tal forma que los resultados arrojados, una vez caracterizados los respectivos materiales y el resultado positivo, ha posibilitado elaborar materiales de vidrio, vitrocerámicos y cerámicas tanto tradicionales (refractarios de sílice y circón), así como porcelanas sanitarias y avanzadas como son nitruros de silicio y mullitas¹⁶⁹, permite el estimar el uso de residuos sólidos de tipo inorgánico, como una alternativa de materia prima.

Al momento, se han logrado múltiples avances en nuestra Universidad, hoy en día se trabaja en dicha línea de investigación, se está capacitando recursos humanos, se tiene el apoyo externo nacional e internacional; por lo que se pretende fortalecer dicha línea de investigación extendiendo la aplicación de material a base sílice microamorfa, con el objetivo principal de ser empleada como sustrato en procesos de adsorción y retención iónica y/o para elaborar filtros tratadores de agua residual depurada.

Es crucial hacer un énfasis en la importancia que representa estudiar a fondo la materia prima que será empleada dentro de este trabajo, primeramente, es importante remarcar que sílice o dióxido de silicio es el nombre dado a un grupo de minerales compuestos de silicio y oxígeno, los dos elementos más abundantes en la corteza terrestre. La forma más frecuente de presentación en la naturaleza es en forma cristalina, y más raramente en estado amorfo.

Ahora bien, dichas formas de sílice cristalina se presentan principalmente en cuatro formas: cuarzo, cristobalita, tridita y trípoli, siendo la primera la más abundante. La otra forma de presentación, sílice amorfa, se presenta principalmente en forma de tierra de diatomeas. Se encuentran como un componente común de las rocas y la tierra y se producen en algunas operaciones

URL: <http://boletines.secv.es/upload/199029181.pdf>

¹⁶⁹ Díaz, Cesar. Tratamiento químico de la escoria de sílice de una planta geotérmica para su aplicación en cerámica y vidrio. BOLSOC.ESP.CERAM.VIDR. 29, 3, 18J-184. 1990. Recuperado el día: 01/12/2014.

URL: <http://boletines.secv.es/upload/199029181.pdf>

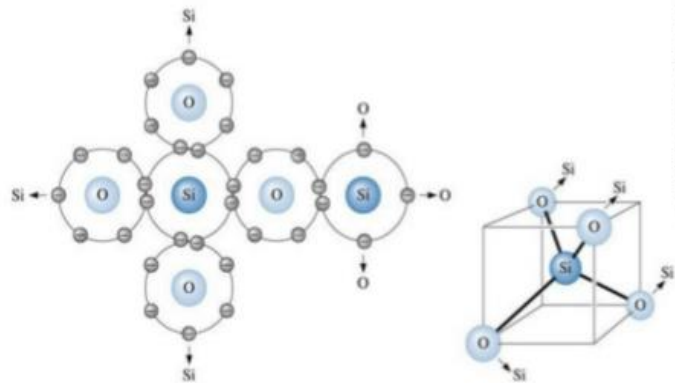


industriales (procesos de fundición y fabricación de ladrillos, cerámica, porcelana, cristales), por lo que muchos trabajadores están potencialmente expuestos (especialmente en canteras y trabajos subterráneos).¹⁷⁰

Por otra parte, es necesario resaltar que los enlaces silicio - oxígeno son mucho más cortos y más fuertes (809 frente a 538 kJ/mol) que los enlaces carbono - oxígeno. La polaridad de este enlace aumenta hacia el oxígeno.

Cabe destacar que el dióxido de silicio cuenta con una gran capacidad de absorción y se puede utilizar en líquidos de alta densidad. Se utilizan como anti aglomerantes por la misma capacidad de absorción.¹⁷¹

Imagen 6.1 Estructura molecular (tetraédrica) de la sílice y su respectiva distribución electrónica en los enlaces Silicio - oxígeno ¹⁷²



¹⁷⁰ Autor Desconocido. Sílice. Recuperado: 15/10/15

URL: <http://aetox.es/wp-content/uploads/2009/04/silice.pdf>

¹⁷¹ Sin Autor. Propiedad de QuimiNet. El uso de dióxido de silicio en la industria.

Publicado el día: 31/04/10 Recuperado el día: 10/10/15

URL: <http://www.quiminet.com/articulos/el-uso-del-dioxido-de-silicio-en-la-industria-42402.htm>

¹⁷² Autor desconocido. Ciencia e Ingeniería de Materiales. Capítulo 2 - Estructura Atómica. Recuperado el día: 16/10/15

URL: <http://es.slideshare.net/almendraprado3/askelandphulnotes-ch02printable-1>



Tipos de sílices ¹⁷³

- **Sílice precipitada:** Es una forma sintética, blanca y amorfa de dióxido de silicio; con la misma composición química que la arena, SiO_2 . Sus características están determinadas por su distribución de tamaño de partícula, porosidad, superficie específica y pureza.

Es un material sintético de múltiples aplicaciones, imprescindible en ámbitos tan dispares como los productos farmacéuticos o los neumáticos ecológicos.

- **Sílice fume:** La sílice fume es un aditivo mineral natural amorfo, de gran finura, resultado de la reducción del cuarzo de alta pureza, con carbón de hulla y astillas de madera, en hornos de arco eléctrico durante la producción de silicio metal o ferro silicio.

Debido a su extrema finura y a su alto contenido de sílice, se convierte en un material ecológico muy efectivo, el cual puede reaccionar con los productos de hidratación del cemento portland para formar materiales de cementación secundario durante el proceso de hidratación.

En un cemento portland hidratado, el hidróxido de calcio, que no llega a reaccionar, es vulnerable a ataques químicos y a la percolación.

En los concretos normales y proyectados que contienen sílice fume, el hidróxido de calcio es consumido a través de reacciones, resultando en un concreto con muy baja permeabilidad y absorción y un incremento en la resistencia al deterioro bajo condiciones agresivas.

La sílice precipitada convencional está disponible en diferentes áreas superficiales. Los tipos de baja área superficial se procesan rápido y dan un buen refuerzo tensil al compuesto.

Al incrementarse el área superficial se mejora la resistencia a la abrasión y al corte y la viscosidad aumenta.

¹⁷³ Autor de QuimiNet. Los dos principales tipos de sílice. Recuperado el día: 13/10/15
URL: [://www.quiminet.com/articulos/los-dos-principales-tipos-de-silices-2782524.htm](http://www.quiminet.com/articulos/los-dos-principales-tipos-de-silices-2782524.htm)



Usos y aplicaciones de la sílice¹⁷⁴

Adhesivos:

Gracias al desarrollo especial del dióxido de silicio hidrofóbico se han podido producir adhesivos estructurales que pertenecen a tecnologías avanzadas. Dichos adhesivos estructurales permitirán la unión de distintos materiales como el acero, el aluminio, el magnesio y el plástico.

Numerosos procesos se pueden beneficiar con las ventajas técnicas y las mejoras que pueden llevarse a cabo con la adecuada selección de dióxidos que han sido especialmente desarrollados para la industria de adhesivos y selladores especiales.

El dióxido de silicio no sólo mejora las propiedades mecánicas y reológicas, sino que también actúa como contraria a la solución de los agentes que mejoran la estabilidad de almacenamiento y procesamiento de los adhesivos y selladores.

Industria alimenticia:

Los productos alimenticios que se disuelven en agua a veces muestran retraso al mojarse o crean grumos cuando se remueven. Una ventaja más del advenimiento de un dióxido de silicio hidrofóbico grado alimenticio es que dicho polvo mejora la humectabilidad e incluso ayuda a que no se formen grumos.

Esto se debe a que el polvo de silicio es envolvente, así actúa como titular de un espacio entre el individuo y las partículas de polvo. En los espacios del agua el dióxido silicio proporciona una buena retención de los polvos de colores y una alta transparencia una vez que se suscitó en el agua.

La adición del dióxido de silicio ayuda a evitar la aglomeración de manera eficiente, permitiendo a los productores de polvos ofrecer permanentemente un producto de alta calidad en todo el mundo, por lo anterior, los productos alimenticios tratados con dióxido de silicio muestran estabilidad y largo almacenamiento.

¹⁷⁴ Sin Autor. Propiedad de QuimiNet. El uso de dióxido de silicio en la industria.

Publicado el día: 31/04/10 Recuperado el día: 10/10/15

URL: <http://www.quiminet.com/articulos/el-uso-del-dioxido-de-silicio-en-la-industria-42402.htm>



Industria farmacéutica:

Los métodos de producción son rentables y fiables hoy en día son una necesidad absoluta en la industria farmacéutica. Esta es sólo una de las razones por lo cual el dióxido de silicio se ha convertido en uno de los más importantes y frecuentemente utilizados excipientes farmacéuticos.

La mejora de las propiedades de flujo de los materiales necesarios para la moderna fabricación de tabletas y capsulas son nada más un ejemplo de las ventajas obtenidas por el uso del dióxido de silicio. También puede mejorar considerablemente la fabricación como las propiedades de muchas otras formas de drogas.

El producto dióxido de silicio Pharma se destina específicamente a la industria farmacéutica, después de haber sido probado de conformidad con los europeos, americanos y japoneses farmacopeas (Ph. Eur. y USP/ NF) se suministra con un certificado de análisis.

Pinturas y tintas:

El dióxido de silicio se utiliza principalmente en las pinturas y recubrimientos para control de las características reológicas, como agente tixotrópico, como contraria a la solución de agente y para ayudar en la prevención de la oxidación y la corrosión, estos productos deben añadirse en las concentraciones de 0.5% - 2%.



6.3.1.2.1 Estado amorfo

El estado amorfo (etimológicamente "sin forma") es un estado excepcional de la materia en la naturaleza, puesto que normalmente una sustancia se presenta, en nuestras habituales condiciones de presión y temperatura, en su estado cristalino, líquido o gas.

Sin embargo, actualmente, la utilización de materiales sintéticos amorfos es una práctica normal en diversas aplicaciones tecnológicas.¹⁷⁵

Imagen 6.2 Diferencia entre estructura amorfa y cristalina de la sílice¹⁷⁶

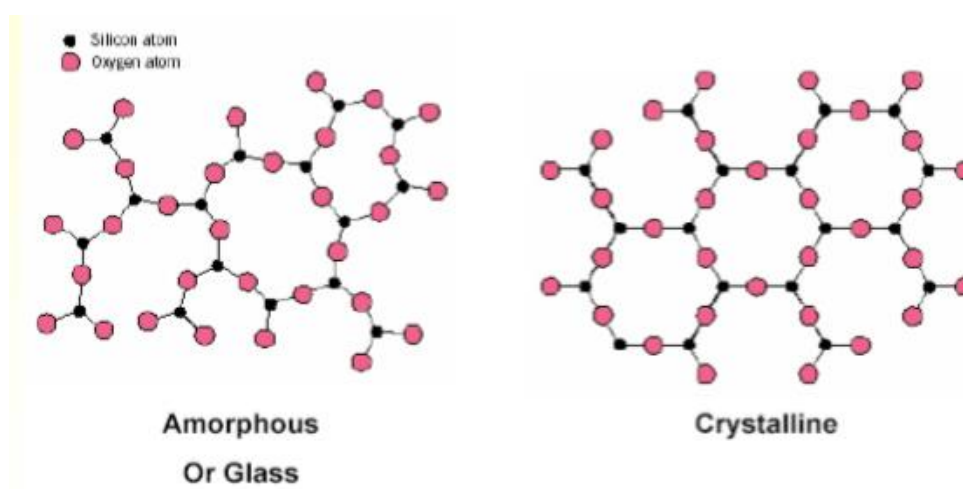


Imagen 6.3 Parámetros estructurales en silicio amorfo y cristalino¹⁷⁷

Silicio Amorfo				Silicio Cristalino		
i	z_i	r_i (Å)	d_i^2	z_i	r_i (Å)	d_i^2
1	4.0 ± 0.1	2.35	0.014	4	2.35	0.01
2	11.6 ± 0.5	3.86	0.051	12	3.86	0.02

¹⁷⁵ Autor desconocido. Universidad de Valladolid. Sólidos no cristalinos: el estado amorfo. Recuperado el día: 11/10/15
URL: https://alojamientos.uva.es/guia_docente/uploads/2011/469/45757/1/Documento4.pdf

¹⁷⁶ Autor desconocido. Universidad Carlos III de Madrid. Bloque V. Materiales Ceramicos. Sílice y Silicatos. Recuperado el día: 15/10/15

URL: <http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/tecnologia-de-materiales-industriales/bloque-v/Tema15-Silice-Silicatos.pdf>

¹⁷⁷ Autor desconocido. Universidad de Valladolid. Sólidos no cristalinos: el estado amorfo. Recuperado el día: 11/10/15
URL: https://alojamientos.uva.es/guia_docente/uploads/2011/469/45757/1/Documento4.pdf



6.3.1.2.2 Antecedentes de la sílice micro - amorfa en la planta Geotérmica de Cerro Prieto

La planta geotérmica de Cerro Prieto localizada en el municipio de Mexicali, Baja California (México) “está asentada geológicamente sobre rocas sedimentarias (areniscas, limonitas y lutitas).¹⁷⁸”

“Los principales minerales no metálicos presentes en los sedimentos son: caolinita, calcita, cloritas, dolomita, feldespatos, geles de hierro e illitas dispuestas en capas mixtas.¹⁷⁹”

Por cual, la zona de mayor afluyente de calor es la zona que contener mayor contenido de sílice. A través de ellos, circulan manantiales acuíferos que se cree proceden de mezcla de aguas del río Colorado con infiltraciones del acuífero.

Dichas mezclas elevan su temperatura en contacto con las rocas circundantes del área, dado que éstas se encuentran en estado recientemente solidificado y/o plástico, eliminan calor, que es aprovechado por el fluido presente y éste, se encarga de transportarlo a la superficie terrestre.

“Durante su recorrido, se transfieren al vapor elementos de los minerales presentes en los sedimentos tales como boro, calcio, litio, potasio, sílice y sodio, así como otros propios del agua de mar.

El magnesio, sulfatos y una cantidad pequeña de sodio procedentes de esta última se precipitan por un proceso inverso sobre la roca.¹⁸⁰”

El gradiente térmico (diferencial de temperatura) causado por el transporte del vapor a través de los conductos (tuberías) da lugar a una precipitación de sílice en estado sólido, siendo su aspecto físico el de polvo blanco.

“Este polvo, impurificado por los elementos anteriormente enumerados, se deposita en la superficie interior de los tubos y se endurece con el tiempo haciendo difícil su eliminación.

Como consecuencia, el rendimiento de aprovechamiento del vapor y/o fluido caliente disminuye. Para mantener alto este rendimiento se hace necesario sustituir las tuberías periódicamente o eliminar manualmente la capa

¹⁷⁸ Luz, Quintanilla Suarez, Francisco Fuente de calor en el campo geotérmico de Cerro prieto y su relación con la anomalía magnética Nuevo León, México. Geofísica internacional. Vol.33 Nym. 4 pp 575-584 , 1994.

¹⁷⁹ Espinosa, Hector Moosek, Federico El pozo M-3 del Campo Geotermico del Cerro Prieto. B.C México. Boletín de la asociación mexicana de geólogos petroleros Vol. XVI. Núms. 7-8. Sin fecha. Recuperado el día: 05/11/14URL: http://www.amgp.org/ws/articulos/1964/1964_Jul_Ago_03.pdf

¹⁸⁰ Diaz, Cesar. Tratamiento químico de la escoria de sílice de una planta geotérmica para su aplicación en cerámica y vidrio. BOLSOC.ESP.CERAM.VIDR. 29, 3, 18J-184. 1990. Recuperado el día: 01/12/2014. URL: <http://boletines.secv.es/upload/199029181.pdf>



precipitada.¹⁸¹ En la actualidad estos residuos se desechan sin haberseles encontrado ninguna aplicación práctica.

“La composición química de los fluidos geotérmicos subterráneos dependen de su historia de formación (tiempo, temperatura y contorno rocoso por lo cual se estima que contienen una amplia variedad y concentración de constituyentes disueltos. Los parámetros químicos más sencillos que se utilizan para caracterizar dichos fluidos son: el contenido total de sólidos disueltos (tsd) en partes por millón (ppm) o miligramos/litro (mg/l) y el pH.

Los principales componentes químicos identificados hasta la fecha en los fluidos geotérmicos están clasificados generalmente en mayoritarios y minoritarios, que a su vez se subdividen en cationes, aniones y compuestos gaseosos.

Dentro del grupo de los mayoritarios se encuentran a los cationes de: calcio, magnesio, sodio y potasio y a los aniones: sulfato, cloruro, fluoruro, carbonato y bicarbonato.

Los elementos químicos minoritarios están limitados por el tipo de fluido geotérmico.^{182 183 184}

Ya que dependiendo de su zona de ubicación será la concentración en donde se pueden identificar a los elementos trazas. Así, los componentes que se pueden encontrar son: aluminio, bario, boro, cesio, estroncio, hierro, litio, mercurio, plomo, rubidio, silicio y vanadio.

Dentro de los gases detectados se encuentran el dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, amoníaco, metano y dióxido de azufre, los cuales se identifican asociados a la fase gaseosa.^{185 186}

La proporción de estos componentes químicos varían de acuerdo al origen del fluido geotérmico. Así, “si se encuentra en un manto acuífero proveniente de

¹⁸¹ Autor desconocido. Capítulo I. Sin Fecha. Recuperado el día: 12/10/2014.

URL: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/3148/Capitulo1.pdf>

¹⁸² Díaz, C., Rincón, J. M. (1990). Tratamiento químico de la escoria de sílice de una planta geotérmica para su aplicación en cerámica y vidrio”. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 29(3), 181-194.

¹⁸³ Díaz Trujillo, G. C. (1994). Caracterización y purificación del residuo de sílice de la central geotérmica de Cerro Prieto (Baja California, México). Su aplicación a la producción de materiales vítreos y cerámicos. repositorio.uam.es (1994)

¹⁸⁴ Rincon, J. M., Romero, M., Díaz, C., Balek, V., & Malek, Z. (1999). Thermal behaviour of silica waste from a geothermal power station and derived silica ceramics. Journal of thermal analysis and calorimetry, 56(3), 1261-1269.

¹⁸⁵ Izquierdo, Georgina. Aragon, Alfonso. Portugal, Enrique. Arellano, Victor. De león, Jesus. Alvarez, Julio. Mineralogía de la zona mineralizada de sílice-epidota (ZMSE) del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto, B.C., México. Geotermia, Vol. 19, No. 2, 2006. Recuperado el día: 12/11/2014. URL: <http://132.248.9.34/hevila/Geotermia/2006/vol19/no2/1.pdf>

¹⁸⁶ Díaz, Cesar. Tratamiento químico de la escoria de sílice de una planta geotérmica para su aplicación en cerámica y vidrio. BOLSOC.ESP.CERAM.VIDR. 29, 3, 18J-184. 1990. Recuperado el día: 01/12/2014.

URL: <http://boletines.secv.es/upload/199029181.pdf>



infiltraciones marinas, el sodio estará presente en un alto porcentaje, el cual se adicionará al elemento sódico que proviene de la solubilidad parcial de minerales del tipo feldespático: halita, sodalita, nefelina, jadeita, etc.

En el caso de la existencia elevada de calcio, se considera que el fluido, se localiza o proviene de una zona en donde se presentó una disolución de rocas sedimentarias ya sea de origen marino del tipo de calizas y minerales de calcita, aragonita, anortita, fluoritas, wollastonita, así como de otra serie de feldespatos, anfíboles y piroxenos en donde el calcio es un componente importante.

El magnesio es otro de los elementos que se considera mayoritario y se relaciona con la solubilidad parcial de dolomitas y de rocas ígneas con presencia de olivino, biotita, hornblendas, piroxenos augíticos y en rocas metamórficas en relación con serpentinas, talco, piroxenos diopsídicos y tremolita.¹⁸⁷

"En el caso del potasio, se estima que su contenido está en proporción al grado de alteración de los feldespatos tipo ortosa, microclina, biotita, leucita y nefelina en rocas ígneas y metamórficas. La circulación de las aguas a través de depósitos evaporíticos, pueden reportar grandes contenidos del elemento en relación con procesos de disolución de la silvina.¹⁸⁸"

"La cantidad de sílice contenida en el fluido geotérmico se asocia a los procesos de disolución de los silicatos que están presentes en los distintos minerales, aunado con el valor del pH del agua, la temperatura y la velocidad de flujo.

Así, esta sílice incluye tanto a la solubilidad parcial del cuarzo y otros polimorfos presentes, en donde la proporción de solubilidad de cada mineral está en relación a su grado particular de pasar a fase líquida como la demostración realizada en 1964 por Ellis, donde entre los intervalos de temperatura de 250 - 350 C se observó que el grado de solubilidad de la sílice proveniente de rocas ígneas del tipo volcánicas era muy similar a la solubilidad que presenta la sílice de característica amorfa.

¹⁸⁷ Díaz, Cesar. Tratamiento químico de la escoria de sílice de una planta geotérmica para su aplicación en cerámica y vidrio. BOLSOC.ESP.CERAM.VIDR. 29, 3, 18J-184. 1990. Recuperado el día: 01/12/2014.
URL: <http://boletines.secv.es/upload/199029181.pdf>

¹⁸⁸ Espinosa, Hector Moosek, Federico EL POZO M-3 DEL CAMPO GEOTÉRMICO DEL CERRO PRIETO, B. C, MÉXICO. Boletín de la asociación mexicana de geólogos petroleros Vol. XVI. Núms. 7-8. Sin fecha. Recuperado el día: 05/11/14URL: http://www.amgp.org/ws/articulos/1964/1964_Jul_Ago_03.pdf



de áreas riolíticas y andesíticas. Chelishev en 1967 demostró que la distribución de rubidio y cesio entre la mica, el feldespato y el agua, tendía de una forma importante hacia la fase de solución cuando las temperaturas disminuían desde 600 C hasta 250 C.

En el caso de la presencia de los aniones, el que está en mayor cantidad es el cloruro, el cual varía desde 20 000 ppm en aguas de mar hasta 10 y 40 ppm en aguas asociadas a rocas sedimentarias.

Altos porcentajes de cloruros en agua subterráneas pueden estar relacionadas con masas de aguas salobres atrapadas en los sedimentos, soluciones de halita y minerales relacionados con depósitos evaporíticos y/o aguas salobres procedentes de incrustaciones.^{197 198 199 200 201 202 203 204}

"El flúor está también en concentraciones mínimas y por lo general se deriva de la solubilidad parcial de fluoritas y otros minerales que contienen flúor y su presencia está en función de la existencia de elementos tales como el calcio y cloruros de sodio ya que disminuyen y aumentan respectivamente su grado de existencia en el fluido geotérmico.

Por último, la presencia de los sulfatos, así como de componentes tales como sulfuros, carbonatos y bicarbonatos derivan de la existencia en el manto acuífero de yeso, anhídridos y minerales carbonatados.

La calidad del sulfato y componentes sulfurosos está en función de las temperaturas del medio, así como de la cantidad de minerales sulfatados alcalinos presentes, de la salinidad, presión y atmósfera predominante. En el caso de los carbonatos y bicarbonatos, se asocian a la cantidad de calcio y magnesio soluble

¹⁹⁷Díaz, C., Torres-Martínez, L. M., Garza, L., Avalos-Borja, M., & Rincón, J. M. (1993). Turning geothermal waste into glasses and glass ceramics. *American Ceramic Society Bulletin*, 72(10), 81-82

¹⁹⁸Díaz, C., Rincon, J. M., Ricielo di Scarti di silice da centrale elettrica geotermica per la produzione di ceramici silicatici, *Ceramurgia*, 12-15, (1996).

¹⁹⁹Valenzuela, D., Díaz, C., Avalos-Borja, M., Sinterization of doping mullite with rare earths using a silica rich residue from a geothermal power plant, *Engineering Materials* vols. 132-136 (1997) pp. 1862-1865, European Ceramic Society, (1997).

²⁰⁰Díaz, C., Formulation of Zircon refractory using silicic residue from a geothermal power plant as intergranular cement, *Engineering Materials* vols. 132-136 (1997) pp. 2284-2288, European Ceramic Society, Francia (1997).

²⁰¹C. Díaz, F.J. Valle-Fuentes, Use of silicon residue in ceramic and glass, *American Ceramic Society Bulletin*, 78(8), 112-115.

²⁰²Díaz, C., Gracia, H., Zayas, M. E., Espinoza, F. J., & Valle-Fuentes, F. J. (2000). Producing optical glass with geothermal waste. *American Ceramic Society bulletin*, 79(3), 57-59.

²⁰³Díaz, C., Salgado, S., Jordan, R., Cruz, E., & Zayas, M. E. (2003). GLASS-CERAMICS MADE FROM ANODISING PLANT INDUSTRIAL WASTE. *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 82(9), 4.

²⁰⁴Díaz Trujillo, G. C., Ruiz, R., Haro Vazquez, M. P., Carrillo Cedilla, E. G., Wakida, F. T., & Zayas Saucedo, M. E. (2008). Inorganic galvanic waste added to glass-ceramic affects crystallization process. *AMERICAN CERAMIC SOCIETY BULLETIN*, 87(6), 9201-9203.



presente, la concentración de dichos aniones y la cantidad de dióxido de carbono circundante influyen directamente en el valor del pH.

En base, al contenido total de sales solubles y de la existencia de aniones, los fluidos de características geotérmicas se clasifican en tres grupos: sulfatados, bicarbonatados y clorados. Los denominados sulfatados corresponden a aquellos fluidos que se localizan en áreas en donde hay una existencia predominante de rocas carbonatadas y formaciones de evaporitas.

Así como un contenido de salinidad entre el 0.5 y 3 g/l, en donde la profundidad de líquido se considera medio.^{205 206 207 208} "En el caso de los fluidos bicarbonatados, la salinidad promedio existente es de 1 g/l como máximo, y por lo general se trata de mantos acuíferos poco profundos constituidos por depósitos aluviales, materiales volcánicos y formaciones carbonatadas aflorantes o subaflorantes. Las temperaturas presentes pueden ser frías o hidrotermales.

Por último, los fluidos geotérmicos conocidos como clorados, son aquellos que han adquirido su carácter salobre debido a la disolución de depósitos salinos y/o intrusiones marinas o la presencia de esta salinidad debido al intercambio iónico que se ve relacionado con el aumento gradual de la presión y de la temperatura del medio circundante de dicho fluido y su localización es a una profundidad mayor que los mencionados anteriormente.

La anterior clasificación basada en la composición química, aunque se aportan datos de profundidad, temperatura y salinidad, no se ajusta a la mayoría de los yacimientos geotérmicos que muchas veces presentan composiciones mixtas. Para establecer correlaciones entre ellos es más exacto fundamentarse en los aspectos de origen, composición y localización.²⁰⁹"

²⁰⁵ Díaz, Cesar. Tratamiento químico de la escoria de sílice de una planta geotérmica para su aplicación en cerámica y vidrio. BOLSOC.ESP.CERAM.VIDR. 29, 3, 18J-184. 1990. Recuperado el día: 01/12/2014.
URL: <http://boletines.secv.es/upload/199029181.pdf>

²⁰⁶ Díaz, C., Rincón, J. M. (1990). Tratamiento químico de la escoria de sílice de una planta geotérmica para su aplicación en cerámica y vidrio". Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 29(3), 181-194.

²⁰⁷ Díaz Trujillo, G. C. (1994). Caracterización y purificación del residuo de sílice de la central geotérmica de Cerro Prieto (Baja California, México). Su aplicación a la producción de materiales vítreos y cerámicos. repositorio.uam.es (1994)

²⁰⁸ Rincón, J. M., Romero, M., Díaz, C., Balek, V., & Malek, Z. (1999). Thermal behaviour of silica waste from a geothermal power station and derived silica ceramics. Journal of thermal analysis and calorimetry, 56(3), 1261-1269.

²⁰⁹ Díaz, Cesar. Tratamiento químico de la escoria de sílice de una planta geotérmica para su aplicación en cerámica y vidrio. BOLSOC.ESP.CERAM.VIDR. 29, 3, 18J-184. 1990. Recuperado el día: 01/12/2014.
URL: <http://boletines.secv.es/upload/199029181.pdf>



“Una de las otras virtudes del vapor de agua propiciada por los mantos acuíferos y bajo ciertas propiedades físicas como la presión puede también ser usada en la Industria eléctrica en modalidad de proceso geotérmico.²¹⁰”

“La tecnología denominada Geotermia, es utilizada para generar energía eléctrica, de ésta se aprovecha el calor contenido en el agua que se han concentrado en ciertos sitios del subsuelo conocidos como yacimientos geotérmicos, y se basa en el principio de la operación de energía calorífica en energía eléctrica, con análogos a los de una termoeléctrica tipo vapor.²¹¹”

6.3.1.2.3 Central Geotérmica de Mexicali.

“En México se produce 2% de energía geotérmica del total en el país, el aprovechamiento de la energía geotérmica en la producción de electricidad es un procedimiento competitivo, en lo concerniente a eficiencia y costo, con otras alternativas que parten del petróleo, gas natural (termoeléctricas y ciclo combinado) y carbón ²¹²”.

“La Central Geotérmica Cerro Prieto es 2da más grande generadora de Electricidad en la Latinoamérica por la capacidad que generar electricidad 2,116 Mws.²¹³”

“Ubicada en el municipio de Mexicali, Baja California Norte, en el valle de Mexicali, a una altura de 11 metros sobre el nivel medio del mar, Coordenadas geográficas extremas al norte 32° 43', al sur 28 °00' de latitud norte; al este 112° 47', al oeste 117° 07' de longitud oeste.

Tiene un Porcentaje territorial el estado de Baja California representa el 3.7% de la superficie del país. Colinda al norte con Estados Unidos de América, Sonora y el Golfo de California; al este con el Golfo de California; al sur con Baja California Sur y el Océano Pacífico; al oeste con el Océano Pacífico.

²¹⁰ Quijano, J. Gutiérrez, L. Geothermal production in Mexico in the year 2000. Geothermal Resources Council Transactions. 25, pp. 593-596, 2011. Recuperado el día: 07/11/14 URL: <http://www.iie.org.mx/boletin022007/apli1.pdf>

²¹¹ Autor desconocido. Capítulo I. Sin Fecha. Recuperado el día: 12/10/2014.
URL: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/3148/Capitulo1.pdf>

²¹² Autor Desconocido CFE Proyecto Goetermoelectrico Cerro Prieto V. Sin fecha. Recuperado: 23/10/14
URL: <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/bc/estudios/2007/02BC2007E0001.pdf>

²¹³ Autor Desconocido CFE Proyecto Goetermoelectrico Cerro Prieto V. Sin fecha. Recuperado: 23/10/14
URL: <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/bc/estudios/2007/02BC2007E0001.pdf>



El suministro de energía eléctrica en el estado de Baja California se debe a las fuentes generadoras de las ciudades de Playas de Rosarito, Ensenada, Mexicali (siendo esta la más importante) que se encuentran en red y las cuales satisface las necesidades en el estado.

Una parte de los excedentes se exportan a Estado Unidos, y al vecino estado de Sonora. Actualmente da servicio a cerca de 600,000 usuarios, los cuales 53,000 son giros comerciales y 3,000 giros industriales.

La industria eléctrica cuenta con la capacidad productiva capaz de abastecer la demanda de los próximos siete años. La potencia real instalada es de 1,416 megawatts. En el año 2,000 dicha potencia es ampliada a 2,116 Mwatts.^{214 215}

- **"Cerro Prieto I:** "Conformada por cuatro unidades de 37.5 MW y una unidad de 30 MW con un total de 180 MW de capacidad instalada, su fecha de entrada en operación comercial de cada una de las unidades es la siguiente: Unidad 1, octubre 12 de 1973; unidad 2, mayo 9 de 1973, unidad 3, enero 31 de 1979, unidad 4, marzo 31 de 1979, unidad 5, noviembre 23 de 1981.
- **Cerro Prieto II:** Consta de dos unidades de 110 MW cada una, con un total de 220 MW de capacidad instalada. Su fecha de entrada en operación comercial es la siguiente: Unidad 6, enero 13° de 1986 y la unidad 7, junio 5 de 1987.
- **Cerro Prieto III:** Son dos unidades de 110 MW cada una, con un total de 220 MW de capacidad instalada. Su fecha de entrada en operación comercial es la siguiente: Unidad 8, enero 20 de 1986, unidad 9, septiembre 1° de 1986.

²¹⁴ Autor desconocido. Capítulo I. Sin Fecha. Recuperado el día: 12/10/2014.
URL: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/3148/Capitulo1.pdf>

²¹⁵ Diaz, Cesar. Tratamiento químico de la escoria de sílice de una planta geotérmica para su aplicación en cerámica y vidrio. BOLSOC.ESP.CERAM.VIDR. 29, 3, 18J-184. 1990. Recuperado el día: 01/12/2014.
URL: <http://boletines.secv.es/upload/199029181.pdf>



- **Cerro Prieto IV:** Última correspondencia de cuatro unidades de 25 MW cada una, con un total de 100 MW de capacidad instalada. Las unidades 10, 11, 12 y 13 entraron en operación comercial en julio 26 de 2000.^{216 217 218 219 220}.

Imagen 6.4 “Ubicación geográfica de la planta geotérmica de Cerro prieto ²²¹”



6.3.1.2.3.1 Proceso

El aprovechamiento de proceso geotérmico, en términos generales, es el generar energía a través del vapor sobrecaliente del subsuelo que se transporta en ductos conductores, para llegar a la superficie, posteriormente llega a un primer separador centrífugo de vapor-agua.

Posteriormente sale el vapor seco a un segundo separador para que entre con mayor grado de vapor seco ya que en el trayecto hay condensación por pérdidas de calor. Finalmente llegan a las aspas o alabes de una turbina, donde se transforma la energía cinética en mecánica y ésta, en operación en el generador eléctrico.

En la Operación de vapor, que, en este caso de Cerro Prieto, se extrae del subsuelo, por medio de perforaciones que transportan una mezcla agua-vapor que se envía a un separador Operación No.1 en donde se localizan cuatro áreas.

²¹⁶ Espinosa, Hector Moosek, Federico EL POZO M-3 DEL CAMPO GEOTÉRMICO DEL CERRO PRIETO, B. C, MÉXICO. Boletín de la asociación mexicana de geólogos petroleros Vol. XVI. Núms. 7-8. Sin fecha. Recuperado el día: 05/11/14URL: http://www.amgp.org/ws/articulos/1964/1964_Jul_Ago_03.pdf

²¹⁷ Autor Desconocido CFE Proyecto Geotermoelectrico Cerro Prieto V. Sin fecha. Recuperado: 23/10/14 URL:<http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/bc/estudios/2007/02BC2007E0001.pdf>

²¹⁸ Quijano, J. Gutiérrez, L. Geothermal production in Mexico in the year 2000. Geothermal Resources Council Transactions. 25, pp. 593-596, 2011. Recuperado el día: 07/11/14URL: <http://www.iie.org.mx/boletin022007/apli1.pdf>

²¹⁹ Barragan, Rosa Arellano, Victor Portugal, Enrique Vivar, Jesus de León Equilibrio gaseoso en el sector CP IV del campo geotérmico Cerro Prieto, B. C., México. Boletín IIE, 2007.

²²⁰ Autor desconocido. Capitulo I. Sin Fecha. Recuperado el día: 12/10/2014. URL: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/3148/Capitulo1.pdf>

²²¹ Espinosa, Hector Moosek, Federico EL POZO M-3 DEL CAMPO GEOTÉRMICO DEL CERRO PRIETO, B. C, MÉXICO. Boletín de la asociación mexicana de geólogos petroleros Vol. XVI. Núms. 7-8. Sin fecha. Recuperado el día: 05/11/14URL: http://www.amgp.org/ws/articulos/1964/1964_Jul_Ago_03.pdf



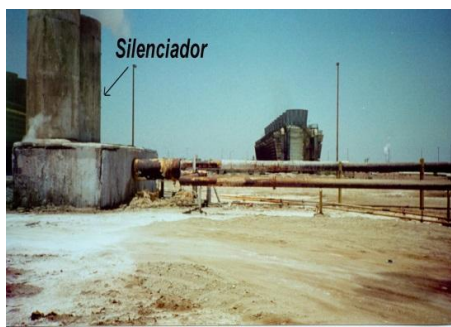
- A) Salida de vapor seco
- B) Salida de flujo geotérmico condensado
- C) y D) Son tuberías dirigidas hacia el silenciador



Imágenes 6.5 y 6.6 Sistema de extracción de vapor seco

El fluido Geotérmico al momento de llegar al silenciador lleva cierta presión y al momento de llegar hay un gradiente provoca el fenómeno del flasheo, el cual se convierte el líquido a vapor residual que en realidad no tiene mucho provecho en el proceso de Generación.

Las salidas del separador en los puntos A) y B) el cual la salida el flujo geotérmico condensado por casi la totalidad lleva una temperatura de 80° C promedio y el vapor provocador por el cambio en la presión atmosférica respectivamente.



Imágenes 6.7 y 6.8 Vista del silenciador y Salidas del Separador (A , B)

La polimerización de la sílice se presenta visualmente en el Silenciador y en las tuberías de la perforación, para ser llevadas a la superficie en la salida y durante el recorrido en las canaletas.



Después que el fluido Geotérmico pasa por varios ductos del interior al exterior, hacia separadores, llega liquido condensado que se recolectan en un canal para ser dirigido hacia una laguna de evaporación, y durante recorrido se va acumulando el residuo sólido como incrustación, cuyo componente principal es la sílice, hasta obtener agua casi sin sólidos para inyectar de vuelta al manto friático.



Imágenes 6.9 – 6.13 Residuos silícico depositado en: a) canaletas, b) Laguna de Evaporación, d) Laguna de Inyección y e) Laguna con residuo de sílice y sales.

Imagen 6.14. Salida del vapor a través de ducto en la planta Geotérmica²²².

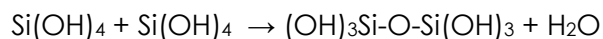


²²² Espinosa, Hector Moosek, Federico El Pozo M-3 del campo geotérmico del Cerro Prieto, B. C., Mexico. Boletín de la asociación mexicana de geólogos petroleros Vol. XVI. Núms. 7-8. Sin fecha. Recuperado el día: 05/11/14URL: http://www.amgp.org/ws/articulos/1964/1964_Jul_Ago_03.pdf

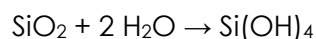


6.3.1.2.3.2 Sílice residual

La presencia de sílice como componente principal del sólido depositado sobre los distintos conductos (aquellos que transportan el vapor desde el interior de la corteza terrestre hacia la superficie y los que llevan la salmuera condensada hacia las lagunas de evaporación a una temperatura promedio de 100 °C), se explica por un proceso de polimerización del ácido monosilícico al efectuarse una reacción de condensación:



Esta sílice se encuentra en la salmuera como producto de la disolución del cuarzo presente de las distintas áreas en donde tienen contacto los manantiales localizados en el subsuelo:



“La reacción de polimerización del ácido monosilícico se ve afectada en gran medida por el pH. En 1954 Alexandre presentó estudios de pH dentro del margen de acidez concluyendo que el intervalo 1 - 3 la polimerización aumenta linealmente con la raíz cuadrada del tiempo, obteniéndose un producto con distribución homogénea. En cambio, a valores de pH mayores de 3, el producto es de aspecto heterogéneo y finalmente a un pH = 6, el proceso químico es casi instantáneo.

En lo que concierne a la sílice amorfa que proviene de la polimerización en aguas geotérmicas, en 1979 Rothbaun estudia el efecto de la temperatura y de la concentración sobre la velocidad de polimerización, logrando concluir que hay una disminución con el aumento de la temperatura.

La reacción presenta periodos de inducción que varían desde minutos hasta meses. Así, sugiere que se lleva a cabo una reacción auto catalítica iniciada por nucleación.

Asimismo, analiza la velocidad de formación de incrustaciones sobre un modelo controlado con descargas de agua salina sobre lozas cerámicas y tubos de acero a pH que están en un intervalo de 4, 7.5 y 9 con un periodo de reposo a fin de lograr un determinado grado de polimerización y como resultado, obtiene que aunque no es efectivo para reducir la cantidad de incrustaciones, sí se nota una

Un estudio posterior de sílice de incrustaciones depositadas sobre tuberías de vapor y/o salmuera caliente es realizado por Makrides en 1980, el cual se centra sobre la nucleación y crecimiento de la sílice proveniente de la salmuera sobresaturada con ácido silícico entre un intervalo de pH de 4.5 y 6.7, y temperaturas comprendidas entre 25 ° y 105 °C con diferente grado de salinidad y una concentración de sílice que varía entre 700 y 1,200 ppm.

Así también, se observó un efecto térmico, en el cual, a medida que disminuía la temperatura, se incrementaba la condensación y precipitación de la sílice. Así pues, la velocidad de condensación de la sílice a temperatura constante, es una función del grado de sobresaturación, del pH y del contenido de sales.^{223 224}

6.4 Diseño del sistema experimental de tratamiento de aguas residuales.

²²³Diaz, C., Torres-Martinez, L. M., Garza, L., Avalos-Borja, M., & Rincón, J. M. (1993). Turning geothermal waste into glasses and glass ceramics. *American Ceramic Society Bulletin*, 72(10), 81-82

²²⁴Diaz, C., Rincón, J. M., Riccio di Scarti di silice da centrale elettrica geotermica per la produzione di ceramici silicatici, *Ceramurgia*, 12-15. (1996).

²²⁵Valenzuela, D., Diaz, C., Avalos-Borja, M., Sinterization of doping mullite with rare earths using a silica rich residue from a geothermal power plant, *Engineering Materials* vols. 132-136 (1997) pp. 1862-1865. European Ceramic Society, (1997).

²²⁶Diaz, C. , Formulation of Zircon refractory using silicic residue from a geothermal power plant as intergranular cement, Engineering Materials vols. 132-136 (1997) pp. 2284-2288, European Ceramic Society, Francia (1997).

²²⁷C. Diaz, F.J. Valle-Fuentes, Use of silicon residue en ceramic and glass, American Ceramic Society Bulletin, 78(8),112-115.

²²⁸Diaz, C., Gracia, H., Zayas, M. E., Espinoza, F. J., & Valle-Fuentes, F. J. (2000). Producing optical glass with geothermal waste. *American Ceramic Society bulletin*, 79(3), 57-59.

²²⁹Díaz, C., Salgado, S., Jordan, R., Cruz, E., & Zayas, M. INDUSTRIAL WASTE. *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 82(9), 4.

²³⁰ Díaz Trujillo, G. C., Ruiz, R., Haro Vazquez, M. P., Carrillo Cedilla, E. G., Wakida, F. T., & Zayas Saucedo, M. E. (2008). Inorganic galvanic waste added to glass-ceramic affects crystallization process. AMERICAN CERAMIC SOCIETY BULLETIN, 87(6), 9201-9203



Debido a que cada uno de estos componentes genera una gamma de factores variables o contantes que se deben tomar en cuenta a la hora de llevar a cabo la experimentación y evaluación de resultados.

Por otra parte el estudio de las diversas distribuciones físicas posibles de dichos componentes, resulta fundamental para la generación de diferentes modelos experimentales de trabajo; cuya evaluación depende directamente de dos factores fundamentales:

- Eficiencia para regenerar el agua: Se tiene como prioridad encontrar no solo el arreglo físico que genere la mayor eficiencia de tratamiento sino que también se pretende diferenciar los factores adecuados para alcanzar el efecto sinérgico de los subsistemas en operaciones de un solo paso.
- Rentabilidad: A pesar de que se puede crear un diseño experimental que genere las máximas eficiencias de regeneración también es importante hacer ver que se debe de tener en cuenta el equilibrio contante con su rentabilidad que incluye variables como: el consumo energético, el espacio a emplear, la exigencia de demanda de tratamiento etc.

Es decir que el éxito del sistema de tratamiento sinérgico en un solo paso depende de manera directa del equilibrio entre estos dos factores.

6.4.1 Componentes básicos del sistema de regeneración.

Dentro de esta sección se describen los componentes necesarios para el buen funcionamiento del sistema de tratamiento de aguas, dentro de la selección de estos elementos se tomó en cuenta que se generan factores variables o contantes a la hora de operar la experimentación por lo que es importante tomar en cuenta que influyen de manera directa en la eficiencia de la regeneración.

Por otra parte, se debe mencionar que cada equipo posee su propia eficiencia y precisión, a pesar de que se traten de dos elementos de la misma marca o lote, siempre existen pequeñas diferencias acorde a su funcionamiento, limites de operación etc.



Por dicha razón una vez realizada la selección de los componentes a emplear y el inicio de la etapa experimental, se debe evitar la sustitución de los mismos. De dicha forma se evita y garantiza que las variables influyentes dentro de todas las experimentaciones son equivalentes.

De manera general se mencionan las operaciones principales que se llevan a cabo dentro del sistema de regeneración:

- Contención del agua muestra
- Homogenización del agua muestra
- Conducción del agua
- Zona de tratamiento sinérgico
- Recirculación del agua al sistema

Dentro de los siguientes apartados se llevará a cabo la descripción detallada de cada uno de los componentes necesarios para llevar a cabo el buen funcionamiento del sistema de regeneración de aguas residuales urbanas.

Imagen 6.15 Plan de fase experimental etapa de filtrado

A: Tanque recolector de muestra (2 L)

B: Bomba de agua

C: Conector "A" Bomba - Filtro

D: Filtro de Sílice Mirco - amorfa

E: Conector "B" Filtro - Tanque

F: Efluente hacia el tanque recolector

G: Sistema de homogeneización

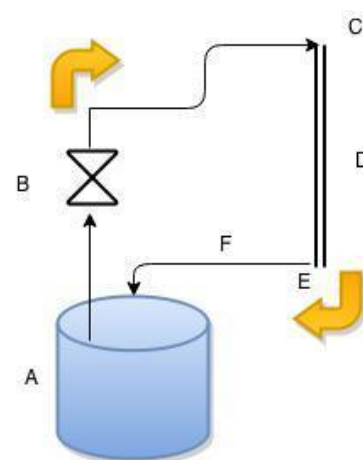


Tabla 6.1. Análisis del sistema de tratamiento.

Sistema a Evaluar	Análisis a Realizar
Bomba de agua	Capacidad y flujo hídrico
Filtro	Velocidad de filtrado
Tanque recolector	Tiempo de retención en el sistema
Canalización de flujo	Blanco de metales (interferencias)
Juego de conectores	Cambio de flujo



6.4.1.1 Contención y homogenización del agua muestra

Primeramente, es importante mencionar que estos componentes resultan fundamentales para el control de la muestra acorde a la selección de un volumen constante y homogenización continua del agua.

Por lo tanto, la contención del agua se lleva a cabo en un tanque de vidrio en donde se adaptan dos sistemas:

- Sistema de conducción (mangueras): El contenedor posee la adaptación inferior de una manguera que guía el efluente a dos posibles destinos (por medio de llave de paso) el primero corresponde a la alimentación del tratamiento sinérgico (por bomba peristáltica) mientras que la muestra se encuentre homogénea en todo momento durante su tratamiento se emplea un agitador magnético. segunda pertenece al descarte del agua una vez finalizada la experimentación.
- Motor homogeneizador de la muestra: Con el fin de garantizar que la muestra se encuentre homogénea en todo momento durante su tratamiento se emplea un agitador magnético.

*A continuación se presentan las características principales de dichos componentes:

Tabla 6.2 Características principales de los componentes de contención y homogenización de la muestra

Componente	Material	Función básica	Capacidad	¿Consumo energético	Variable a controlar
Tanque	Plástico	Contención de agua	2 L	NO	Conexión entre componentes
Motor	Agitador magnético	Homogenizar	200 Rev./min	SI	Sistema homogéneo



6.4.1.2 Bomba eléctrica y sistema de mangueras

Como ya fue mencionado anteriormente el empleo del sistema de conducción contribuye en la circulación del agua mediante el empleo de mangueras plásticas a través de todas las fases de tratamiento, por dicha razón es importante mencionar que dicho elemento representa el vínculo entre todos los componentes del modelo experimental regenerador.

Al mantener una importante conexión entre la contención, bombeo al sistema regenerador y recirculación del agua. Por otra parte, resulta fundamental la mencionar que durante la experimentación se utilizó una bomba eléctrica ya que esta es un tipo de bomba hidráulica de desplazamiento positivo el cual se distingue por su alta capacidad de desplazamiento de volúmenes hídricos a bajos costos operativos.

Es importante mencionar que la eficacia del tratamiento de las muestras depende en gran medida de la capacidad y eficiencia del bombeo. En otras palabras, se busca un sistema de alta eficiencia en base a las tasas de energía eléctrica consumidas con respecto a la capacidad de caudal máximo.

Por otra parte, se procuró en seleccionar un modelo de bomba eléctrica constituida únicamente por piezas plásticas para evitar la contaminación (piezas metálicas).

Por dichas razones en la siguiente tabla se presentan las características de la bomba eléctrica empleada para la etapa experimental, finalmente es importante mencionar que dentro del apartado 10.2 en la tabla 10.1 se describen a fondo las características principales de la bomba eléctrica empleada para la experimentación

6.4.1.4 Filtro de retención

Ver la sección 9.4.2 correspondiente al diseño de modelos experimentales



6.4.1.5 Otros componentes

Este apartado se enfoca en distinguir aquellos dispositivos que resultan necesarios para asegurar el buen funcionamiento de las tecnologías ya mencionadas en secciones anteriores o bien constituyen una medida de seguridad tanto para los equipos como para el experimentador. Dentro de estos componentes se encuentran:

- Fuente de energía: Necesaria para la alimentación eléctrica del sistema de homogenización así como de impulso de la muestra a través del sistema.

6.4.2 Diseño de modelos experimentales

Una vez que ya fueron descritos los dispositivos necesarios para la integración del sistema de regeneración de aguas residuales, se hace necesario el dimensionamiento físico del modelo experimental; es decir el análisis de las distintas posibilidades de distribución y adaptación de los diferentes componentes para así determinar cuál de los arreglos constituidos conlleva a alcanzar:

- Una eficiencia mayor de la regeneración de aguas
- Mayor equilibrio sinérgico
- Menor consumo energético
- Menor espacio ocupado
- Tiempos de residencia menores

Ahora bien se debe destacar que la adaptación de los subsistemas para la filtración selectiva en una misma unidad de operación resulta totalmente innovadora, por dicha razón la variabilidad entre los modelos experimentales generados no difiere en gran medida.



6.4.2.1 Columna empacada.

El principio básico de este diseño se centra en una columna de vidrio empacada con una cantidad bien definida del material filtrante, la operación de este sistema se enfoca en forzar el paso de un caudal de afluente por medio del material filtrante con lo que se reduce el tiempo significativamente y mejora el área de contacto entre el contaminante y la materia prima del filtro.

Puesto que como ya se citó anteriormente el flujo de agua que acarrea los metales atraviesa y está en contacto por completo con la materia granulada destinada a filtrar y retener a los contaminantes.

Dicho prototipo promete ser una opción muy rentable para desarrollar el proyecto, debido a la sencillez con la que se puede realizar la instalación del sistema. Por otra parte, también se encuentran ventajas que se centran en el poco espacio que una operación de este tipo requiere y la facilidad con la que se puede montar o reemplazar una tecnología de esta naturaleza.

Sin embargo, cabe destacar que durante la fase de desarrollo pre-experimental se tuvieron numerosas desventajas con el diseño propuesto ya que el material filtrante seleccionado posee un tamaño de partícula muy bajo representando de este modo un factor limitante en cuanto a la rentabilidad del proyecto.

Ya que debido a su bajo tamaño de partícula la porosidad tiene un valor muy bajo con lo que se dificulta el paso del agua, dichas desventajas son también derivadas del alto grado de compactación de la sílice micro- amorfa y su relación con la energía aplicada por unidad de área, debido a que la presión hídrica ejercida sobre la superficie de la materia prima provoca una compactación automática de la sílice con lo que se favorece en gran medida la obstrucción del flujo hídrico.

Experimentalmente se determinó que la velocidad del sistema a través de la columna de vidrio no empacada es de 1 litro por minuto, (la determinación de este valor se realiza midiendo un determinado volumen en un tiempo específico), una vez que empacada la columna (aproximadamente 0.3639 g) la tasa de filtración determinada fue de 0.06 L / min, es decir 94% menos que el valor obtenido en la columna no empacada.

En otras palabras no es rentable estructurar un procedimiento de tratamiento de agua regido bajo este principio teórico de filtración, pese a su sencillez de instalación y bajo costo, debido a que su eficiencia es sumamente baja.



Por ende, se ha enfocado en adaptar un proceso en donde se asegure el eficaz contacto del agua a tratar (carga metálica a retener) y la sílice micro amorfa excluyendo como una variable dependiente la velocidad de filtrado cuando se forzar el paso de flujo a través de la sílice micro amorfa.

Por dichas razones se hace necesario recurrir a otro tipo de diseño en donde la exposición de los contaminantes metálicos no dependa directamente de las características físicas (porosidad, compactación) de la sílice micro- amorfa, sino de un contacto de los contaminantes con la sílice micro amorfa sin forzar el paso a través del material. Las siguientes propuestas son descritas más adelante.

6.4.2.2 Retención vía Soxhlet

Primeramente, es fundamental remarcar en qué consiste el sistema Soxhlet, puesto que es un "tipo de material de vidrio utilizado para la extracción de compuestos orgánicos lipídicos, contenidos en un sólido, a través de un disolvente afín.

Está conformado por un cilindro de vidrio vertical de aproximadamente un pie de alto y una pulgada y media de diámetro. La columna está dividida en una cámara superior y otra inferior. La superior o cámara de muestra sostiene un sólido o polvo del cual se extraerán compuestos. Dos tubos vacíos, o brazos, corren a lo largo a un lado de la columna para conectar las dos cámaras.

El brazo de vapor corre en línea recta desde la parte superior de la cámara del disolvente a la parte superior de la cámara del sólido. El otro brazo, para el retorno de disolvente, describe dos U sobrepuestas, que llevan desde la cámara de la muestra el disolvente hasta la cámara de disolvente. El soxhlet funciona cíclicamente, para extraer las concentraciones necesarias de algún determinado compuesto.^{231 232"}

²³¹ Núñez, Carlos. Extracciones con Soxhlet. cenunez.com.ar. 2008.

Recuperado el día 16/03/15

URL: <http://www.cenunez.com.ar/archivos/39-extraccinconequipo-soxhlet.pdf>

²³² Sin autor. Extracción Soxhlet. Recuperado el día 12/03/15

URL: http://es.wikipedia.org/wiki/Extractor_Soxhlet

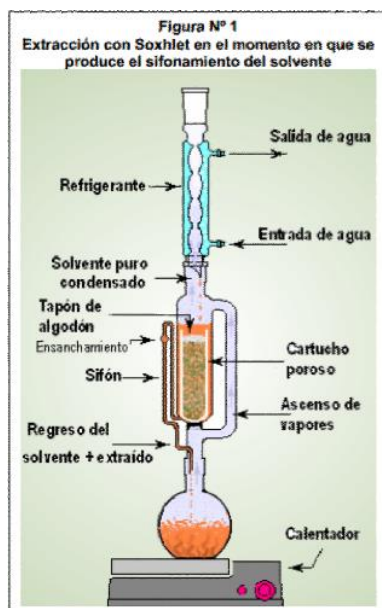


Imagen 6.16 Extracción con Soxhlet ²³³

Ahora bien, dentro de este punto resulta crucial detallar a fondo la adaptación realizada al equipo soxhlet para llevar a cabo la retención metálica en el material seleccionado.

Es importante remarcar que como ya fue mencionado anteriormente dentro de la experimentación realizada con un diseño de filtración en columna empacada se denotaron múltiples desventajas.

Por dichas razones es importante mencionar que se tomaron los principios operaciones del equipo soxhlet en relación al subsistema de recirculación del fluido para adaptar el tratamiento de agua residual depurada, el objetivo que persigue este proceso consiste en incrementar considerablemente el tiempo de exposición del contaminante y el sistema de tratamiento sin afectar la tasa de flujo.

Para comprender como está adaptado el proceso de filtración es necesario recordar que en el equipo soxhlet al destilarse de manera continua el disolvente se va acumulando progresivamente un volumen específico de fluido extractor hasta alcanzar un cierto nivel (altura en la U de vidrio específica para efectuar el retorno del solvente) este punto conlleva una recirculación del disolvente.

Resulta importante mencionar que el equipo soxhlet es una pieza independiente al sistema refrigerante (necesario para los procesos de destilado y extracción de grasas) por lo que al acoplar este equipo de forma individual con el afluente de agua a tratar se obtiene un proceso estable, robusto y constante.

Ya que el agua que entra por la parte superior del soxhlet se va acumulando gradualmente favoreciendo de este modo el contacto con la sílice micro amorfa previamente colocada en la cámara central (cámara de extracción en el caso de análisis de grasas y aceites en aguas residuales).

Tal y como se muestra en la imagen la bomba hidráulica continuara agregando de manera constante un volumen de agua que al llegar a cierto nivel

²³³ Núñez, Carlos. Extracciones con Soxhlet. cenunez.com.ar. 2008.
Recuperado el día 16/03/15
URL: <http://www.cenunez.com.ar/archivos/39-extraccinconequiposoxhlet.pdf>



se efectuara una recirculación hacia el tanque recolector de la muestra, para dejar más en claro dicho proceso este es representado en la imagen 9.17

Imagen 6.17 Sistema de retención: Acoplado a equipo soxhlet



6.4.2.3 Embudo abierto

Puesto que se está buscando dentro de esta sección el diseño experimental que conduzca a los mejores resultados con respecto a la velocidad de filtrado y la manera en que los contaminantes entran en contacto con el material filtrante.

Por dichas razones una de las propuestas radica en la utilización de un embudo abierto con sílice micro amorfa empacada, cabe destacar que es en el cuerpo del embudo donde se sitúa el material filtrante y no en el vástago (tubo de seguridad) puesto que de ser así se trataría simplemente de una columna empacada.

Un embudo es un instrumento utilizado para traspasar líquidos, canalizando el flujo hídrico hacia un punto específico, evitando así mismo que se derrame la sustancia a tratar; por otra parte, también es importante remarcar que también se emplea mucho para separar sólidos de líquidos a través del proceso llamado filtración descrito en el apartado 9.3.1 correspondiente al subsistema de filtración.

Un punto fundamental a remarcar es que los tamaños de los embudos de filtración varían acorde al volumen de la suspensión o del afluente a tratar, en la mayoría de los casos este tipo de instrumentos son de plástico o bien cuando nos encontramos de disolventes suelen ser de cristal.

La forma cónica es la más frecuente y sus diámetros oscilan usualmente entre 4 y 15 cm. Dentro de los ensayos experimentales se decidió trabajar con dos diferentes embudos ambos de plásticos, pero con diferentes diámetros el primero de 15 cm y el segundo de 50 cm, buscando visualizar una diferencia con respecto a la velocidad de filtrado alcanzada.



Fue necesario cortar una pieza de papel filtro en forma de disco, doblar en forma de cono y se coloca en el embudo. De manera que se colocaron distintas cantidades de la sílice micro amorfa y se vertía un volumen de 100 mililitros de agua, siendo necesario tomar el tiempo de filtración. Sin embargo, es necesario remarcar que independientemente del diámetro de embudo empleado los tiempos de filtración fueron muy altos, aproximadamente 15 minutos y 8 minutos para los embudos de 15 cm y 50 cm respectivamente.

Las razones citadas anteriormente dan pie a identificar la baja tasa de filtrado como el principal factor limitante para el sistema de tratamiento propuesto, puesto que, si se seleccionara dicho diseño experimental para llevar a cabo el proceso de tratamiento, se denotaría una baja rentabilidad puesto que con tiempos de retención tan altos se limita en gran medida el volumen de agua a tratar dentro del sistema.

Para comprender a fondo lo anteriormente citado pensemos en que en base a los valores obtenidos experimentalmente hablando se requeriría de un tiempo de una hora con veinte minutos para llevar a cabo la regeneración de un litro de agua, es por eso que no es rentable en idear un sistema experimental para llevar a cabo el estudio de la remoción metálica y mucho menos es factible llevar a escala real un tipo de tratamiento que utiliza como sistema de filtración un embudo abierto.

6.4.2.4 Suspensión de sílice micro amorfa – Retención

Como ha sido mencionado anteriormente el tiempo de contacto entre los contaminantes y el sistema de tratamiento resulta crítico para la selección del diseño experimental, puesto que se busca que sea un tiempo corto, pero con una alta efectividad. Por lo tanto se hace necesario mantener un contacto homogéneo de toda la muestra con la sílice micro amorfa.

En apartados anteriores se ha mencionado la dificultad que esto representa puesto que la materia prima en cuestión posee un tamaño de partícula muy pequeño lo que favorece en gran medida no solo la capacidad de adsorción o retención de los contaminantes sino también la compactación del mismo material lo que dificulta significativamente los diseños experimentales puesto a la baja tasa de filtración.



Por lo tanto, a modo de alternativa se ideó agregar directamente a la muestra acuosa una cantidad específica de sílice micro amorfa, generando de este modo una suspensión, dicho término es aplicado a la mezcla formada por un sólido en polvo o pequeñas partículas no solubles denominados como fase dispersa que se esparcen en un medio líquido llamado usualmente como agente dispersante.

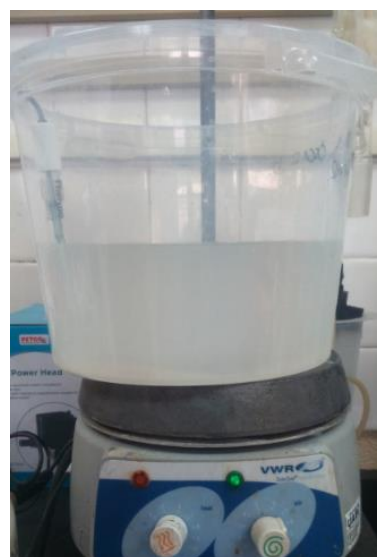
Es importante hacer hincapié en que las partículas que forman parte de una suspensión pueden ser microscópicas, y de distintos tamaños, dependiendo del tipo de sustancia.

En este diseño en particular se aprovecha en su totalidad las múltiples ventajas que ofrece el bajo tamaño de partícula de la sílice micro amorfa, puesto que lo que representaba una desventaja para las propuestas de filtros empacados debido al alto grado de compresibilidad de esta materia prima; Ahora resulta ideal para llevar a cabo una suspensión homogénea de partículas con altas capacidades de retención catiónica derivada de su elevada área superficial lo que se piensa favorecerá en gran medida los valores de remoción de carga metálica de las muestras acuosas.

Tal y como se puede observar en la imagen 9.9 se muestra la suspensión de aproximadamente 10 gramos de sílice micro amorfa, es importante hacer ver que dentro del diseño experimental se tomó en cuenta emplear un sistema de agitación magnética como parte de la homogenización constante de la muestra y la sílice micro amorfa puesto que es considerado como un factor crucial para llevar a cabo el tratamiento regenerador.

Cabe destacar que el principio de este diseño experimental se fundamenta en la modificación de la matriz acuosa, puesto que se adiciona una alta carga de partículas síliceas suspendidas que en constante homogenización estructuran una red de contacto y exposición con los iones metálicos que se encuentran en la muestra a tratar, favoreciendo de manera significativa las interacciones intermoleculares de tipo electro estáticas que favorecerán la retención o adsorción en la superficie de la sílice micro amorfa.

Imagen 6.18 Suspensión de 10 gramos de sílice micro amorfa para llevar a cabo el tratamiento de muestras acuosas.





6.5 Selección y descripción del agua a tratar.

Una vez planteadas las necesidades y los componentes básicos correspondientes del proceso de remoción de metales, es necesario llevar en primera instancia la experimentación y el estudio con respecto a las variables que favorezcan en mayor proporción la remoción y retención de iones metálicos en la matriz superficial de la sílice micro amorfa, controlando diferentes parámetros como lo son el pH al que se lleva a cabo la regeneración, la cantidad de materia prima empleada y el tiempo de exposición a los sitios activos del sistema de tratamiento.

Una vez determinada dicha condición se procede a llevar a cabo una aplicación directa del sistema de tratamiento sobre un agua proveniente de una industria, como es de pensar dentro de las características principales requeridas con respecto al tipo de afluente a seleccionar es la presencia de una carga metálica significativa, puesto que en base a esto es posible evaluar con mayor precisión y claridad la efectividad del sistema regenerador.

Es decir que la concentración inicial o bien la carga metálica de la muestra original requiere ser mayor a los límites de detección de las curvas de calibración del espectrofotómetro de absorción atómica, puesto que en el caso de tener cantidades menores a la concentración mínima detectable por el aparato no se podrá determinar con claridad si existe alguna remoción o no del metal en cuestión y en dado caso si la eliminación de dicho contaminante dependió directamente del sistema propuesto o bien de las condiciones de detección del aparato.

Por lo tanto, dentro de la etapa experimental llevada a cabo con una matriz real se esperan tener concentraciones superiores o equivalentes a 1 ppm de concentración inicial para ciertos metales, tampoco se puede esperar contar con una muestra real con la existencia de todos los metales empleados en fase sintética puesto que las caracterizaciones de los afluentes son directamente dependientes de la naturaleza de los procesos industriales.

Por lo tanto el agua seleccionada para esta etapa experimental pertenece al giro comercial relacionado con los procesos de galvanizado es decir recubrimientos metálicos de zinc y níquel, cabe destacar que una de las características de esta rama industrial se define por la generación de aguas residuales con cargas metálicas significativamente altas.

Es aquí importante hacer notar que dentro de la etapa experimental se prefirió trabajar con muestras provenientes de la industria puesto que como ya se mencionó anteriormente la concentración de los iones metálicos usualmente es



mayor que las aguas residuales urbanas (debido a su procedencia doméstica) con lo que es más sencillo observar el efecto que tiene el tratamiento propuesto sobre la carga contaminante.

Por otra parte, se hace notar que la diferencia entre las matrices del efluente industrial seleccionado y las aguas residuales urbanas tratadas no difieren de manera significativa puesto a su cantidad de sólidos suspendidos, y sus demandas químicas de oxígeno, por lo que se asume que los resultados obtenidos experimentalmente pueden ser aplicados tanto para efluentes domésticos como industriales.

Ahora bien, es importante remarcar que las dichas industrias usualmente cuentan con pequeñas plantas tratadoras destinadas a la remoción de sólidos suspendidos, turbidez y grasas en las descargas sin embargo no se cuenta con una operación específica para llevar a cabo la remoción de cationes metálicos.

Es pertinente indicar que de acuerdo con los registros históricos de la empresa los intervalos de [Zn] van desde los 3 hasta 12 mgs/L.

6.6 Identificación de variables a controlar en la experimentación

Primeramente, es necesario mencionar que las variables a controlar derivan de los modelos experimentales generados en el apartado 9.4.2, el distinto arreglo de cada uno de sus componentes genera una gamma de ventajas o desventajas que brindan cierta eficiencia al tratamiento de las aguas; algunos de estos factores pueden ser modificados a lo largo de las experimentaciones para generar una matriz de condiciones bajo las cuales el tratamiento de regeneración resulte más efectivo.

Es decir que por medio del análisis de los resultados de dichas modificaciones es posible encontrar las condiciones ideales para regenerar el agua en un equilibrio sinérgico.

Por otra parte, también encontramos factores que resultan ser contantes a lo largo de todas las experimentaciones, es decir que la modificación de estas condiciones no genera resultados representativos o bien dan lugar a datos no comparables entre las experimentaciones tal y como es el caso de: la temperatura, homogeneidad de la muestra, etc.



Ahora bien, es importante mencionar que el estudio de estos factores es fundamental la interpretación de resultados, ya que muchas de las explicaciones en relación a la eficiencia obtenida así como también de los contaminantes eliminados dentro del tratamiento radican de esta gamma de condiciones.

Por lo tanto para facilitar la identificación y estudio de estas se presenta la siguiente tabla en donde se mencionan los factores identificados así como su clasificación acorde a variable o constante.

Tabla 6.3. Identificación y clasificación de condiciones experimentales

Factor: CONSTANTE	Factor: VARIABLE
Composición de la muestra	Cantidad de materia prima
Temperatura	pH
Homogeneidad de muestra	Metales a remover
Tipo de muestra	
Volumen inicial de muestra	
Composición del medio filtrante	
Concentración de metales	

*** Una vez seleccionado el modelo experimental más eficiente, la distribución de sus componentes permanece constante*

6.6.1 Factores experimentales: Constantes

Factores que a lo largo de cada una de las experimentaciones no son modificados, debido a que se pretende tener un margen de equivalencias entre los ensayos para lograr así generar comparaciones representativas entre los resultados obtenidos.

Es decir que si uno de estas condiciones es diferente en una de las experimentaciones ya no nos encontramos hablando del mismo prototipo experimental si no de uno nuevo que por lo anterior requiere una evaluación independiente.



Es también importante mencionar que entre mayor sea el número de factores constantes y controladas, dentro de una experimentación, mayor será la representatividad de dicha prueba. A continuación, se describirán las condiciones experimentales clasificadas como constantes:

- Caracterización de la muestra: Ver sección 9.7.1 correspondiente a caracterización general de la muestra
- Temperatura (20 C): Un factor que puede influir tanto en la solubilidad de los flósculos (tomando en cuenta que son estructurados por hierro) así como en la actividad acuosa microbiana (decrece conforme la temperatura disminuye). El control de este parámetro se lleva a cabo en dos etapas:
 - Antes de iniciar el experimento: Es necesario que la muestra se temple a temperatura ambiente (Estabilización de la carga metálica)
 - Durante la experimentación: Uno de los componentes descritos como complementarios para el buen funcionamiento del reactor de electrocoagulación (que puede calentarse) es la ventilación, por lo tanto, dicho dispositivo también contribuye en regular la temperatura de la muestra.
- Homogeneidad: Es necesario mantener la muestra homogénea para así eliminar la existencia de zonas muertas que disminuyan la representatividad de las muestras y la ineficiencia del tratamiento; para lograr controlar este factor se integró un motor homogeneizador descrito en la sección 9.5.1.1 (subsistema de contención y homogenización de la muestra)
- Modelo experimental: Ver sección 10.2 correspondiente a la metodología experimental: descripción de componentes del tratamiento regenerador
- Caracterización del medio filtrante: Ver sección 10.1 correspondiente a la presentación de metodologías pre- experimentales
- Tipo de muestra: Puntual
- Volumen inicial de muestra (2000 mL): Una vez más nos encontramos hablando de una condición que asegura la buena representatividad del estudio; ya que al añadir un volumen equivalente en todas las



experimentaciones se está controlado en cierta medida que las concentraciones de contaminantes a tratar a lo largo de todas las pruebas sean semejantes.

Es importante mencionar que dicha carga contaminante no es la misma debido a que el agua a tratar pertenece a una muestra real de la depuradora de agua industrial. Por lo tanto, se dependen de factores como: día de muestreo, climatológicos, eficiencia de la planta etc.

6.6.2 Factores experimentales: Variables.

La modificación de estos factores permite una visualización clara del comportamiento del sistema sinérgico y de su capacidad; es decir que en base a estas variaciones se busca generar un patrón de comportamiento típico del tratamiento dado, acorde a sus eficiencias.

Es decir que se puede dar el caso en donde se tengan varias experimentaciones en donde el agua resulte ser desinfectada sin embargo la evaluación para determinar las condiciones óptimas de regeneración dependerán de la cinética de eliminación de carga metálica.

Por dichas razones es importante destacar las dos variables modificadas a lo largo de las experimentaciones:

- pH: Como fue estudiado en la unidad 7.5 la solubilidad de los metales depende directamente del pH del medio acuoso, por lo que es necesario realizar diversas experimentaciones para determinar el valor del potencial de hidrogeno idóneo para la remoción eficaz de la carga metálica.
- Cantidad de materia prima empleada para efectuar la remoción metálica: La remoción de iones metálicos puede depender directamente de la cantidad de sílice micro amorfa empleada para efectuar el tratamiento, puesto a la saturación de la materia prima ya que la remoción metálica es dependiente de la disponibilidad de área superficial de la sílice en la suspensión o en el filtro.



6.7 Medición de parámetros en muestras reales.

La determinación de un arreglo de factores correspondientes a la configuración experimental más eficiente, dependerá de manera directa de los parámetros evaluados en la etapa experimental llevada a cabo con muestras sintéticamente preparadas en el laboratorio, sin embargo, por otra parte, es necesario someter el sistema de tratamiento propuesto bajo las condiciones estudiadas a ensayos experimentales que permitan visualizar si es efectivo o no en muestras reales.

Como fue mencionado en secciones anteriores la naturaleza de un tratamiento a seleccionar dependerá directamente de la cantidad y el tipo de contaminantes que se desean eliminar, puesto que una vez estudiada la matriz del agua a regenerar es posible extrapolar los resultados obtenidos en la fase de prueba del sistema regenerador propuesto.

Debido a dichas razones es necesario realizar múltiples análisis del agua residual a muestrear (descrita en la sección 9.5) así como también de las diferentes muestras obtenidas a lo largo del ensayo experimental con el objetivo de comparar dichos resultados con los obtenidos con agua sintéticamente preparada.

Como es de esperarse la selección de los parámetros a medir depende de manera directa tanto de los objetivos a alcanzar, como del tipo de tecnologías empleadas para el tratamiento, con lo que es posible dividir los estudios realizados cuatro en áreas principales:

- Caracterización general de la muestra:
 - pH
- Caracterización del tratamiento vía partículas – sólidos:
 - Turbidez
 - Sólidos suspendidos Totales
 - Sólidos disueltos totales
- Caracterización del tratamiento vía: Carga metálica
 - Análisis de metales disueltos por absorción atómica
- Comportamiento de la carga total (inorgánica + orgánica):
 - Demanda Química de Oxígeno



Es importante mencionar que la clasificación de las mediciones a realizar en los bloques citados anteriormente, únicamente es una guía para facilitar el análisis de resultados y la obtención de conclusiones. A continuación, se describirá el objetivo, las mediciones y sus correspondientes equipos de cada uno de los bloques estructurados.

6.7.1 Caracterización general de la muestra.

Primeramente, es importante remarcar que las medidas pertenecientes a este bloque, brindan una idea general tanto de los posibles contaminantes y de la calidad inicial del agua muestra; así como también permite mantener un seguimiento constante del progreso de la regeneración durante el tiempo de tratamiento.

Se destaca que la obtención de resultados para este tipo de parámetros se genera de manera rápida con lo que es posible determinar mediante la interpretación de datos, una estimación en relación a el comportamiento que sigue la experimentación.

Es importante destacar que la pérdida de especies electrolíticas en el medio (metales) gracias al sistema sinérgico reflejara una disminución representativa de la conductividad de las muestras al aumentar el tiempo de exposición.

Por lo que estos parámetros facilitan en gran medida la toma de decisiones en relación a la prolongación del tiempo de regeneración de la muestra. A continuación, se presentan los parámetros de pertenecientes a esta sección y su descripción.



TABLA 6.4 Descripción del parámetro: pH / Método 4500-H+.B Standard Methods of wastewater

PARAMETRO:	pH
Descripción:	Indica la concentración de iones hidronio $[H_3O^+]$ presentes en determinadas sustancias. Correspondiente a él logaritmo negativo en base 10 de la actividad de los iones hidrógeno
Tipo de medida:	INSTANTANEA
Equipo empleado:	Potenciómetro
Valores iniciales esperados:	7.2 – 8.0 (muestra real) / se varia el valor de pH para muestras sintéticas a fin de estudiar el efecto en la eficiencia del sistema
Muestras a realizar:	Todas
Comportamiento esperado a lo largo de la experimentación:	Incremento o Constante
Interpretación de resultados:	<u>pH incrementa</u> = Tendencia a solubilizar los metales <u>pH constante</u> = Misma actividad de ion hidronio e hidroxilo <u>pH disminuye</u>: Tendencia a precipitar los metales
Tiempo para obtener resultados:	10 – 30 segundos
A considerar:	Tener la muestra homogénea
Volumen EMPLEADO:	50 mL

6.7.2 Caracterización del tratamiento vía partículas – sólidos.

Por otra parte también se encuentra el estudio en específico de las partículas y sólidos contenidos en la muestra a lo largo de la experimentación, es también una rama de estudio perteneciente a la tecnología de filtración, debido a que por una parte el análisis de la turbidez de muestras reales representa una media indirecta para estimar si existe algún efecto del proceso regeneración en relación a material suspendido.

Así como también el estudio directo del comportamiento de la carga solida de las muestras es crucial para comprender si el tratamiento prepuesto influye significativamente en la eliminación de otro tipo de contaminantes además de la carga metálica la cual constituye el objetivo principal. A continuación, se presentan los parámetros de pertenecientes a esta sección y su descripción.



TABLA 6.5 Descripción del parámetro: Turbidez / Método 2130-Turbidity Standard
Methods of wastewater

PARAMETRO:	Turbidez
Descripción:	“Definido como la falta de transparencia de un líquido debida a la presencia de partículas en suspensión. Cuantos más sólidos en suspensión haya en el agua, más sucia parecerá ésta y más alta será la turbidez. La turbidez es considerada una buena medida de la calidad del agua, cuanto más turbia, menor será su calidad.” ²³⁴ ”
Tipo de medida:	INSTANTANEA
Equipo empleado:	Turbidímetro
Valores iniciales esperados:	50- 100 NTU
Muestras a realizar:	Todas
Comportamiento esperado a lo largo de la experimentación:	Disminución
Interpretación de resultados para medidas correspondientes a post-tratamiento (decantación – filtración):	<u>Turbidez incrementa</u> = Fallo en filtración (muestra no representativa) <u>Turbidez constante</u> = Tamaño de partícula menor a los poros del filtro. <u>Turbidez disminuye</u>: Eliminación de contaminantes.
Tiempo para obtener resultados:	10 – 30 segundos
A considerar:	*Homogenizar la muestra
Volumen EMPLEADO:	10 mL

²³⁴ Gonzalez, Carmen. Monitoreo de la calidad del agua, 2 La turbidez. Servicio de Extensión Agrícola. 2011. Recuperado el día: 16/09/2014. URL: <http://academic.uprm.edu/gonzalezc/HTMLobj-859/maguaturbidez.pdf>



TABLA 6.6 Descripción del parámetro: Solidos Suspendidos Totales / Método 2540-TSS. D Standard Methods of wastewater

PARAMETRO:	Solidos Suspendidos Totales
Descripción:	Solidos constituidos por solidos sedimentables, solidos flotantes y materia orgánica e inorgánica en suspensión de manera coloidal, que son retenidos en un elemento filtrante, para el análisis de los ensayos experimentales representan fundamentales de analizar puesto que representan una de las principales limitantes del tratamiento regenerador propuesto, ya que es posible que dicha carga solida represente una interferencia y disminuya la eficiencia del proceso al evitar el contacto eficaz entre los iones metálicos y la materia prima filtrante.
Tipo de medida:	INSTANTANEA
Equipo empleado:	Horno 103 Celsius
Valores iniciales esperados:	200 – 500 mg/L
Muestras a realizar:	Muestras Reales
Comportamiento esperado a lo largo de la experimentación:	Comportamiento de concentración constante a largo del tratamiento
Interpretación de resultados:	<u>TSS incrementa</u> = La materia prima se está solubilizando <u>TSS constante</u> = No hay efecto sobre la carta suspendida con el tratamiento <u>TSS disminuye</u> : Hay un efecto sinérgico que logra disminuir la carga solida suspendida
Tiempo para obtener resultados:	3 horas
A considerar:	Tener la muestra homogénea
Volumen EMPLEADO:	50 -100 mL



TABLA 6.7 Descripción del parámetro: Solidos Disueltos Totales / Método 2540-TDS.

C Standard Methods of wastewater

PARAMETRO:	Solidos Disueltos Totales
Descripción:	Solidos constituidos por componentes orgánicos e inorgánicos que no son retenidas en un medio filtrante de 0.45 μm , es dentro de esta matriz en donde se encuentran los analitos de principal interes de este estudio: los iones metálicos. Dentro de los ensayos experimentales se pretenden analizar dichos solidos con el fin de evaluar si a un determinado rango de concentración existe alguna posibilidad de interferencia o disminución de eficiencia en el tratamiento del agua residual.
Tipo de medida:	INSTANTANEA
Equipo empleado:	Horno 180 Celsius
Valores iniciales esperados:	> 10,000 mg/L
Muestras a realizar:	Muestras Reales
Comportamiento esperado a lo largo de la experimentación:	Comportamiento de concentración constante a largo del tratamiento
Interpretación de resultados:	<u>TDS incrementa</u> = La materia prima se está solubilizando <u>TDS constante</u> = No hay efecto sobre la carta suspendida con el tratamiento <u>TDS disminuye</u> : Hay un efecto sinérgico que logra disminuir la carga solida disuelta
Tiempo para obtener resultados:	3 - 5 horas
A considerar:	Tener la muestra homogénea
Volumen EMPLEADO:	50 -100 mL



6.7.3 Caracterización del tratamiento vía: Carga Metálica

Tal y como fue propuesto en los objetivos de esta investigación, la atención central de este proyecto se encuentra enfocada en la remoción de contaminantes metálicos disueltos en la matriz acuosa. Es importante hacer ver que dicha remoción se espera llevar a cabo por medio del contacto de la sílice micro amorfa con un afluente determinado.

Sin embargo, cabe destacar que dentro de la etapa experimental el análisis de la concentración metálica a diferentes lapsos de tiempo resulta fundamental para determinar, mediante el tratamiento de datos de estos valores el potencial de eficiencia que posee el sistema FIL-RET a diferentes variables (pH, tamaño de partícula etc.).

Por lo tanto la selección de una metodología de análisis es crucial para el proyecto, es por eso que a continuación en la tabla se presentan las principales características deseadas para seleccionar la metodología adecuada para la obtención de resultados.



Tabla 6.8 Aspectos tomados en cuenta para la selección de la metodología de análisis.

Factor	Motivo
Repetibilidad	Se busca que los valores leídos dentro de las muestras tomadas sean constantes para así facilitar la comprensión de los fenómenos sucedidos en la experimentación.
Rentabilidad	La evaluación de los factores expuestos en esta tabla traza la rentabilidad de una metodología, derivado desde el punto de vista económico, calidad del análisis (precisión exactitud) hasta el tiempo de respuesta, mediante dicha evaluación es posible determinar si alguna metodología es conveniente o no para el tipo de estudio realizado.
Reproducibilidad	Este factor está referido a la facilidad con la que se puede llevar a cabo la metodología determinada con éxito, puesto que se relaciona directamente con la respetabilidad y la precisión. Se busca un proceso que se pueda llevar a cabo a lo largo de todo el periodo de experimentación sin que la calidad de los resultados se vea comprometida.
Robustez	Se trabajara dentro de este proyecto con dos distintas matrices de análisis por lo que se requiere que el proceso tanto de preparación de la muestra como de análisis sea lo más robusto posible para no comprometer la respetabilidad ni la precisión de los resultados.
Accesibilidad	Se tienen que considerar las concentraciones con las cuales se experimentar para seleccionar el aparato de lectura más adecuado. Es importante también mencionar que la accesibilidad también radica en las distintas oportunidades o diferentes caminos con las que cuenta el investigador para realizar su etapa experimental.
Precisión y Exactitud	Primeramente hay que mencionar que estos dos conceptos son distintos sin embargo son englobados dentro de esta tabla puesto que buscan el mismo objetivo: la calidad del análisis. Los resultados obtenidos tiene que ser lo más cercanos a los valores reales contenidos en las muestras. Puesto a que se trata de trazas metálicas en el agua la precisión de los datos es fundamental para poder tratar adecuadamente los datos y llegar a conclusiones representativas.
Tiempo de respuesta	Debido a que se trata de un proyecto investigativo es preferible obtener los resultados lo más pronto posible, puesto a que la evaluación de los mismos dictamina la toma de decisiones en cuanto a la manipulación de variables experimentales.

Mediante los datos proporcionados por la tabla anterior se destacan diferentes tipos de análisis que podrían adaptarse fácilmente al proyecto y brindar información importante. A continuación, se presentan brevemente en la tabla las diferentes posibilidades tecnológicas de análisis y su evaluación para el uso o no dentro de esta investigación acorde a las necesidades y características con las que se cuentan en la investigación.



Tabla 6.9 Tecnologías de análisis para la determinación de metales.

Tecnología de análisis	Evaluación
Determinación de metales por medio de absorción atómica (AA)	Metodología robusta y económicamente muy accesible puesto que dentro de numerosos centros de investigación, empresas se cuenta con este tipo de tecnología, cabe remarcar que los límites de detección radican aproximadamente en 0.1 a 0.2 ppm por lo que resulta adecuado para analizar el comportamiento de los metales frente al material filtrante ya que la concentración del agua a la que va destinada la aplicación final de este proyecto van desde 1 ppm hasta 3 ppm. También es crucial remarcar que la velocidad para este equipo es alta, puesto que realiza lecturas de absorbencia cada 4 segundos, con lo que es posible montar un experimento y analizarlo el mismo día.
Determinación de metales por medio de ICP	Tiene valores de límite de detección menores al AA (ppb) sin embargo resultan ser equipos poco comunes aun en los laboratorios y de un alto costo no solo desde el punto de vista de inversión si no de operación (puesto que consumen como gas acarreador Argón). Es importante hacer ver que acorde a las concentraciones que se estarán manejando dentro de este estudio (ppm) esta metodología no resulta muy factible para llevar a cabo. Puesto que se trata de afluentes con concentraciones de alrededor de 1 - 3 ppm. Es importante también mencionar que la remoción esperada por la sílice es de 30% por lo que aun es factible medir en mg/L.
Determinación de metales por medio de ICP-MS	Poco rentable desde el punto de vista económico - accesible, así como también hay que remarcar que los límites de detección (ppb) para este tipo de aparatos son aun más bajos que un ICP convencional, lo cual no es primordial para los fines del estudio llevado a cabo dentro de esta investigación.

Finalmente se destaca que mediante el análisis de ambas tablas se hace posible la selección de la determinación de metales por medio de espectrofotometría de absorción atómica (AA) como una metodología afín a las necesidades investigativas por las razones expuestas ya anteriormente.

Es importante mencionar que las tecnologías citadas en la sección 6.5 son estipuladas como los principales recursos de análisis de contaminantes metálicos en aguas residuales acorde a los métodos estándar de análisis de agua residual ²³⁵, sin embargo la AA resulta una mejor opción puesto a que las concentraciones que serán manejadas en las muestras van más apegadas a los límites de detección de esta tecnología.

²³⁵ Green, Arnold. Clesceri, Leonore. Eaton, Andrew. Standar Methods, For the Examination of water an wastewater. APHA AWWA WEF 18th Edition 1992



Por último, cabe hacer mención de que dicha metodología de análisis facilitara en gran medida: reducir los tiempos de obtención de resultados, manipulación de datos y con ello la toma de decisiones. En la siguiente sección se describe a detalle las operaciones de preparación de la muestra y análisis para esta metodología.

6.7.3.1 Determinación de metales por absorción atómica ²³⁶

Los métodos de flama para metales son aplicables para concentraciones moderadas en sistemas de matriz limpios - no complicados.

Términos de metales:

- Metales disueltos: aquellos que en un medio no ácido pasan una membrana de 0.45 micrómetros
- Metales totales: la concentración de los metales de una muestra no filtrada tras una vigorosa digestión. (suma de suspendidos + disueltos)
- Metales de extracción ácida: la concentración de metales no filtrada tras una digestión caliente - ácida.
- Para determinar metales suspendidos y disueltos de manera separada filtrar inmediatamente después de la toma de muestra (no acidificar)
- Sensibilidad en AA: La concentración de metal que produce una absorción de 1%
- Límite de detección: La concentración de metal que absorbe un equivalente al doble de la magnitud de la fluctuación del background (fondo)

6.7.3.1.1 Toma de muestra y preservación

- Contenedor: TFE de preferencia sin embargo por costo se elige el polipropileno o polietileno con una capa de polietileno en la tapa. Puede usarse embaces de boro silicato pero no es recomendable cuando se sospecha que la concentración de metales es baja. Para plata se requiere tapar de la luz.

²³⁶ Green, Arnold. Clesceri, Leonore. Eaton, Andrew. Standard Methods, For the Examination of water and wastewater. APHA AWWA WEF 18th Edition 1992



- Preservación: Preservar inmediatamente después de tomar la muestra con ácido nítrico concentrado pH <2. Para metales disueltos es necesario filtrar antes de preservar. Refrigerar a 4 C (tiempo máximo de preservación son 6 meses)
- Para análisis de mercurio la preservación se hace con: dicromato de potasio (20%)
- Lavado de material para evitar contaminación:
 - Lavar en contenedor con detergente no iónico libre de metales
 - Enjuagar con agua desionizada
 - Enjuagar en ácido (ácido nítrico / clorhídrico)
 - Enjuagar en agua desionizada

6.7.3.1.2 Retratamiento de las muestras.

Muestras que contienen partículas o material orgánico requieren de un pretratamiento debido a que metales totales incluye los provenientes por material inorgánico y orgánico. Muestras muy limpias incoloras, inodoras y con una turbidez menor a 1 NTU pueden ser analizadas de manera directa en absorción atómica.

Filtración preliminar: Para la determinación de metales disueltos o suspendidos es necesario llevar a cabo una filtración a 0.4 - 0.45 micrómetros de membrana. Este procedimiento es insitu a la hora de tomar la muestra. antes de filtrar la muestra se hace pasar por el filtro un blanco de agua desionizada para verificar la ausencia de contaminantes. (50 mL) si la membrana resulta contaminada es necesario realizar un lavado ácido de la misma (0,5 HCl o 1 + 1 HNO₃)

Si se van a determinar metales suspendidos es necesario apuntar el volumen de muestra que se hizo pasar por el filtro e incluir un filtro para el blanco. Después de filtrar es necesario acidificar.

*Tratamiento preliminar de metales extraíbles en medio ácido: Después de acidificar en el muestreo es necesario homogenizar la muestra tomar 100 mL ponerlos en un matraz o vaso de precipitado limpio añadir 5 ML de 1+1 HCl y calentar por 15 minutos. Filtrar en una membrana y aforar a 100 mL. Analizar.



6.7.3.1.3 Digestión preliminar para metales:

La digestión usualmente funciona muy bien con ácido nítrico concentrado, debido a que no causa interferencias en la lectura de los metales a diferencia del uso de otros tipos de ácidos para digestión. Sin embargo, aparte del ácido nítrico es necesario usar otros tipos de ácidos para completar o asegurar una completa digestión para cierto tipo de metales.

A continuación, se presenta la tabla 9.9 en donde se adjuntan los ácidos de complementación de digestión ácida de ácido nítrico:

Tabla 6.10 Digestión ácida de muestras acuosas

Acido	Recomendado para	Ayuda para	No recomendado
HCl	-	Sb, Ru, Sn	Th, Pb
Acido Sulfúrico	Ti	-	Ag, Pb, Ba
Acido Perclórico	-	Material orgánico	-
Ácido fluorhídrico	-	Material sílice	-

**NOTA: Es necesario usar los menores volúmenes de ácido posible para llevar a cabo la digestión debido a que agregan metales a la muestra (el punto es que dicha adición sea menor al límite cuantificable del método)*

Tabla 6.11 Volúmenes ideales de muestra a digerir.

Concentración estimada del metal ppm	Volumen de muestra a digerir
<1	1000 mL
1 - 10	100 mL
10 - 100	10 mL
100 - 1000	1 mL



6.7.3.1.4 Procedimiento: Digestión Ácida - HNO_3

1. Homogenizar la muestra y transferir un volumen entre (50 - 100 mL) a un matraz elenmeyer o un vaso de precipitado.
2. Agregar 5 mL de ácido nítrico concentrado y agregar también perlas de ebullición.
3. Llevar la solución a una ebullición suave y evaporar al volumen mínimo repetible (10 - 20 mL) antes de que ocurra la precipitación metálica.
4. Seguir el calentamiento y agregando ácido nítrico hasta obtener una solución clara casi incolora.
5. No dejar que la muestra se seque en la digestión.
6. Lavar con agua desionizada las paredes del matraz.
7. Filtrar la solución pasando el volumen a un matraz de 50 o 100 mL dependiendo la concentración de anualito esperada.
8. Hacer lavados del matraz de 5 mL transfiriendo continuamente al matraz volumétrico.
9. Dejar templar a temperatura ambiente y aforar a un volumen específico. (es recomendable 50 mL)
10. La solución esta lista para ser analizada.
11. Existen preparaciones para Ca, Mg, Fe, Mn o Cr, llevar a cabo la preparación de la muestra como se indica a continuación:
 - Ca / Mg : agregar Lantano de sodio (10 mL / 100 mL de muestra)
 - Fe / Mn: Agregar Solución de Ca (25 mL / 100 mL de muestra)
 - Cr : Agregar peróxido de hidrogeno (1 mL / 100 mL de muestra)

*Tomar en cuenta el factor de dilución cuando se efectúen los cálculos de concentración.



6.7.3.1.5 Principio de la Espectrofotometría de Absorción atómica

1. La muestra es aspirada en una flama de aire - acetileno
 2. La muestra atomizada es expuesta a un haz de luz en donde absorbe energía (ha cierta longitud de onda)
 3. La luz se guía directamente con la flama en donde se encuentran los metales atomizados, de ahí a un monocromador y de ahí a un detector que lee la cantidad de luz absorbida por el átomo metálico.
- Cada metal tiene su propia caracterización a cierta longitud de onda de absorción por este hecho se utiliza una lámpara fuente compuesta del elemento que se va a utilizar. (baja las interferencias)
 - Absorbancia proporcional a la concentración
 - También se puede operar en emisión (si está equipado el instrumento)

6.7.3.1.6 Componentes del espectrofotómetro de absorción atómica

- Fuente de luz que emite en la misma longitud de onda que el metal
- Vaporizador de la muestra (flama)
- Aislamiento de la línea de absorción (monocromador o filtro slit)
- Detector foto eléctrico con su amplificador de señal electrónico
- Equipo de medida

*Lámparas: existen lámparas unitarias para cada metal y lámparas multielementales (se recomiendan por sensibilidad las unitarias)

6.7.3.1.7 Interferencias

Interferencias químicas: Resultan de la misma composición de la muestra en donde por diferentes razones los metales reaccionan con aniones contenidos en la muestra para dar compuestos que son de difícil disociación en la llama sobretodo en el caso de que no se tenga una llama suficientemente caliente.

*La eliminación de este tipo de interferencias se da con la reacción, bloqueo, enmascaramiento de los aniones - sustancias que provocan dichas reacciones con los metales. (ex. Lantano en presencia de fosfato)

*Al, Ba, Requieren de temperaturas de llama más altas para completar su disociación. (óxido nitroso - acetileno)



Extracción con: Metil isobutil cetona y Ditiocarbamato de pirrolidina amoniacal son usualmente empleadas para matrices con altos contenidos en sal y determinación de bajas concentraciones de Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Pb, Mn, Ni, Ag y Zn.

6.7.3.1.8 Corrección de respaldo.

Existen falsos positivos producidos por la obstrucción de luz por partículas en la muestra. Para corregir dicho error existen tres metodologías:

- Fuente continua: Utiliza lámpara hueca de hidrogeno y una lámpara de deuterio. Una parte del haz de luz es sustraída electrónicamente y se toma como referencia de background realizando la corrección automáticamente dando resultados previamente corregidos
- Zeeman: Divide el haz de luz en dos haces idénticos uno es en donde se corre la muestra y el otro sirve como fondo, (se restan para corregir el error)
- Smith - Hieftje

6.7.3.1.9 Control de calidad.

- Duplicados : Precisión
- Condiciones conocidas: porcentaje de recuperación - interferencias
- estándares, blancos, graficas control, calibraciones etc.
- Curva estándar con un blanco y dos o más estándares
- Estándar extern
- Reforzado: Una cantidad conocida de estándar agregada a la muestra para determinar el porcentaje de recuperación y corroborar que no hay interferencias por matriz

Recuperación de estándares se espera generalmente entre: 95 - 105 %

En efectos por matriz la recuperación tiene que oscilar entre : 85 - 115%

Antes de usar el método determinar el límite de detección. (1030 E), es importante tomar en el método de las adiciones conocidas para matrices nuevas o bien desconocidas mientras que por otra parte es necesario un blanco en donde forme parte de todo el proceso que llevan las muestras incluyendo los pasos de digestión.

Cabe remarcar que en la existencia de blancos positivos la explicación puede radicar en contaminación cruzada, reactivos empleados o vidriera usada.



6.7.3.1.10 Operación del equipo - Términos generales.

Equipo: ThermoElemental / Solar S4

- Instalar la lámpara del metal a leer
- Ajustar la longitud de onda adecuada al analito
- En el panel de control de las lámparas seleccionar el modo ON a la lámpara correspondiente al metal que se desea analizar. La lámpara requiere como mínimo 10 minutos para estabilizarse y dar lecturas estables.
- Abrir la compuerta del quemador y verificar la posición del mismo. Es importante destacar que para los análisis llevados a cabo dentro de esta investigación en donde los mínimos de detección se encuentran entre 0.1 y 0.2 ppm la posición del quemador tiene que ser 0 grados.
- Abrir el tanque de Acetileno (combustible), ajustar al flujo recomendado por el proveedor.
- Prender el compresor de aire (oxidante), ajustar al flujo recomendado por el proveedor.
- Asegurar que la presión en el aparato es la adecuada para estabilizar la llama (indicadores verdes en la esquina inferior derecha de la pantalla)
- Prender la llama y dejar que se estabilice el aparato por un tiempo mínimo de 10 minutos. Es importante que el aparato se encuentre aspirando agua desionizada para limpiar su sistema interno y asegurar su buen funcionamiento.
- Seleccionar el método de análisis que se desea emplear, acorde al metal que se va a leer.
- Una vez transcurrido el tiempo se prosigue a dar inicio al análisis con lo que es necesario, aspirar un blanco de agua sin metales o bien ácido de la misma concentración en la que se van a leer las muestras.
- Correr una curva de calibración** con un mínimo de 4 puntos para el analito de interés, se recomienda que el rango de dichos estándares vaya desde el límite mínimo de detección hasta un valor igual al doble de la concentración máxima deseada a leer. Por ejemplo el límite de detección para el Cobre es de 0.1 ppm y la concentración máxima experimental a analizar es de 1 ppm, con lo que la serie de estándares recomendada para la generación de la curva de calibración es: 0.1, 0.5, 1.0 y 2.0 ppm para el cobre.



- Correr un control de calidad adecuado para verificar la representatividad de los resultados; blanco de digestión, doble de la muestra, reforzado, un estándar digerido de control, estándares de verificar.
- Realizar la lectura de los valores de absorbencia de las muestras.
- Aspirar un blanco por 2 minutos para limpiar el sistema
- Una vez finalizado el análisis apagar la llama.
- Cerrar el suministro de acetileno / aire
- Purgar el aparato.
- Reportar los resultados en ppm.

****Curvas de calibración:** En el apartado 3111.B / 3, del libro de Estándar Métodos foro Wastewater se especifica la elaboración de estándares afines para la realización de curvas de calibración para el método de aire -acetileno. En la mayoría de los casos se toman sales altamente ionizables de los metales a preparar y se afora a 1L la cantidad másica correspondiente a una concentración de 1000 ppm.

TABLA 6.12 Descripción del parámetro: Carga metálica/ Métodos de parte 3000
Standard Methods of wastewater

PARAMETRO:	Carga Metálica
Método empleado:	3030E / 3131 B
Equipo/ material empleado:	Thermo Elemental Solar S4 AA
Valores iniciales esperados:	1 ppm
Muestras a realizar:	5 muestras por experimentación
Comportamiento esperado a lo largo de la experimentación:	Decrecimiento
Interpretación de resultados:	Disminución de las cargas metálicas de muestras en contacto de la sílice indica la retención metálica.
Tiempo para obtener resultados:	1 día
A considerar:	Analizar 7 metales por muestra
Volumen EMPLEADO:	Cada metal requiere de 5 mL



6.7.4 Comportamiento de la carga orgánica – inorgánica.

Por último, una vez que ya fue analizada la eficiencia del sistema de tratamiento regenerador acorde a los principales objetivos marcados: eliminación de carga metálica a un bajo costo operativo. También es posible realizar el estudio del comportamiento de cargas tanto orgánica como inorgánica.

Con el objetivo de lograr obtener un conocimiento más profundo en relación a la capacidad que tiene el tratamiento sinérgico, ya que se busca determinar si dicha integración tecnológica en un mismo proceso de un solo paso, logra tener una influencia significativa en la eliminación de carga material.

Por otra parte también dentro de esta sección se pretende descartar la posibilidad de una contaminación del agua a tratar con la materia prima, ya que al emplear sílice micro amorfa como medio de retención de los metales disueltos se abre la posibilidad de disolver una cierta porción de dicho material.

A pesar de que se sabe que la sílice micro amorfa tiene una baja solubilidad es necesario efectuar el método espectrofotométrico 4500-Si- D de los métodos estándar de análisis de agua residual, para verificar que dentro del proceso de regeneración de las muestras la materia prima se mantiene inerte y no contamina el efluente a tratar.

A continuación, se describen de forma breve los análisis realizados acorde a la cuantificación de carga orgánica en las muestras, así como la determinación de la carga oxidable total (orgánica – inorgánica):

- *Demanda Química de Oxígeno*
- *Sílice Disuelta*



TABLA 6.13 Descripción del parámetro: Demanda Química de Oxígeno/ Método 5200-COD. D Standard Methods of wastewater

PARAMETRO:	DQO
Descripción:	Parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas o en suspensión en una muestra líquida. Se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mgO_2/l). Este método mide la concentración de materia orgánica, así como también la presencia de sustancias inorgánicas susceptibles de ser oxidadas (sulfuros, sulfitos, yoduros...). Por lo que es empleado para la medición de la contaminación global.
Método empleado:	Espectrofotométrico
Equipo empleado:	Espectrofotómetro / Juego de DQO / Digestor
Valores iniciales esperados:	250 – 500 $\text{mg O}_2/\text{L}$
Muestras a realizar:	Todas
Comportamiento esperado a lo largo de la experimentación:	-Aumento en operación (hierro en suspensión) En post-operación: Constante o Disminución
Interpretación de resultados post-operación:e	<u>DQO incrementa</u> = Error en toma de muestra (no homogénea) <u>DQO constante</u> = No hay influencia del proceso en este factor <u>DQO disminuye</u> : Influencia del tratamiento
Tiempo para obtener resultados:	2 horas
A considerar:	*Emplear únicamente el decantado
Volumen EMPLEADO:	2 mL



TABLA 6.14 Descripción del parámetro: Sílice Disuelta / Método 4500-Si. D
Standard Methods of wastewater

PARAMETRO:	Sílice disuelta
Descripción:	La contenido de sílice en el agua natural ronda en un rango de 1 a 30 mg/L, este componente inorganico es indeseable en el agua debido a que limita numerosas aplicaciones industriales, ya que genera silicatos que se incrustan y resultan difíciles de remover en los ductos de los equipos, particularmente en equipos de intercambio termico. El proposito de estudio dentro de esta etapa experimental consiste en determinar si se esta disolviendo o no la sílice empleada como materia prima para el tratamiento de aguas residuales.
Tipo de medida:	INSTANTANEA
Equipo empleado:	Espectrofotometro
Valores iniciales esperados:	<0.1 ppm
Muestras a realizar:	Muestras Reales
Comportamiento esperado a lo largo de la experimentación:	Se espera que este siempre por debajo del valor inicial esperado
Interpretación de resultados:	<u>SiO₂ incrementa</u> = La materia prima se esta solubilizando <u>SiO₂ constante</u> = No hay solubilizacion de la materia prima <u>SiO₂ disminuye</u>: No hay solubilizacion de la materia prima
Tiempo para obtener resultados:	2 horas
A considerar:	Tener la muestra homogénea
Volumen EMPLEADO:	50 mL



6.8 Estudio de la cinética de eliminación de carga metálica.

Primeramente, se debe mencionar que la presentación de datos a fin de comprender e interpretar mejor el comportamiento del sistema de tratamiento, puede efectuarse por medio de graficos en dos diferentes escalas:

- Escala lineal: Contribuye a un análisis cualitativo rápido de la capacidad que tiene un tratamiento sinérgico en particular, es decir únicamente es posible observar la tendencia general que tiene la experimentación.
- Escala logarítmica: La presentación de resultados de en escala logarítmica permite no solo identificar la tendencia de la desinfección, sino que también permite la determinación de constantes correspondientes a la eliminación de la carga metálica en las muestras (k) a lo largo de cada experimentación.

Es importante hacer hincapié en que el análisis de la eficiencia del tratamiento a diferentes condiciones se dificulta, si únicamente se opta por emplear como herramienta de estudio los gráficos descritos en el primer punto; ya que para todas las experimentaciones realizadas se puede apreciar que la carga de contaminantes tiende a descender o incluso a eliminarse por completo.

Es decir que los gráficos lineales únicamente generan una idea de la tendencia que presenta la experimentación, mas no brinda un valor cuantitativo real mediante el cual se puedan realizar comparaciones representativas entre las experimentaciones.

Es aquí en donde destaca la utilidad de los gráficos descritos en el punto dos, debido a que la presentación de datos de manera logarítmica permite determinar la velocidad de remoción para cada experimentación en particular (a diferentes condiciones), con lo que se facilita en gran medida la posibilidad de comparar todas los ensayos realizados en un solo gráfico, esto se traduce a que es posible determinar cuáles son las condiciones óptimas para alcanzar el equilibrio sinérgico.

Por otra parte, se tiene que la eficiencia de regeneración o capacidad de tratamiento en relación a la eliminación de metales disueltos, viene dada por una constante cinética que relaciona: la pérdida de carga metálica acorde al tiempo de exposición a la zona de acción sinérgica.



Para cada uno de los gráficos logarítmicos de tratamiento presentados en la sección 12 se hace presente una ecuación exponencial tal y como la que se describe a continuación:

$$Y = n e^{kX}$$

Donde:

Y = Carga contaminante en escala logarítmica (metales disueltos)

n = Carga inicial metálica (corte en abscisas)

k = Constante de eficiencia (eliminación de carga metálica en relación al tiempo)

X = Tiempo de experimentación (minutos)

Aumento de k cinética a Disminuye de tiempo de exposición

6.9 Pretratamiento de la sílice micro-amorfa.

Previo a la experimentación y evaluación de la capacidad del sistema de filtrado propuesto dentro de este trabajo es necesario establecer un tratamiento previo de la sílice micro - amorfa que se empleará como material filtrante en una columna empacada, con el fin de establecer un sistema de experimentación sencillo en donde sea posible realizar la comparación resultados.

Por otra parte, es importante mencionar que dentro del muestreo de la sílice se prestó especial atención en la cuestión de la selección de una fuente de material con las características mencionadas a continuación:

- Abastecimiento constante: Este punto es crítico en cuestión a la rentabilidad experimental debido a que se debe de tener una cantidad de sílice suficiente para llevar a cabo múltiples experimentaciones.

Por lo que el pozo de extracción de donde se tomarán las muestras tiene que tener un flujo másico constante y rentable para reducir la variabilidad en términos de calidad de la materia prima.

- Pureza: Se tiene que tomar en cuenta que es preferible seleccionar un punto de muestreo donde la calidad de la sílice sea lo más alta posible, evitando así establecer complejas metodologías de purificación.



Dentro del muestreo es necesario tomar como referencia que la sílice micro- amorfa pura tiene un aspecto físico de polvo totalmente blanco, por dicha razón es necesario tomar extracciones de material silíceo de diferentes procedencias (pozos) y comparar de manera visual y determinar cuál de las muestras es la ideal para realizar los procedimientos de limpieza- purificación y por ende experimentación.

- **Tamaño de grano:** Característica que resulta fundamental para las propiedades del filtro a conformar tales como velocidad de filtrado, capacidad de retención, tiempo de saturación etc.

Para generar una rápida y eficiente idea de la variabilidad del tamaño de partícula del material silíceo es posible agregar un poco de agua destilada y agitar vigorosamente dejando sedimentar y observar cada determinado tiempo el patrón de sedimentación de la muestra.

En términos generales las partículas silíceas con un tamaño menor (proporcional a su peso) tendrán una velocidad de sedimentación menor a aquellas partículas de mayor peso.

6.9.1 Toma de muestras en la planta geotérmica de Cerro Prieto en Mexicali.

El proceso de toma de muestras silíceas en la planta geotérmica de Cerro Prieto en Mexicali, representa un paso crítico para la etapa experimental puesto que dependiendo de en donde sea tomada el grado de pureza de la sílice micro amorfa varía radicalmente.

Hay que recordar que dentro el proceso geotérmico que en globo la canalización de vapores, la polimerización de la sílice se presenta visualmente en el Silenciador y en las tuberías de la perforación, para ser llevadas a la superficie en la salida y durante el recorrido en las canaletas tal y como se menciona en la sección 9.3.1.3 correspondiente al estudio del proceso de la planta de Cerro Prieto.

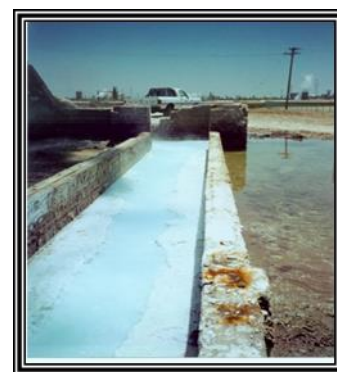
La variación en calidad de la materia silícea mencionada anteriormente depende directamente de la locación en la que se colectan las muestras puesto que una vez condensado el fluido Geotérmico es recolectado en canales para ser dirigido hacia una laguna de evaporación es en esta primera canaleta donde se puede obtener la sílice micro amorfa de mayor pureza y calidad puesto que los conductos que dirigen el residuo hacia las lagunas de evaporación son abiertos al



ambiente como se puede observar en las imágenes 9.19 – 9.21, lo que contribuye a una contaminación significativa del fluido silíceo.

Las imágenes presentadas a continuación están jerarquizadas por preferencia de muestreo, puesto que es recomendable trabajar en los ensayos experimentales con sílice homogénea, caracterizada y con una baja tasa de materia contaminante.

**Imágenes 6.19 – 6.21 Residuos silíceo depositado en: a) canaletas, b y c)
Conductos a Lagunas de evaporación**



La manera en la que se lleva a cabo el muestreo de la sílice micro amorfa una vez localizadas las zonas de menor contaminación, cabe destacar que al coleccionar muestras directamente de las canaletas se puede proceder al muestreo de sílice amorfa en el condensado (estado líquido) o bien se puede coleccionar sílice incrustada de las paredes de las canaletas, el primer caso se limita únicamente a emplear una botella de polipropileno o polietileno de 1 L.

Una vez en el laboratorio es necesario colocar el condensado en un vaso de precipitado previamente lavado y enjuagado con agua des ionizada y dejar secar a 103 – 105 grados Celsius en el horno previo a los procesos de purificación de sílice amorfa descritos en el apartado 9.9.2 para favorecer de este modo la pérdida de carbonatos del condensado silíceo.

En el caso de recolectar muestras solidas es únicamente necesario emplear una espátula de preferencia de plástico para evitar contaminación metálica y bolsas de polietileno procurando cerrar muy bien la bolsa para evitar contaminación. Independientemente del proceso de muestreo que se lleve a cabo es necesario identificar claramente la muestra puesto que en caso de requerir más



silíce amorfa en proyectos o ensayos experimentales posteriores tener de referencia la locación de la materia prima acorde a su calidad.

6.9.2 Purificación de la sílice micro – amorfa.

Una vez muestreada una cantidad representativa de sílice de la planta geotérmica de Cerro Prieto es necesario someter la muestra a un procedimiento destinado a la remoción de las diversas impurezas acarreadas durante el proceso geotérmico; es importante hacer mención de los principales minerales “no metálicos presentes en los sedimentos los cuales son: caolinita, calcita, cloritas, dolomita, feldespatos, geles de hierro e ollitas dispuestas en capas mixtas.

Durante su recorrido, se transfieren al vapor elementos de los minerales presentes en los sedimentos tales como boro, calcio, litio, potasio, sílice y sodio, así como otros propios del agua de mar. El magnesio, sulfatos y una cantidad pequeña de sodio procedentes de esta última se precipitan por un proceso inverso sobre la roca.^{237 238}

Por otra parte, se sabe que los principales componentes químicos identificados hasta la fecha en los fluidos geotérmicos están clasificados generalmente en mayoritarios y minoritarios, que a su vez se subdividen en cationes, aniones y compuestos gaseosos. “Dentro del grupo de los mayoritarios se encuentran a los cationes de: calcio, magnesio, sodio y potasio y a los aniones: sulfato, cloruro, fluoruro, carbonato y bicarbonato.

Los elementos químicos minoritarios están limitados por el tipo de fluido geotérmico, ya que dependiendo de su zona de ubicación será la concentración en donde se pueden identificar a los elementos trazas. Así, los componentes que se pueden encontrar son: aluminio, bario, boro, cesio, estroncio, hierro, litio, mercurio, plomo, rubidio, silicio y vanadio^{239 240}

²³⁷ Espinosa, Hector Moosek, Federico. El pozo M-3 del campo geotérmico del Cerro Prieto B.C México. Boletín de la asociación mexicana de geólogos petroleros Vol. XVI. Núms. 7-8. Sin fecha. Recuperado el día: 05/11/14URL: http://www.amgp.org/ws/articulos/1964/1964_Jul_Ago_03.pdf

²³⁸ Díaz, Cesar. Tratamiento químico de la escoria de sílice de una planta geotérmica para su aplicación en cerámica y vidrio. BOLSOC.ESP.CERAM.VIDR. 29, 3, 18J-184. 1990. Recuperado el día: 01/12/2014. URL: <http://boletines.secv.es/upload/199029181.pdf>

²³⁹ Izquierdo, Georgina. Aragon, Alfonso. Portugal, Enrique. Arellano, Victor. De león, Jesus. Alvarez, Julio. Mineralogía de la zona mineralizada de sílice-epidota (ZMSE) del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto, B.C., México. Geotermia, Vol. 19, No. 2, 2006. Recuperado el día: 12/11/2014. URL: <http://132.248.9.34/hevila/Geotermia/2006/vol19/no2/1.pdf>

²⁴⁰ Díaz, Cesar. Tratamiento químico de la escoria de sílice de una planta geotérmica para su aplicación en cerámica y vidrio. BOLSOC.ESP.CERAM.VIDR. 29, 3, 18J-184. 1990. Recuperado el día: 01/12/2014. URL: <http://boletines.secv.es/upload/199029181.pdf>



La importancia de la purificación deriva de dos problemáticas que se destacan al tener cantidades de metales considerables como contaminantes de la materia prima, el primer punto a destacar consiste en la resolubilización de las especies contaminantes en la sílice al entrar en contacto con la muestra a tratar.

Lo que se traduce a una contaminación del agua contrario al objetivo principal, por parte contraria se encuentra que si no se resolubilizan dichos componentes podarían afectar en la eficiencia con la que la sílice retiene a los metales contenidos en la muestra acuosa a tratar debido a que la sílice pudiera estar parcialmente saturada de cationes en su superficie con lo que la CIC (capacidad de intercambio catiónico) disminuiría notablemente, por lo tanto razones se hace crucial la purificación de dicho material.

A continuación, se citan los pasos a seguir para llevar a cabo el proceso de purificación de la materia prima.

1. Tomar la muestra de sílice micro amorfa a purificar y colocarla en un envase de vidrio o plástico de aproximadamente 500 mL
2. Calentar un volumen aproximado de 250 mL de agua desionizada a una temperatura entre 70 - 90 °C
3. Agregar a la muestra silíceas volúmenes de 50 mL del agua desionizada previamente calentada. Anadir en cada lavado 1 mL de ácido nítrico 1:1. Agitando vigorosamente durante 2 minutos en cada volumen
4. Una vez que se agregaron los 250 mL agitar vigorosamente durante 5 minutos.
5. Dejar sedimentar por 48 hrs
6. Tomar una muestra del agua sobrenadante y realizar prueba de cloruros. (Agregar unas gotas de cloruro de plata, si se presenta un precipitado blanco indica la presencia de cloruros en solución)
7. Realizar los pasos 4,5,6 por 5 veces, confirmar que la prueba de cloruros sea negativa en la última purificación.
8. Colocar un embudo de 2L (plástico) y filtrar la sílice con un filtro de celulosa de 10 cm, con una porosidad de 42 - 45 micrómetros. Dejar en el embudo durante 24 hrs.
9. Retirar la sílice semi seca del filtro y colocarla en vasos de precipitado limpios (enjuagados con agua desionizada)
10. Secar durante 12 hrs a 105 °C.



Diagrama de flujo 9.1 Procedimiento llevado a cabo para la purificación de sílice micro amorfa

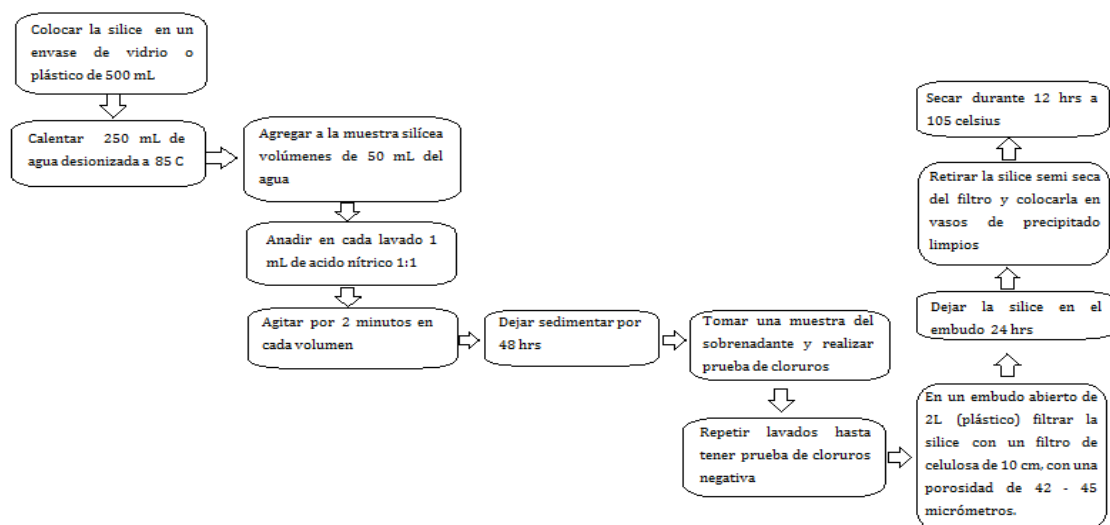
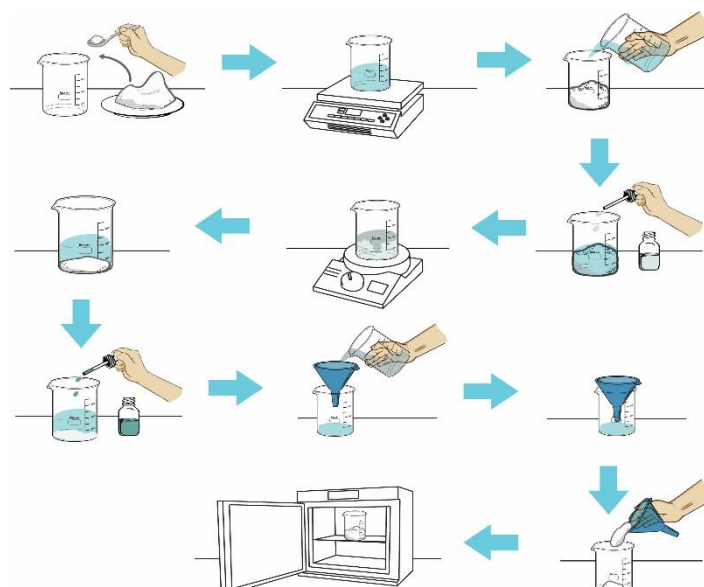


Diagrama de flujo 9.2 Procedimiento llevado a cabo para la purificación de sílice micro amorfa en imágenes





6.9.3 Regeneración del material filtrante.

Es importante destacar que dentro de las experimentaciones se tiene por objetivo retener en la sílice micro - amorfa las especies metálicas disueltas en las muestras; por consiguiente se tendrán contenidos los contaminantes en un volumen bien definido de materia prima.

Sin embargo, con el objetivo de aumentar aún más la rentabilidad y las ventajas del proyecto se pretende regenerar la sílice micro amorfa para utilizarla cíclicamente en el proceso de tratamiento.

Para dicho procedimiento es importante remontar los principios básicos de solubilidad de metales; considerando de este modo que el efecto de Le Chatellier de desplazamiento de productos a reactivos se ve influenciado por diferentes factores como lo son la temperatura y la acidez, dichas variables aumentan significativamente la solubilidad de los contaminantes metálicos.

Por lo tanto, después de saturar el material filtrante se propone regenerar dicho filtro por medio de un lavado ácido elevando la temperatura para asegurar que los metales pasen a solución acuosa.

Es crítico remarcar que el volumen ácido empleado en dicho procedimiento tiene que ser significativamente menor al volumen inicial de la muestra tratada. En otras palabras se pretende que el volumen final en donde se contienen los contaminantes sea mucho menor.

Por ejemplo si se trata una muestra de 5 L con una concentración de 1 mg/L de Cobre; después de la retención y de la extracción del medio filtrante se puede contener esta misma cantidad másica de cobre en un volumen de 50 mL con lo que no solo se amortigua el impacto ambiental causado por estos contaminantes si no que también se abre la posibilidad de emplear nuevamente la sílice micro amorfa para posteriores tratamientos lo que mejora en gran medida la rentabilidad el tratamiento.

Por último, es importante mencionar que la regeneración de la sílice se lleva a cabo bajo el mismo procedimiento citado anteriormente con respecto a su purificación, con la excepción de que los volúmenes de lavado se reducen a emplear únicamente el 10% del indicado bajo el procedimiento de purificación, es decir que los lavados se llevan a cabo con 5 mL de ácido nítrico al 1:1.



7. Metodología experimental.

Primeramente, es importante mencionar que dentro de todo proceso experimental resulta fundamental establecer ciertos criterios de operación que marquen el modo de trabajo a seguir a lo largo de toda la etapa experimental.

De tal modo que las variaciones presentadas entre cada prueba sean mínimas, lo que favorece en gran medida a incrementar la homogeneidad de los factores que influyen en la obtención de resultados representativos con los cuales se puedan crear comparaciones directas y eficientes entre las experimentaciones.

Es decir que dentro de esta sección se presenta una serie de pasos experimentales o bien la metodología fijada como protocolo para la realización de la experimentación, así como del análisis de las muestras. Es importante entonces mencionar que los modos de operar son clasificados en dos bloques principales:

- Etapa pre-experimental y montaje de prueba: Remontada a fijar los factores básicos a lo largo de todas las experimentaciones como lo son: integración de subsistemas, selección de la muestra etc.
- Etapa operacional y análisis de parámetros: Orientada a fijar hábitos generales que permitan la obtención de resultados representativos (toma de muestras, criterios en las mediciones)

7.1 Presentación de metodologías pre- experimentales: Caracterización de la materia prima.

Esta sección está destinada a realizar numerosos análisis con el fin de evaluar a la sílice micro- amorfa como un posible material filtrante, relacionando así la caracterización de dicho material con la capacidad de retención metálica, necesaria para justificar la rentabilidad del sistema propuesto.

Es importante mencionar que los estudios de dicho material se realizan previa a la experimentación con muestras de aguas, ya que se pretende realizar en base a los resultados obtenidos una eficiente toma de decisiones en relación al diseño de los filtros y la manera en que se trataran las muestras.



Los análisis citados anteriormente se desglosan en el análisis de propiedades tanto físicas (densidad, porosidad) como químicas (arreglo geométrico, composición) los cuales dictaminan tienen una relación directa con las diversas propiedades la sílice micro amorfa como material filtrante.

A continuación, se describe cada uno de los análisis y su relación e importancia con la aplicación dada:

7.1.1 Determinación de la densidad sólida.

La relación existente entre la masa que ocupa un volumen específico de la sílice micro amorfa brinda un dato fundamental para la evaluación del sistema RET - FIL dentro de un enfoque inclinado hacia el aprovechamiento de espacio, diseño unitario de los filtros, capacidad hídrica de filtración (relacionado con la velocidad de filtrado acorde a su compactación).

-Procedimiento de la determinación de la densidad sólida:

1. Tomar una porción de aproximadamente 15g y dejar secando en horno a 105 Celsius por 1 hora.
2. Colocar en desecador y dejar enfriar por un periodo de 1 hora.
3. Preparar una probeta de 50 mil. Limpiar con una concentración de ácido nítrico 1:1 y enjuagar de 4 a 5 veces con agua desionizada.
4. Una vez preparada la sílice y la probeta, medir un volumen del sólido de 50 mL
5. El contenido medido en la probeta se vacía en un vaso de precipitado (previamente tarado en la balanza analítica) cuidando que todo el contenido de la probeta se traspase.
6. Pesarse el vaso de precipitado con la sílice micro- amorfa.
7. Anotar el peso obtenido con respecto al volumen de material tomado.
8. El valor de la densidad es igual a:

Densidad Sólida: $\text{Masa (g) [paso 7]} / \text{Volumen (mL) [paso 4]}$

9. Repetir los pasos [3-7] para obtener dos valores de densidad y reportar el promedio.



7.1.2 Determinación de la humedad

Definida como la cantidad de agua contenida por cada gramo de muestra. Es importante remarcar que en la planta geotérmica de Cerro Prieto se generan distintos flujos másicos de sílice micro amorfa, a distintos grados de pureza, y matriz.

Con lo que se destaca la existencia de muestras con matrices sólidas y coloidales. En el caso de las muestras solidas (rocas y polvo) conocer el porcentaje de humedad es un dato importante para relacionar los resultados con el tipo de proceso generador y estimar el grado de contaminación que la muestra podría presentar.

-Procedimiento de la determinación de Humedad %w/w:

1. Tomar un vaso de precipitado previamente lavado y secado. Colocarlo por un periodo de 1 hora en un horno a una temperatura de 105 - 110 Celsius.
2. Dejar que se estabilice su temperatura en un desecador por un periodo de 1 hora.
3. Pesar el vaso de precipitado en balanza analítica y registrar el peso correspondiente
4. Repetir los pasos [1-3] hasta llevar el vaso de precipitado a peso constante (se considera tarado cuando la variación de los pesos sea menor a 0.0005 g)
5. Colocar en el vaso de precipitado una cantidad mayor a 5 g de la muestra de sílice a analizar.
6. Pesar el vaso con muestra en balanza analítica y registrar el peso.
7. Colocar el vaso con muestra en el horno a una temperatura de 105 - 110 Celsius por un periodo de 1 hora.
8. Dejar que se estabilice la temperatura en un desecador por 1 hora.
9. Pesar el vaso de precipitado en balanza analítica y registrar el peso.
10. Repetir los pasos [7-9] hasta un peso constante. Registrando los pesos correspondientes.



11. Una vez obtenido el peso seco de la muestra con el vaso, Calcular el porcentaje de humedad con mediante la ecuación presentada a continuación:

$$\% \text{ Humedad w/w: } [(W_{\text{hum}} - W_{\text{seca}})/W_{\text{hum}}] \times 100$$

Wg: Peso (g) de la muestra inicial - húmeda

Seco: Peso (g) de la muestra seca

12. Realizar el análisis por duplicado y registrar el promedio de los resultados.

7.1.3 Determinación de la carga metálica.

Tras realizar las operaciones de purificación de la sílice micro- amorfa se hace necesario un análisis cualitativo y cuantitativo de la posible carga metálica contenida por cada gramo de materia prima para asegurar la retención metálica y la mejora de calidad del afluente.

Por ejemplo, si se tiene una concentración considerable de Zn en la sílice posterior a su purificación es posible que la capacidad de retención disminuya significativamente ante los cationes del agua a tratar puesto a que el material se encuentra parcialmente saturado con metales.

Otra posibilidad que se destaca y que no es menos importante es el hecho contaminar con Zn el afluente al l deslavarse la sílice (con Zinc) mediante el paso del agua con lo que se van liberando a medio acuoso trazas metálicas.

-Procedimiento de la determinación de la carga metálica:

1. Tomar una porción de aproximadamente 5g y dejar secando en horno a 105 Celsius por 1 hora.
2. Colocar en desecador y dejar enfriar por un periodo de 1 hora.
3. Transcurrido este tiempo en un vaso de precipitado pesar una cantidad aproximada a 2 gramos y registrar su peso.
4. Agregar 10 mL de Acido Nítrico Concentrado y agitar continuamente por 5 minutos
5. Colocar en la parte superior del vaso de precipitado un vidrio de reloj.
6. Digerir la muestra en una plancha de calentamiento por un periodo de 25-30 minutos.
7. Dejar enfriar la muestra
8. Filtrar la muestra en un matraz volumétrico de 100 mL.



9. Llevar a la marca con agua desionizada.
10. Leer directamente en el espectrofotómetro de absorción a la llama, preparando para cada uno de los metales a analizar una curva de calibración de por lo menos 3 puntos; asegurarse de efectuar los controles de calidad correspondientes (Blanco, duplicado, estándar control y reforzado) *Ver curvas de calibración y procedimiento de operación con AA.
11. Realizar el cálculo de porcentaje másico de la muestra para cada uno de los metales. Mediante los siguientes cálculos:

$$\text{Porcentaje de composición metálica} = \%w/w = \left\{ \left[\frac{AA.ppm}{(BM)} \right] \times 1000 \right\} / Dm \times 100$$

AA.ppm= Concentración obtenida en Absorción Atómica (mg/L)

Vm = Volumen final de la muestra (L)

Wm = Peso de la muestra (g)

12. Reportar los resultados en % peso para cada metal.

7.1.4 Determinación de la retención hídrica máxima

Propiedad de la sílice micro amorfa que se define por la capacidad que tiene un sólido de retener un volumen de agua en la parte superficial de las partículas (zona intersticial sólido - ambiente); ya sea por medios físicos (adsorción) o químicos (absorción química). Es importante cuantificar y tomar en cuenta este parámetro para posteriores tomas de decisiones en cuanto al proceso operativo de filtración (Análisis de una posible lixiviación metálica).

-Procedimiento para la determinación de la retención hídrica máxima:

1. En un papel filtro se coloca una porción mayor a 5 g de muestra.
2. Envolver la sílice en el papel filtro formando un cartucho empaquetado (con el motivo de evitar la pérdida de muestra)
3. Pesar el cartucho en balanza analítica registrando su peso como peso inicial (Wi)
4. Saturar con agua desionizada la muestra, este paso es verificado por medio del goteo constante en un periodo de 3 minutos (aproximadamente 20 gotas/min)
5. Con un clip metálico enganchar la muestra en un vaso de precipitado, dejando así que la muestra elimine el exceso de agua.



6. Registrar la temperatura ambiental y dejar en reposo la muestra por un periodo de 48 hrs, evitando el contacto directo con la luz del sol (fuente calórica) y humedad.
7. Tomar el cartucho que contiene la muestra y pesar en balanza analítica. (Wf)
8. Registrar el peso y calcular acorde a la formula presentada a continuación:

$$\% \text{ Retención Hídrica} = [(Wf - Wi) / Wi] \times 100$$

9. Realizar el análisis por duplicado, generar un promedio de los resultados obtenidos y registrar como % peso.

7.1.5 Determinación de tamaño de partícula

Para el proyecto investigativo es crucial determinar la proporción y variación del tamaño de partícula de la materia filtrante puesto a que esta característica tiene fuerte influencia en la velocidad de filtrado, capacidad de retención de contaminantes, tiempo de retención del agua a regenerar etc.

Es importante remarcar que la capacidad de intercambio catiónico (CIC) depende directamente del área de contacto del material empleado; siendo de particular interés las porciones de la sílice con menores tamaños de partícula, puesto que son las más eficaces en cuestiones de retención de contaminantes en la corteza superficial.

-Procedimiento de determinación del tamaño de partícula:

1. Homogenizar bien la muestra en un mezcladora tipo pantalón.
2. Tomar una porción de aproximadamente 20g y dejar secando en horno a 105 Celsius por 1 hora.
3. Colocar en desecador y dejar enfriar por un periodo de 1 hora.
4. Transcurrido este tiempo en un vaso de precipitado pesar una cantidad aproximada a 5 gramos y registrar su peso



5. Preparar los tamices de separación por medio de un lavado con agua desionizada dejando escurrir y secar a temperatura ambiente.
6. Armar el juego de mallas en el orden siguiente:

Tamaño (mm)
2
1.4
0.85
0.425
0.3
0.212
0.15
0.106
0.038
0.02

7. Colocar la cantidad pesada en el paso [3] en la parte superior del juego de tamices. Es decir en la malla con un tamaño de poro de 2 mm.
8. Empotrar el juego de mallas en el aparato (separación por vibración)
9. Prender el aparato en un nivel moderado de vibración, por un periodo de 2 horas.
10. Una vez transcurrido el tiempo apagar el aparato y separar cuidadosamente cada una de las mallas evitando perder muestra.
11. Pesar el contenido de cada una de las mallas.
12. Registrar los datos obtenidos y formular una tabla donde muestre los pesos obtenidos para cada una de las mallas y su porcentaje correspondiente respecto al peso total de la muestra. Para calcular el porcentaje para cada uno de los tamaños de partícula se emplea la siguiente fórmula:

$$\% \text{ De un Tamaño de partícula: } (Wt/Wf) \times 100$$

Donde:

Wt: Peso (g) de un tamaño de partícula determinado

Wf: Peso (g) Total de la muestra



7.1.6 Estudio Cualitativo por espectrofotometría infrarrojo

“La espectroscopia vibracional fue una de las primeras técnicas espectroscópicas que encontró un uso extendido, en particular la espectroscopia de absorción infrarroja (IR) que recibe su nombre de la región del espectro electromagnético implicada. La región IR del espectro electromagnético se encuentra entre 12800-10 cm⁻¹ .

Tanto desde el punto de vista de las aplicaciones como de los aparatos se puede dividir en tres zonas: IR cercano (NIR): 12800-4000 cm⁻¹, IR medio: 4000-400 cm⁻¹; IR lejano: 400-10 cm⁻¹, siendo en el IR medio donde se dan la mayoría de las aplicaciones analíticas tradicionales.

Por su parte el IR lejano requiere el uso de fuentes y materiales ópticos especiales, es utilizado para el análisis de compuestos orgánicos, inorgánicos u organometálicos que contengan átomos pesados (masa atómica superior a 19) y proporciona información útil en estudios estructurales.

Por lo que respecta al IR medio, existen espectrofotómetros comerciales desde 1940, aunque los avances más significativos en la técnica se produjeron con el desarrollo de instrumentos que incorporan el método de transformada de Fourier (FT- IR), que ha mejorado la calidad de los espectros y minimizado el tiempo requerido para la obtención de datos.

Hoy en día, casi todos los instrumentos utilizados en espectroscopia infrarroja están equipados con sistema de análisis que utilizan transformadas de Fourier de haz sencillo. Una de las grandes ventajas de la espectroscopia IR es su versatilidad, ya que permite estudiar prácticamente cualquier muestra con independencia del estado en que se encuentre: líquidos, disoluciones, pastas, polvos, fibras, films, gases o superficies son algunos ejemplos.



Como en otros procesos de absorción de radiación electromagnética, la interacción de la radiación infrarroja con la materia orgánica o inorgánica provoca alteración medible. Puesto que esta alteración guarda relación con cambios en el estado vibracional de las moléculas. El espectro vibracional de una molécula se considera una propiedad física única y por tanto característica de ésta molécula. Así, entre otras aplicaciones, el espectro IR se puede usar como huella dactilar en la identificación de muestras desconocidas mediante la comparación con espectros de referencia.²⁴¹

Tabla 7.1 Localización de bandas de absorción en la región 4000-400 cm⁻¹

Posición (cm ⁻¹)	Vibración
3700-3650	Estiramiento de O – H en Si – OH
3400	Estiramiento de O – H en H – O – H
3375	N- H Estiramiento en óxido de silicio
3340	N – H estiramiento en silicio
3200	Agua adsorbida
2270	Si – H Estiramiento en óxido de silicio
2170	Si – H Estiramiento en nitrato de silicio
1616	Flexión H – O – H
1370	B – O
1320	P = O
1200-1175	H – N – H Flexión
1070	Estiramiento Si – O
950	Si- N Estiramiento en oxinitrato
935-910	Estiramiento Si – OH
880	Flexión H – Si – H
880	Si – N Estiramiento en Si(NH) ₂
870	Si – N Estiramiento en Si ₂ N ₄ Plasma
835	Si – N Estiramiento en Si ₂ N ₄
810-805	Flexión Si – O – Si
610	Absorción Fónica Si
470	Absorción de Si
450	Si – O – Si Balanceo

La comparación de los espectros vibracionales entre la sílice micro amorfa residual y purificada brinda información cualitativa crucial para identificar trazas contaminantes o bien para estimar el grado de pureza de la sílice micro amorfa generada en el proceso geotérmico.

Es crucial mencionar que las bandas de absorción infrarroja de las vibraciones de flexión y contracción, características de la sílice vienen dadas en la tabla 10.1, cabe destacar que las señales dadas por los enlaces silicio- oxígeno resultan ser los de mayor interés para llevar a cabo el análisis cualitativo de la materia silícea.

A modo comparativo se analizara cualitativamente una muestra de sílice micro amorfa residual, es decir sin previos tratamientos de purificación a fin de comparar con la materia prima producto del proceso de depuración de trazas

²⁴¹Serrano, José. Curso: Instrumentación y Métodos de análisis químico. Espectroscopia Infrarroja 1-Fundamentos Recuperado el día: 12/01/16 URL: http://www.upct.es/~minaees/espectroscopia_infrarroja.pdf



contaminantes, cabe destacar que dicho procedimiento es detallado en el apartado 9.9.2,

El análisis por espectroscopia infrarroja es una metodología confirmativa de la efectividad de los pre tratamientos experimentales a los que se somete la materia prima, puesto que dicho análisis se lleva de manera rápida y sencilla.

Una vez identificadas las señales vibraciones características se facilita la toma de decisiones en relación a determinar si tiene sílice micro amorfa con una baja cantidad de trazas contaminantes adecuada para llevar a cabo el tratamiento de agua residual.

7.2 Metodología experimental: Descripción de componentes del tratamiento regenerador

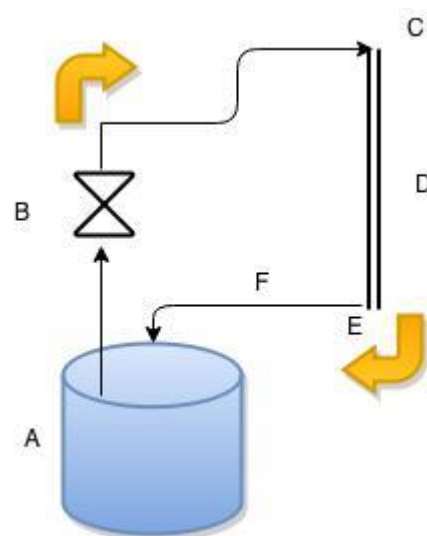
Tras la purificación de la sílice amorfa se abre la posibilidad de emplear dicha materia prima como un material de intercambio iónico para llevar a cabo la remoción de metales pesados (Zn, Cd, Cr, Ag, Ni, Cu, Pb) en aguas urbanas e industriales, la metodología y su representación mediante la cual se lleva a cabo dicha remoción de contaminantes se presentan a continuación.

Es también importante mencionar que dentro de la etapa experimental se pretende modificar una serie de variables como lo es el pH, cantidad de materia prima a emplear y el tiempo de exposición; para averiguar cuáles son las condiciones son las más favorables para el tratamiento estipulado.

Por dicha razón en la figura 10.1 se presenta el esquema básico de tratamiento, el cual alberga los principales componentes del sistema de remoción de metales.

Imagen 7.1 Componentes básicos del sistema de remoción de metales.

- A: Tanque recolector de muestra (2 L)
- B: Bomba de agua
- C: Conector "A" Bomba - Filtro
- D: Filtro de Sílice Marco - amorfa
- E: Conector "B" Filtro - Tanque
- F: Efluente hacia el tanque recolector
- G: Sistema de homogeneización





A continuación, se detallarán cada uno de los componentes, a fin de comprender con mayor profundidad el funcionamiento del tratamiento estipulado para esta etapa experimental.

Ya que al tomar en cuenta dichos componentes resulta más sencillo deducir las posibles variables dependientes e independientes del sistema teniendo en cuenta que se pretende encontrar los factores ideales para lograr la remoción de metales más eficiente posible.

A: Tanque recolector de muestra (2 L): La selección del volumen a emplear depende directamente de la carga metálica total, ya que se busca tener un rango entre 4 mg y 10 mg de cada contaminante en contacto con el sistema de tratamiento, por lo tanto se optó por emplear un contenedor plástico (polietileno de alta densidad) de 2 litros, considerando que de esta manera las cargas máxicas de los contaminantes citados anteriormente el rango de las concentraciones metálicas varían entre 2 miligramos por litro a 5 miligramos por litro.

B. Bomba de agua: Primeramente, es importante mencionar que la eficacia del tratamiento de las muestras depende en gran medida de la capacidad y eficiencia del bombeo.

En otras palabras, se busca un sistema de alta eficiencia en base a las tasas de energía eléctrica consumidas con respecto a la capacidad de caudal máximo. Por otra parte, se procuró en seleccionar un modelo de bomba eléctrica constituida únicamente por piezas plásticas para evitar la contaminación (piezas metálicas).

Por dichas razones en la siguiente tabla se presentan las características de la bomba eléctrica empleada para la etapa experimental.

Tabla 7.2 Características de la bomba eléctrica empleada para la experimentación.

Modelo:	King-225
Voltaje:	110-120V
Frecuencia:	60Hz
Poder:	19W / 0.025 hp
Caudal Máximo:	1500 L/Hr
Altura Máxima:	1.6 m



C : Conector "A" Bomba - Filtro: A la hora de efectuar el tratamiento, la muestra es dirigida directamente al filtro compuesto por sílice micro amorfa, por medio de un sistema de conducción conformado por mangueras de polietileno de 0.5 cm de diámetro con un regulador de flujo de material plástico.

Con el objetivo de incrementar al máximo el contacto de la muestra con el filtro empacado de materia prima así como también facilita la limpieza del sistema de tratamiento, evitar la contaminación cruzada de las muestras así como también la sustitución de piezas se efectúa de manera sencilla y económica.

D : Filtro de Sílice Micro - amorfa: La remoción de metales en la muestra a depurar depende directamente de la cantidad y la calidad de la materia prima empleada en el sistema, por lo tanto es importante remarcar que previo a cada una de las sesiones experimentales la sílice micro amorfa debe de ser purificada y secada a 105 celsius.

Posteriormente se prosigue a pesar una cantidad específica de dicho material (los gramos pesados dependen de las variables controladas en cada una de las experimentaciones realizadas) y empacarlo en dos filtros semi permeables generando de este modo una especie de almohadilla.

Así pues, también es necesario pesar una cantidad de sílice micro amorfa equivalente a la empleada en el filtro descrito anteriormente para agregar dicho material directamente a la muestra en el tanque de retención y aumentar de este modo la capacidad de intercambio iónico y con ello la efectividad del sistema de tratamiento.

Es importante mencionar que el filtro de sílice descrito anteriormente se monta en un equipo soxhlet de extracción descrito en la sección 9.4.2.1 el cual asegura el contacto entre la muestra y la materia prima empleada sea el adecuado.

E : Conector "B" Filtro - Tanque: Una vez que los contaminantes entran en contacto directo con el filtro de sílice micro amorfa, la muestra es dirigida directamente al tanque de retención, por medio de un sistema de conducción conformado por mangueras de polietileno de 0.5 cm de diámetro.



F : Efluente hacia el tanque recolector: La muestra previamente expuesta al sistema de tratamiento regresa al tanque recolector por medio del conector “B”, lo que permite que nuevamente la muestra sea conducida hacia el filtro de sílice micro amorfa por medio del conector “A”.

G: Sistema de homogeneización: Primeramente es fundamental remarcar que se pretende descartar la homogeneización de la muestra como una variable experimental, puesto a que se desea que en cada uno de los ensayos experimentales el mezclado de la muestra sea uniforme, fue necesario tomar en cuenta ciertas características fundamentales para el sistema de homogeneización como lo son: constitución de un material inerte es decir que no reaccione ni tampoco contamine las muestras, sencillo de instalar así como de utilizar y con un costo relativamente bajo; por dichas razones se optó por utilizar un agitador magnético.

7.3 Materiales a emplear en cada ensayo experimental

Acorde a los requerimientos descritos en la sección 10.2 de Metodología experimental: Descripción de componentes del tratamiento regenerador, se hace necesaria una lista de los materiales empleados durante cada uno de los ensayos experimentales independientemente de las variables a controlar.

Tabla 7.3 Materiales empleados durante la etapa experimental

Material	Cantidad
Soporte Universal	1
Pinzas 3 dedos	1
Agitador magnético	1
Mosca magnética	1
Sistema Soxhlet	1
Filtro semi-permeable	3
Pipeta volumétrica 2mL	4
Bomba eléctrica	1
Juego de mangueras plásticas	1
Juego de conectores con regularizador de flujo	1
Pizeta	1
Perilla	1



7.4 Reactivos a emplear en cada ensayo experimental

Dentro de los ensayos experimentales, dependiendo de las variables seleccionadas a controlar como lo son pH y la concentración de los contaminantes metálicos, se hace necesario una serie de reactivos los cuales son citados en la tabla 10.3.

Tabla 7.4 Relación de reactivos - uso dentro de los ensayos experimentales

Reactivo	Uso
Acido nítrico 1:5	Ajuste de pH a <2 para ensayo experimental de variable controlada
Hidróxido de Sodio 1:5	Ajuste de pH a >10 para ensayo experimental de variable controlada
Estándar metálico Zn 1000 ppm	Evaluación de capacidad de remoción del sistema para este metal en específico.
Estándar metálico Cd 1000 ppm	Evaluación de capacidad de remoción del sistema para este metal en específico.
Estándar metálico Pb 1000 ppm	Evaluación de capacidad de remoción del sistema para este metal en específico.
Estándar metálico Cu 1000 ppm	Evaluación de capacidad de remoción del sistema para este metal en específico.
Estándar metálico Ni 1000 ppm	Evaluación de capacidad de remoción del sistema para este metal en específico.
Estándar metálico Ag 1000 ppm	Evaluación de capacidad de remoción del sistema para este metal en específico.
Estándar metálico Cr 1000 ppm	Evaluación de capacidad de remoción del sistema para este metal en específico.
Silica micro amorfa	Materia prima del sistema de tratamiento
Agua desionizada	Etapa experimental de muestra sintética, así como también limpieza del sistema



7.5 Equipo a emplear en cada ensayo experimental

Dentro de los ensayos experimentales, independientemente del análisis de las muestras tomadas, es necesario contar con ciertos equipos de laboratorio para garantizar el adecuado control de las variables de interés. Dentro de la tabla 10.4 se presenta la relación de equipo a usar durante los ensayos experimentales

Tabla 7.5 Relación de equipo - uso durante los ensayos experimentales

Equipo:	Uso:
Medidor de pH	Ajuste de pH dependiendo de la variable a controlar
Balanza analítica	Pesar una determinada cantidad de materia prima dependiendo de la variable a controlar

7.6 Descripción del procedimiento experimental

Dentro de esta sección se detallarán los pasos necesarios para efectuar cada una de las sesiones experimentales, en cada una de las cuales se estipularon una serie de variables presentadas en la tabla 10.5 correspondiente a la sección 9.6, necesarias para determinar los factores que favorecen la remoción de metales en el sistema estudiado.

Tabla 7.6 Identificación y clasificación de condiciones experimentales

Factor : CONSTANTE	Factor : VARIABLE
Composición de la muestra	Cantidad de materia prima
Temperatura	pH
Homogeneidad de muestra	Matriz de la muestra
Tipo de muestra	
Volumen inicial de muestra	
Composición del medio filtrante	
Concentración de metales	

Sin embargo a pesar de las diferentes variables a controlar el procedimiento experimental para cada uno de los ensayos a realizar es el mismo, tal y como se muestra en la imagen 10.1 la cual presenta el arreglo de los componentes básicos



para llevar a cabo el tratamiento de las muestras, dadas estas razones la metodología general será descrita a continuación:

1. Previo a las experimentaciones es necesario seguir el procedimiento 9.8.5.1 de purificación de la sílice micro amorfa con el fin de obtener la mayor efectividad posible en relación a la remoción de contaminantes por unidad de tiempo.
2. Montaje del tanque receptor, primeramente, es importante mencionar que dentro de esta sección es útil apoyarse en la figura 10.1 de la sección de componentes básicos del sistema regenerador para efectuar la adecuada instalación del sistema de tratamiento; se coloca el tanque receptor sobre el agitador magnético seguido de instalar la bomba eléctrica (dicho motor posee adaptadores de soporte para superficies plásticas y vítreas).
3. Posteriormente se ajusta la pinza de 3 dedos en el soporte universal y se prosigue a instalar el sistema soxhlet como se muestra en la imagen 10.1.

4. Se ajustan los conectores C y E para cerrar el sistema de tratamiento, es importante hacer ver que el conector C posee un regulador de flujo el cual se debe de abrir completamente para permitir el adecuado contacto de la muestra con el filtro de sílice, de igual manera este mismo conector posee un gancho que se sujeta en la parte superior del sistema soxhlet para evitar que el movimiento causado por la agitación de la muestra y la vibración de la bomba eléctrica causen que la manguera conduzca el caudal de muestra fuera del equipo soxhlet.



Imagen 7.2 Sistema de Tratamiento

5. Una vez montados los componentes mencionados anteriormente se prosigue a limpiar el sistema de tratamiento, procedimiento que consiste en agregar al tanque receptor un volumen de 2 litros de agua desionizada, encender la bomba eléctrica y dejar fluir el agua durante un periodo de 30 minutos con el fin de eliminar cualquier impureza metálica que pudiera contaminar la muestra a tratar (soxhlet - tanque de recepción)



6. Concluida la limpieza del sistema únicamente es necesario descartar el agua desionizada empleada en el paso anterior.
7. Preparación de la muestra a tratar. Dentro de esta sección se destacan dos vertientes principales que serán descritas a continuación:
 - *Tratamiento de una muestra sintética:* Se agrega al tanque receptor un volumen de 2 L de agua des ionizada seguido de añadir la cantidad equivalente a la concentración de metales con la que se desea trabajar. En este caso dentro de las experimentaciones realizadas se trabajó con 1 ppm (miligramo por litro) de cada metal (Zn,Cd,Ni,Cu,Cr, Pb, Ag) es decir 1 mL del estándar de 1000 ppm por cada litro empleado. Finalmente se homogeniza la muestra y se toma el valor del potencial de hidrógeno y se ajusta dependiendo de las variables con las que se trabajarán en la experimentación.
 - *Tratamiento de una muestra real:* Tras coleccionar la muestra es necesario medir un volumen de 2 litros de la misma y agregar al tanque receptor, es importante también tomar el valor de pH y registrarlo.
8. Tomar una muestra del agua a tratar y marcarla como tiempo 0, para hacer la relación de remoción de carga metálica por unidad de tiempo
9. Dentro de este punto es importante mencionar que acorde a datos experimentales obtenidos la efectividad del tratamiento se favorece significativamente al complementar un filtro de sílice amorfa (correspondiente a "D" en la figura 10.1) con una suspensión del mismo material en el tanque de retención. Por lo tanto la metodología para llevar a cabo la remoción de metales se basa en pesar 5 gramos de sílice amorfa previamente secados a 105 celsius para generar un filtro empacado, el cual consiste únicamente en envolver en dos filtros semi-permeables la materia prima en cuestión generando una especie de almohadilla. Tal y como fue descrito en el punto D de los componentes básicos del sistema regenerador.
10. Por otra parte es necesario pesar 5 gramos de materia prima previamente a 105 grados celsius y se agregan directamente a la muestra en el tanque de retención, para favorecer el intercambio iónico de los metales y su respectiva retención en la sílice amorfa
11. Una vez agregada la sílice micro amorfa se da inicio a la homogeneización de la muestra, por lo que únicamente es necesario encender el agitador magnético y fijar un mezclado suave pero constante para evitar que la sílice

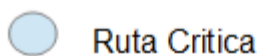


en suspensión decante y la distribución másica de contaminantes en el flujo sea uniforme.

12. Encender el motor eléctrico siendo necesario asegurarse que funcione adecuadamente.
13. Abrir totalmente la válvula de flujo del conector "C" y direccionar el caudal hacia el equipo soxhlet y asegurarse que el agua a tratar empape completamente el filtro sílice empacado.
14. Comenzar el conteo del tiempo de tratamiento.
15. Tomar muestras a los 5, 30, 60 y 120 minutos de un volumen aproximado de 50mL, para efectuar el estudio de remoción de metales en relación al tiempo de exposición del tratamiento. Tal y como se muestra en la tabla 10.6 anexada después de este procedimiento.
16. Etiquetar adecuadamente las muestras tomadas
17. Descartar el agua residuo generada en un contenedor adecuado para el confinamiento de residuos peligrosos
18. Repetir el paso 5 de este procedimiento para limpiar el sistema y dejarlo listo para la próxima experimentación
19. Analizar en laboratorio cada una de las muestras, acorde a los parámetros estipulados en la sección 9.8 correspondiente a la medición de parámetros
20. Reportar y manejar los resultados obtenidos en cada uno de las experimentaciones realizadas; basándose en tabular la relación entre los miligramos por litro (ppm) y el tiempo de tratamiento.

**NOTA: El procedimiento descrito anteriormente estipula únicamente los factores controlados que presentaron los mejores resultados en la fase experimental.*

El procedimiento para llevar a cabo el tratamiento de muestras preparadas con estándares metálicos en el laboratorio o bien de muestras reales provenientes de procesos industriales es el mismo, a continuación se presenta un diagrama de flujo en donde de manera sencilla se muestran los principales pasos a seguir.



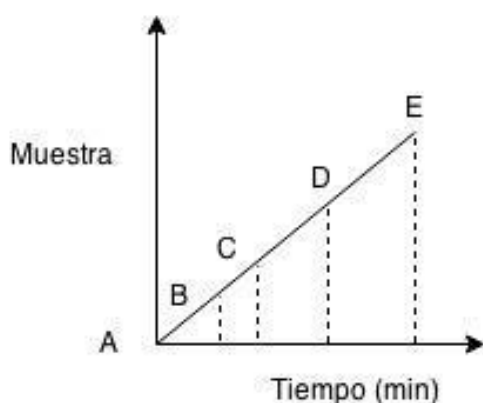


7.6.2 Secuencia de muestreo en cada uno de los ensayos experimentales

En la tabla 10.6 se muestra la secuencia de muestreo a llevar por cada experimento a realizar independientemente de las condiciones ajustadas, partiendo de un tiempo 0 minutos, lo que es equivalente a tomar la muestra previamente al tratamiento.

Tabla 7.7 Secuencia de muestreo por experimento

ID	Número de Muestra	Tiempo (min)
A	1	0
B	2	5
C	3	30
D	4	60
E	5	120



7.6.3 Relación análisis - muestra a realizar durante cada ensayo experimental

En la tabla 10.7 se muestra la secuencia de análisis a llevar acabo en cada uno de los ensayos experimentales con muestras reales provenientes del campo industrial independientemente de las condiciones ajustadas.

Tabla 7.8 Relación de análisis a realizar por número de muestra y volumen a tomar, en experimentaciones realizadas con agua real.

ID	ANÁLISIS	Muestras a tomar	Volumen de muestra
A	Metales	1-5	25 mL
B	Turbidez	1-5	25 mL
C	Sólidos suspendidos Totales	1,4,5	50 mL
D	Demanda Química de oxígeno	1-5	10 mL
E	pH	1-5	-



7.6.4 Planeación de los ensayos experimentales

Acorde a la sección 9.6 en donde se realizó la Identificación de variables a controlar en cada experimentación, se hace necesaria una serie de ensayos experimentales que cubra la mayor parte de variables a controlar a fin de determinar los factores que favorecen el tratamiento de regeneración.

Tabla 7.9 Sesiones experimentales.

Tipo de experimentación	Numero de Experimentos	Observaciones Matriz del agua a tratar.
Determinación de diseño	3	Sintética
Filtración a cambio de pH	3	Sintética
Suspensión de Sílice- Retención	2	Sintética
Sistema FIL-RET	1	REAL

7.6.6 Ensayos experimentales con variable controlada: Muestra sintética

En la tabla 10.9 se presentan los siete estándares metálicos a emplear para los ensayos experimentales realizados con agua preparada. Seleccionados por ser catalogados como metales pesados, se regulados por la NOM-002-SEMARNAT-1996 y ser comunes en descargas industriales (dependiendo la procedencia del afluente).

Tabla 7.10 Descripción de fase experimental I. Tratamiento de agua preparada con estándares metálicos.

Metal	Concentración	Volumen total de agua a tratar	Metodología de análisis
Cobre, Cromo, Cadmio, Níquel, Zinc, Plomo, Plata	1 ppm	2000 mL	Espectrofotometría de absorción atómica (EAA)



8. RESULTADOS

8.1 Caracterización de la sílice micro amorfa

Dentro de esta sección se presentan los resultados obtenidos durante la caracterización de la sílice micro amorfa proveniente de la planta geotérmica de Cerro Prieto, cabe destacar que los resultados obtenidos son de suma importancia para la interpretación de resultados de los ensayos experimentales a realizar, puesto que brindan valiosa información con la que se pueden explicar los mecanismos de remoción metálica.

8.1.1 Determinación de densidad sólida

Presentación de los resultados obtenidos para la determinación de la densidad sólida de la sílice micro amorfa, cabe destacar que el valor de esta densidad dependerá de múltiples factores como lo son: humedad, carga de contaminantes etc.

Tabla 8.1 Resultados para la determinación de la densidad sólida de la sílice micro amorfa

Densidad Sólida	
Volumen (mL)	50 mL
Masa (g)	20.9964 g
Densidad (g/mL)	0.4199 g/mL

8.1.2 Porcentaje de humedad

Presentación de los resultados obtenidos para la determinación de la humedad sólida de la sílice micro amorfa, cabe destacar que el valor de esta humedad dependerá de múltiples factores como lo son: punto de muestreo, tiempo transcurrido desde que se tomo la muestra hasta que se analizo etc.

Tabla 8.2 Determinación del porcentaje de humedad para una muestra de sílice micro amorfa correspondiente al pozo C22

ID muestra: 213 C	Masa (g)
Peso inicial de cápsula:	25.9557 g
Capsula + Muestra	38.4141 g
Peso final:	31.0859 g

% Humedad: $((38.4141 - 31.0859) / 38.4141) * 100$

% Humedad = 18.42%



8.1.3 Determinación de impureza por medio de extracción metálica

Presentación de los resultados obtenidos para la determinación de contaminantes metálicos contenidos en la sílice micro amorfa, cabe destacar que en este caso específico únicamente se analizaron los iones metálicos: Zn, Cu, Cd, Ni, Ag, Cr y Pb con los que se realizaran los ensayos experimentales a modo de verificar que no se encuentran retenidos en la matriz superficial silícea.

Tabla 8.3 Factores controlados de la extracción metálica

Cantidad de Sílice a analizar:	1.5108 g
Volumen de agua empleado:	50 mL
Volumen de Ácido nítrico empleado:	5 mL

Metal	Concentración ppm	[Extracción] mg	% w/w
Zn	0.1654	0.09924	0.01
Pb	0.0758	0.04548	0
Cd	ND**	NA*	NA*
Cu	0.0197	0.01182	0
Ni	ND**	NA*	NA*
Cr	ND**	NA*	NA*
Ag	ND**	NA*	NA*

Tabla. 8.4 Resultados Cualitativos y Cuantitativos de la extracción de sílice micro-amorfa

ND**: No detectado

*NA: No Aplica

8.1.4 Determinación retención hídrica

En la tabla 11.5 se presenta el porcentaje de retención hídrica para la sílice micro amorfa, cabe destacar que esta cifra depende directamente del tamaño de partícula del material silíceo.

Tabla 8.5 Determinación de retención hídrico para sílice micro amorfa

t = 48 hrs	Peso Inicial	Peso Final	% Retención
Muestra	7.2257 g	7.3194 g	1.29%



8.1.5 Estimación del tamaño de partícula:

El tamaño de partícula de la sílice micro amorfa representa un punto crítico para la efectividad del tratamiento de aguas residuales, puesto que entre más área específica tenga el material de retención mayor será el contacto con los contaminantes, es por eso que se hace fundamental realizar la determinación de tamaño de partícula del material síliceo, es en la tabla 11.6 donde se presentan los valores en milímetros de diámetro obtenidos para la sílice micro amorfa.

Tabla 8.6 Determinación del tamaño de partícula de sílice micro amorfa extraída de la planta geotérmica de cerro prieto pozo C22

Tamaño (mm)	W(g)	%
2	0	0
1.4	0	0
0.85	0.109	2.11
0.425	0.5993	11.6
0.3	0.3424	6.63
0.212	0.4596	8.9
0.15	0.5457	10.56
0.106	0.4828	9.34
0.038	0.3955	7.65
0.02	0.0366	0.71
<0.02	1.8182	35.19
TOTAL:	4.7891	
Wt (g):	5.1666	
%Recuperación:	92.69345411	

8.1.6 Espectroscopia Infrarroja

Primeramente, cabe destacar lo importante que resulta la espectroscopia infrarroja para la identificación de grupos funcionales para compuestos no solo orgánicos si no también inorgánicos, es decir dicha caracterización cualitativa permite realizar rápidos y eficaces análisis comparativos de los espectros vibracionales entre la sílice micro amorfa residual y purificada.



Es crucial mencionar que las bandas de absorción infrarroja de las vibraciones de flexión y contracción características de la sílice vienen dadas en la tabla 10.1 correspondiente a la sección 10.1.6, cabe destacar que se esperan señales claras y con bajas trazas contaminantes puesto que como fue descrito en el apartado 9.9.1, el muestreo de la sílice micro amorfa se lleva acabo directamente en las canaletas de extracción, punto de muestreo que posee un bajo tiempo de contacto con el exterior y que por lo mismo se contribuye a la colección de materia prima más pura.

Cabe destacar que las principales señales de la sílice que componen la huella dactilar son dadas por los enlaces silico- oxigeno, tres son las principales señales vibraciones de contracción y flexión dadas a los números de onda 1070, 800 y 610 cm^{-1} , las imágenes 10.2 y 10.3 presentan los espectros vibraciones obtenidos para la sílice micro amorfa residual y purificada respectivamente.

Imagen 8.1 Espectro Infrarrojo de Sílice Micro Amorfa Residual

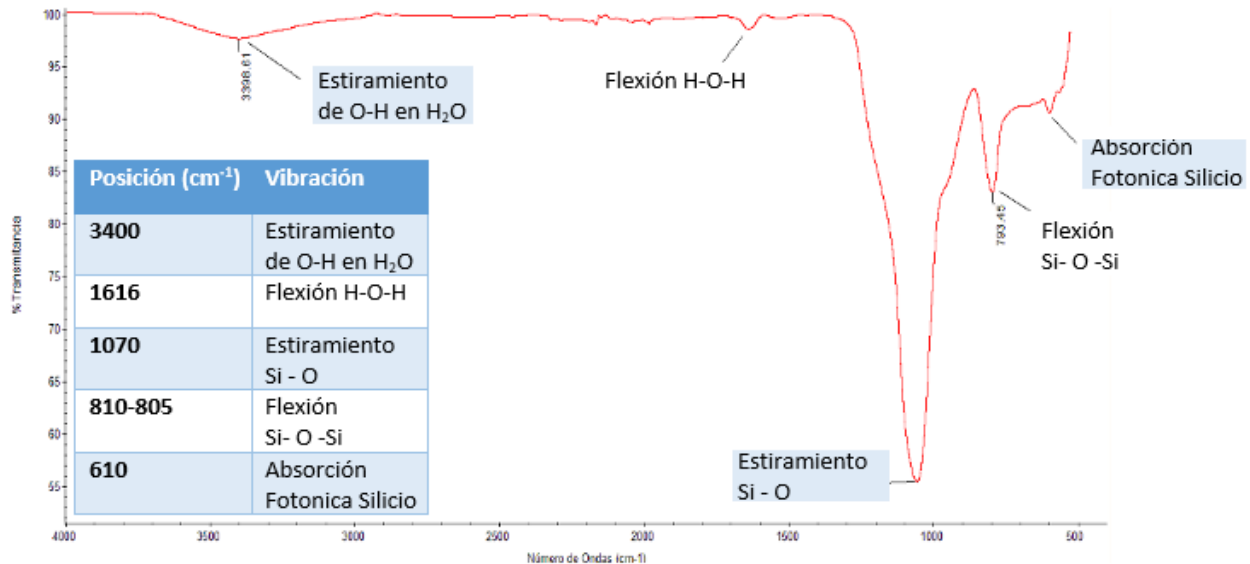
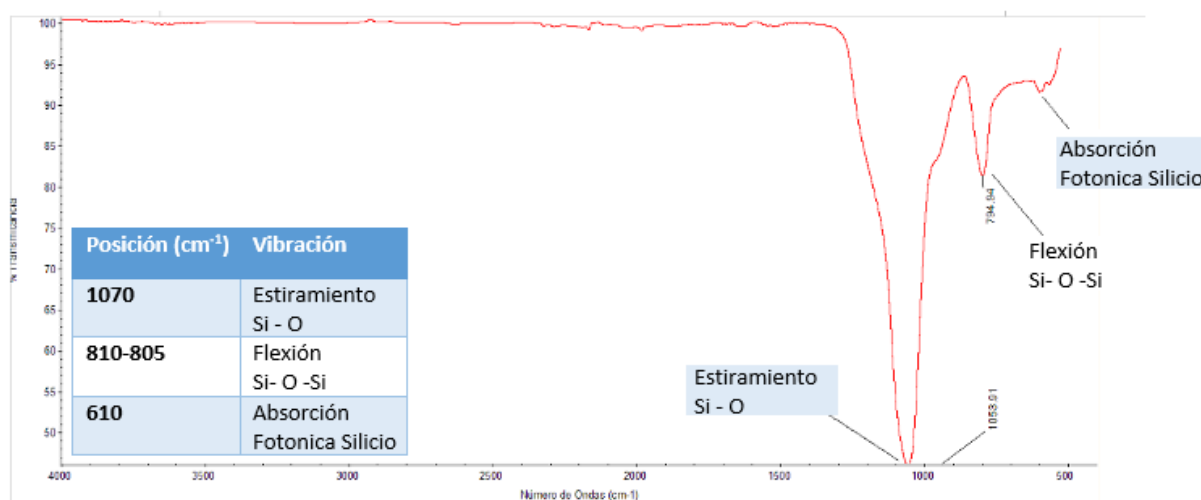




Imagen 8.2 Espectro Infrarrojo de Sílice Micro Amorfa Purificada



En de la imagen 10.2 es posible observar que no se encuentran contaminantes a gran escala dentro de la sílice micro amorfa residual, esto es un indicativo del buen procedimiento a la hora de llevar a cabo el muestreo, puesto que las únicas señales ajenas a la estructura de la sílice amorfa son las del agua, dadas a un numero de onda de 3400 y 1616 cm-1, ambas correspondientes a las vibraciones de flexión de los enlaces hidrogeno – oxígeno.

Este hecho resulta bastante lógico puesto que no se debe olvidar que las muestras tomadas en la canaleta son condensadas (líquidos) los cuales se transportan y se secan a 103 Celsius, sin embargo, cabe destacar que este procedimiento únicamente está destinado a eliminar el agua que se encuentra adsorbida en la capa superficial de la sílice, no a eliminar parte del agua que esta incrustada en la estructura molecular del material amorfo.

A pesar de esto cabe destacar que dichas trazas de agua en la materia prima no afectan la capacidad de la sílice amorfa para la retención de iones metálicos, puesto que el procedimiento regenerador es llevado siempre en fase acuosa.

Por dichas razones cabe destacar que la materia prima obtenida del proceso geotérmico tiene una alta calidad puesto que si ahora se presta atención en la imagen 10.3 se denotaran las mismas señales vibraciones correspondientes a los enlaces silicio – oxígeno, obsérvese que para ambos casos las señales de la huella dactilar vienen dadas a los mismos números de onda un indicativo de que nos encontramos analizando la misma sustancia.



8.2 Presentación de Resultados experimentales: Tratamiento regenerador

Dentro de esta sección del trabajo se tiene por objetivo la presentación de los resultados brutos de los experimentos realizados por medio de gráficos que serán organizados acorde a una clasificación generada en relación a la naturaleza y a las actividades realizadas a lo largo de las pruebas con lo que se favorece la comparación de los resultados, así como también se facilitara en gran medida el análisis de resultados.

8.2.1 Experimento #1 Filtración con 10 g sílice amorfa a un pH 2

Se presentan a continuación las cargas másicas registradas de los iones Zn, Cu, Cd, Ni, Ag, Pb y Cr en 120 minutos de tratamiento de agua estándar preparada, a un pH de 2.0 empleando 10 gramos de sílice micro amorfa en el filtro.

Imagen 8.3 Comportamiento de la carga metálica en el experimento 1 a pH 2

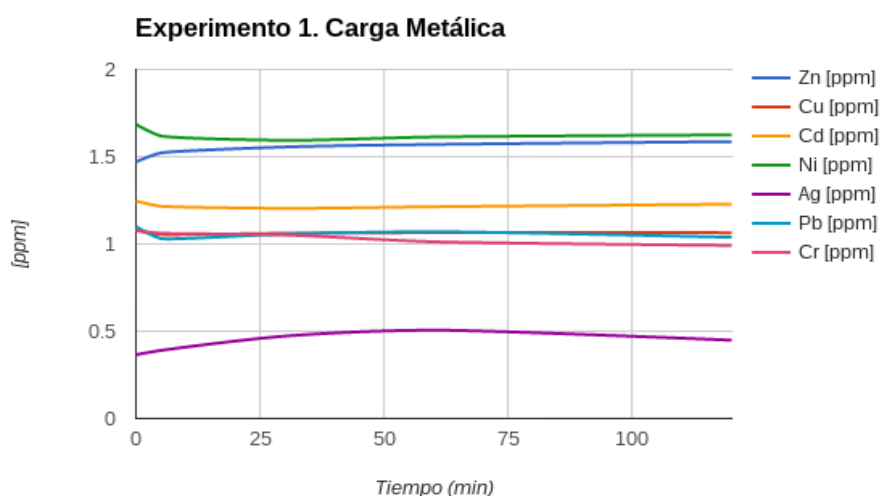


Tabla 8.7 Relación de constantes cinéticas obtenidas experimentalmente con respecto a las variables controladas en el ensayo #1.

Metal	K/1
Zn	1.19^{-03}
Pb	-1.98^{-04}
Cd	-1.95^{-05}
Ni	-1.34^{-04}
Cu	-9.51^{-06}
Ag	1.61^{-03}
Cr	-6.78^{-04}

(K) = mg de contaminante metálico eliminados / minuto



8.2.2 Experimento #2 Filtración con 10 g sílice amorfa a un pH 10.6

Se presentan a continuación las cargas másicas registradas de los iones Zn, Cu, Cd, Ni, Ag, Pb y Cr en 120 minutos de tratamiento de agua estándar preparada, a un pH de 10.6 empleando 10 gramos de sílice micro amorfa en el filtro.

Grafica 8.4 Comportamiento de la carga metálica en el experimento 2

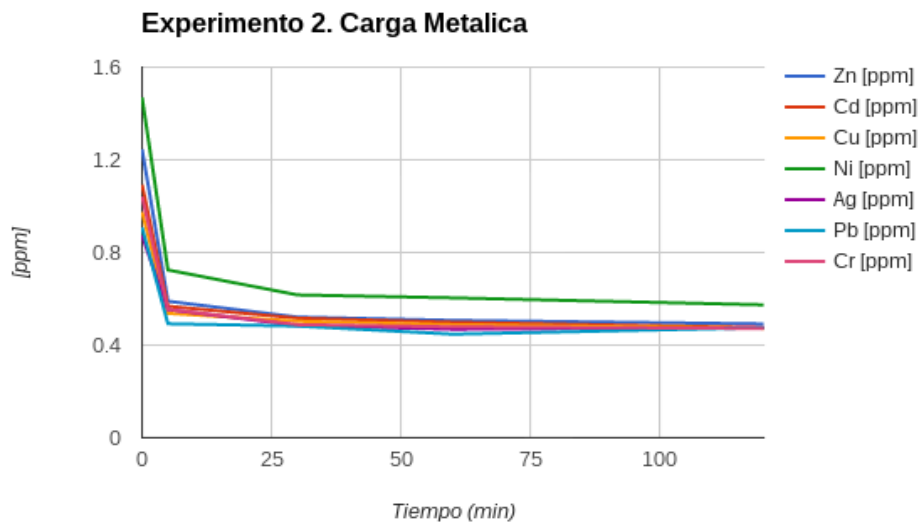


Tabla 8.8 Relación de constantes cinéticas obtenidas experimentalmente con respecto a las variables controladas en el ensayo #2.

Metal	K/2
Zn	-4.87 ⁻⁰³
Pb	-3.14 ⁻⁰³
Cd	-4.42 ⁻⁰³
Ni	-5.10 ⁻⁰³
Cu	-3.75 ⁻⁰³
Ag	-3.35 ⁻⁰³
Cr	-4.17 ⁻⁰³

(K) = mg de contaminante metálico eliminados / minuto



8.2.3 Experimento #3 Filtración con 10 g sílice amorfa a un pH 6.5

Se presentan a continuación las cargas másicas registradas de los iones Zn, Cu, Cd, Ni, Ag, Pb y Cr en 120 minutos de tratamiento de agua estándar preparada, a un pH de 6.5 empleando 10 gramos de sílice micro amorfa en el filtro.

Grafico 8.5 Comportamiento de la carga metálica en el experimento 3 a pH 7

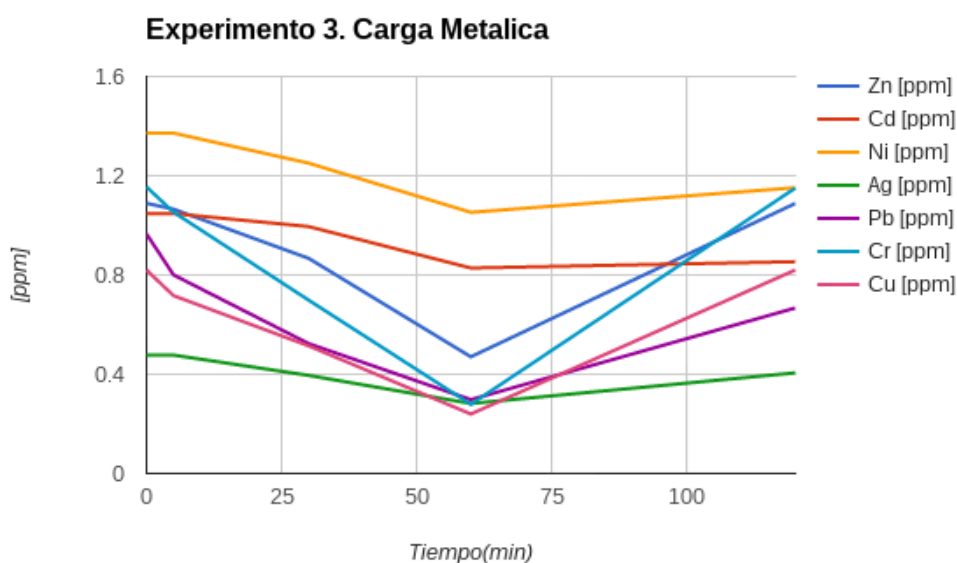


Tabla 8.9 Relación de constantes cinéticas obtenidas experimentalmente con respecto a las variables controladas en el ensayo #3.

Metal	K/3
Zn	-0.014
Pb	-0.019
Cd	-3.90 ⁻⁰³
Ni	-4.49 ⁻⁰³
Cu	-0.02
Ag	-8.92 ⁻⁰³
Cr	-0.023

(K) = mg de contaminante metálico eliminados / minuto



8.2.4 Experimento #4 Filtración con 7 g sílice amorfa a un pH 6.5

Se presentan a continuación las cargas másicas registradas de los iones Zn, Cu, Cd, Ni, Ag, Pb y Cr en 120 minutos de tratamiento de agua estándar preparada, a un pH de 6.5 empleando 7.0 gramos de sílice micro amorfa en el filtro.

Grafico 8.6 Comportamiento de la carga metálica en el experimento 4 a pH 7.0 con variación en la materia prima empleada

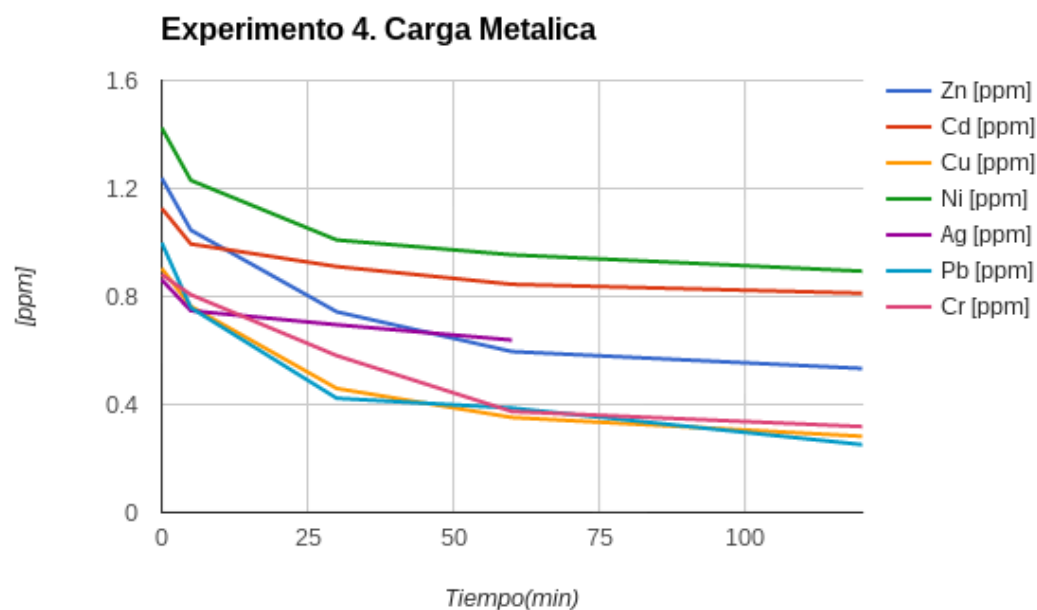


Tabla 8.10 Relación de constantes cinéticas obtenidas experimentalmente con respecto a las variables controladas en el ensayo #4

Metal	K/4
Zn	-5.43 ⁻⁰³
Pb	-8.61 ⁻⁰³
Cd	-4.15 ⁻⁰³
Ni	-2.45 ⁻⁰³
Cu	-7.97 ⁻⁰³
Ag	-4.20 ⁻⁰³
Cr	-7.96 ⁻⁰³

(K) = mg de contaminante metálico eliminados / minuto



8.2.5 Experimento #5 - Suspensión con 10 g sílice amorfa a un pH 6.5

Se presentan a continuación las cargas másicas registradas de los iones Zn, Cu, Cd, Ni, Ag, Pb y Cr en 120 minutos de tratamiento de agua estándar preparada, a un pH de 6.5 empleando una suspensión de 10 gramos de sílice micro amorfa en el filtro.

Grafico 8.7 Comportamiento de la carga metálica en el experimento 5 suspensión a pH = 7

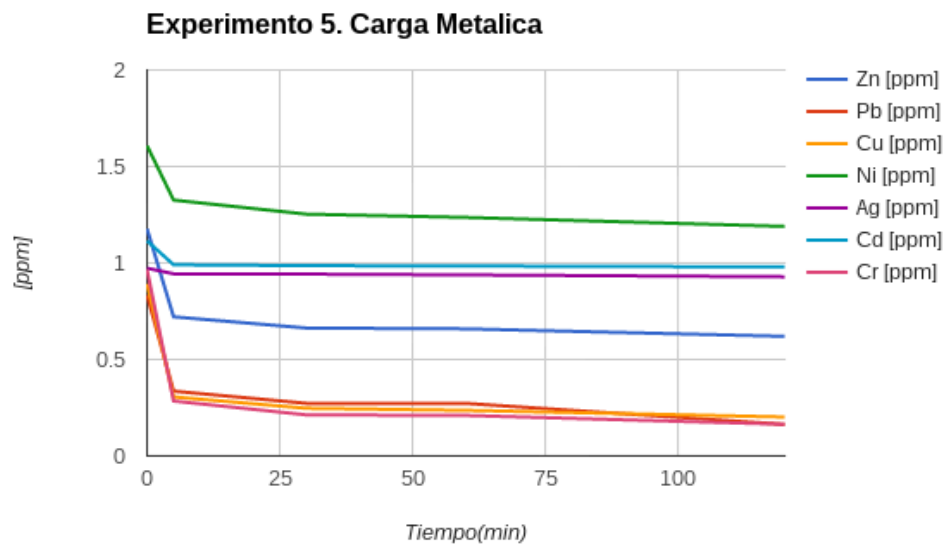


Tabla 8.11 Relación de constantes cinéticas obtenidas experimentalmente con respecto a las variables controladas en el ensayo #5

Metal	K/5
Zn	-3.42^{-03}
Pb	-9.84^{-03}
Cd	-6.18^{-04}
Ni	-1.76^{-03}
Cu	-8.22^{-03}
Ag	-2.74^{-04}
Cr	-9.94^{-03}

(K) = mg de contaminante metálico eliminados / minuto



8.2.6 Experimento #6 Filtración + Suspensión con 10 g sílice amorfa a un pH 6.5

Se presentan a continuación las cargas másicas registradas de los iones Zn, Cu, Cd, Ni, Ag, Pb y Cr en 120 minutos de tratamiento de agua estándar preparada, a un pH de 6.5 empleando una suspensión complementada con una filtración en soxhlet, sumando un total de 10 gramos de sílice micro amorfa empleada

Grafico 8.8 Comportamiento de la carga metálica en el experimento 6 a pH 7, suspensión + filtro con base plástica

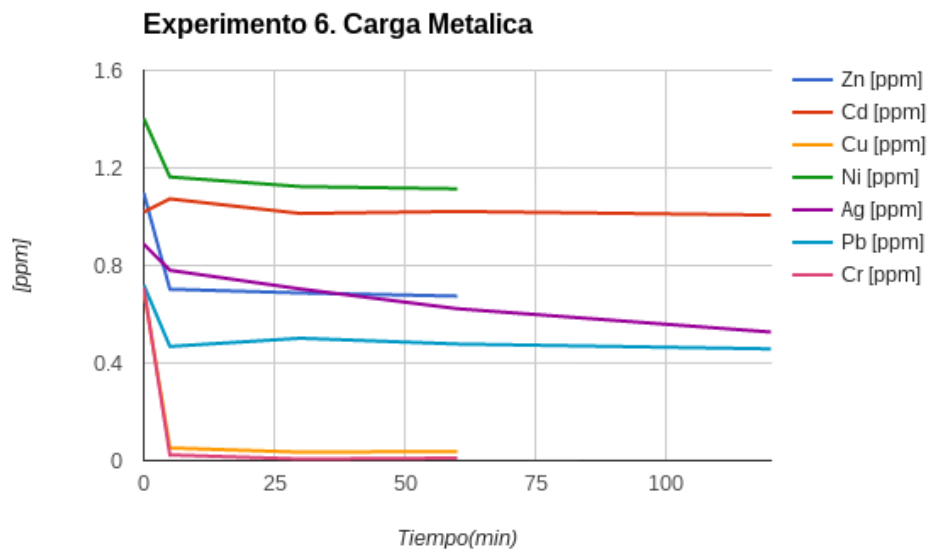


Tabla 8.12 Relación de constantes cinéticas obtenidas experimentalmente con respecto a las variables controladas en el ensayo #6

Metal	K/6
Zn	-7.44 ⁻⁰⁴
Pb	-3.98 ⁻⁰⁴
Cd	-4.05 ⁻⁰⁴
Ni	-7.60 ⁻⁰⁴
Cu	-5.63 ⁻⁰³
Ag	-3.95 ⁻⁰³
Cr	0.014

(K) = mg de contaminante metálico eliminados / minuto



8.2.7 Experimento #7 Filtración + Suspensión con 10 g sílice amorfa a un pH 6.5

Se presentan a continuación las cargas másicas registradas de los iones Zn, Cu, Cd, Ni, Ag, Pb y Cr en 120 minutos de tratamiento de agua estándar preparada, a un pH de 6.5 empleando una suspensión complementada con una filtración en soxhlet, sumando un total de 10 gramos de sílice micro amorfa empleada

Grafico 8.9 Comportamiento de la carga metálica en el experimento 7 a pH 7 / Tratamiento sinérgico

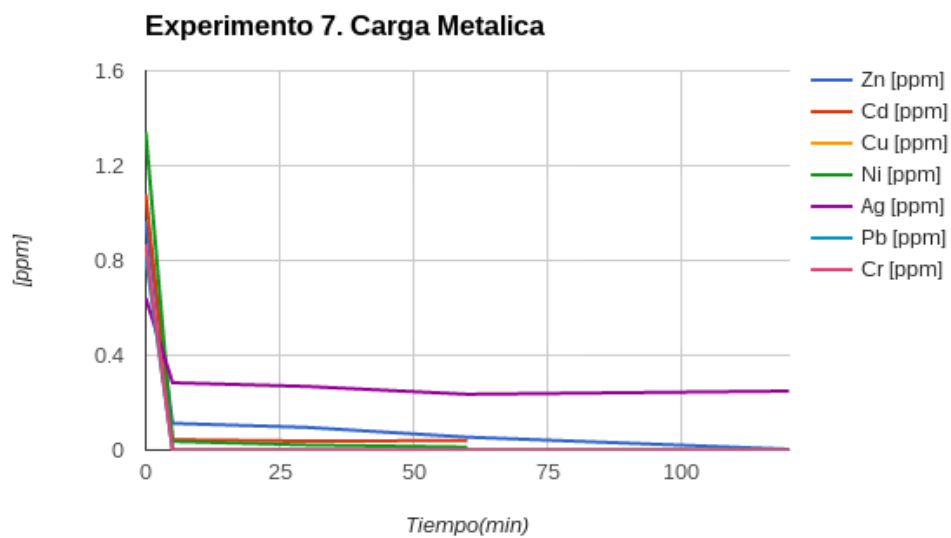


Tabla 8.13 Relación de constantes cinéticas obtenidas experimentalmente con respecto a las variables controladas en el ensayo #7

Metal	K/2
Zn	-0.031
Pb	ND*
Cd	-0.035
Ni	-0.02
Cu	ND*
Ag	-4.92 ⁻⁰³
Cr	ND*

(K) = mg de contaminante metálico eliminados / minuto

*ND = Concentración menor al límite de detección del método



Tabla 8.14 Concentrado de datos experimentales en ensayos con soluciones estándar

METAL	Tiempo	Experi- mento 1	Experi- mento 2	Experi- mento 3	Experi- mento 4	Experi- mento 5	Experi- mento 6	Experi- mento 7
Zn	0	1.4701	1.2462	1.0889	1.2388	1.1772	1.1	0.9645
	5	1.5216	0.5897	1.0653	1.0456	0.7211	0.7027	0.1128
	30	1.5558	0.5211	0.8671	0.7432	0.6629	0.6874	0.0959
	60	1.5704	0.5071	0.4702	0.596	0.6588	0.6744	0.0546
	120	1.5866	0.4917	1.0884	0.5334	0.62	-	<0.05
Pb	0	1.0999	0.9082	0.9656	0.9994	0.8339	0.7205	0.8199
	5	1.0315	0.4923	0.8004	0.7582	0.3359	0.468	< 0.1
	30	1.0564	0.4825	0.5234	0.423	0.2727	0.5017	< 0.1
	60	1.0705	0.4473	0.2977	0.3869	0.2724	0.4781	< 0.1
	120	1.0385	0.4753	0.667	0.2513	0.1639	0.4581	< 0.1
Cr	0	1.0773	1.0413	1.155	0.8811	0.9663	0.7105	0.8689
	5	1.0616	0.5544	1.0532	0.8066	0.2846	< 0.1	< 0.1
	30	1.0514	0.4886	0.6986	0.5809	0.2129	< 0.1	< 0.1
	60	1.0129	0.479	0.2788	0.374	0.21	< 0.1	< 0.1
	120	0.9915	0.4719	1.15	0.3182	0.1642	< 0.1	< 0.1
Ni	0	1.6855	1.4704	1.3719	1.4248	1.608	1.403	1.3409
	5	1.6191	0.7245	1.3719	1.2301	1.326	1.163	< 0.1
	30	1.5943	0.6169	1.2507	1.0092	1.2531	1.1235	< 0.1
	60	1.6133	0.6041	1.0525	0.9543	1.2361	1.1144	< 0.1
	120	1.6252	0.574	1.1517	0.8937	1.1896	-	< 0.1
Ag	0	0.3654	0.8728	0.4771	0.862	0.9732	0.8881	0.6416
	5	0.3901	0.5536	0.4771	0.7472	0.9439	0.7803	0.2842
	30	0.4722	0.4849	0.3953	0.6953	0.9424	0.7036	0.2685
	60	0.5064	0.469	0.282	0.6386	0.9383	0.6228	0.2356
	120	0.4488	0.4751	0.4055	-	0.9286	0.5271	0.249
Cu	0	1.0774	0.9754	0.82	0.9041	0.8922	0.701	0.8368
	5	1.0543	0.5373	0.7168	0.7634	0.3059	< 0.1	< 0.1
	30	1.0611	0.5032	0.5142	0.4593	0.247	< 0.1	< 0.1
	60	1.0652	0.4884	0.2396	0.3519	0.2365	< 0.1	< 0.1
	120	1.0646	0.4727	0.82	0.2822	0.2019	< 0.1	< 0.1
Cd	0	1.2461	1.0931	1.0474	1.1269	1.1147	1.0192	1.0809
	5	1.2165	0.5678	1.0474	0.9944	0.9908	1.0732	< 0.05
	30	1.2043	0.5164	0.9952	0.9108	0.9863	1.0131	< 0.05
	60	1.2135	0.4988	0.8281	0.8451	0.9844	1.0216	< 0.05
	120	1.2285	0.4757	0.8536	0.8121	0.9797	1.0066	< 0.05

Límites de Detección correspondientes:

Zn, Cd: 0.05 ppm.

Cu, Ag, Ni, Cr, Pb: 0.1 ppm



8.2.8 Presentación de resultados correspondientes a la experimentación con agua industrial

Dentro de esta sección se presentan los resultados obtenidos tras el análisis de las muestras obtenidas a lo largo de tratamiento de una muestra real tomada en un proceso industrial de galvanizado, es importante hacer notar que se efectuó un barrido general de la composición de la muestra, comenzando con carga sólida, carga inorgánica- orgánica y contenido metálico, estudiando el comportamiento de dichas cargas contaminantes a lo largo del tratamiento regenerador.

8.2.8.1 Caracterización general – solida de muestras obtenidas durante el tratamiento del efluente de una empresa galvanizadora

Es la caracterización general – solida la que nos brinda información valiosa en relación al rango de contaminantes al cual el tratamiento de regeneración aun es efectivo, puesto que dentro de esta sección se pretende evaluar el efecto de la matriz en la eficiencia del proceso. Se presentan los resultados obtenidos de pH, Turbidez, solidos suspendidos y solidos disueltos totales a lo largo de 120 minutos que duró el ensayo experimental.

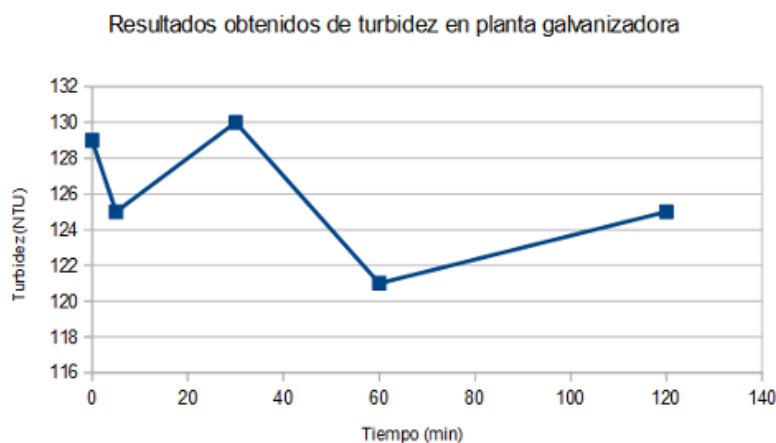
Tabla 8.15 Resultados obtenidos de pH a lo largo de etapa experimental con agua real

Muestras	Turbidez (NTU)
GALT t=0	129
GALT t=5	125
GALT t=30	130
GALT t=60	121
GALT t=120	125

Muestras	pH
GALT t=0	7.21
GALT t=5	7.19
GALT t=30	7.2
GALT t=60	7.22
GALT t=120	7.2

Tabla 8.16 Resultados obtenidos de turbidez a lo largo de etapa experimental con agua real

Grafico 8.10 Resultados de turbidez obtenidos en el tratamiento de agua de una planta galvanizadora





Muestra	mg/L
BLK	-2
GALT $t=0$	318
GALT $t=5$	764
GALT $t=30$	626
GALT $t=60$	620
GALT $t=120$	534

Tabla 8.17 Resultados de los sólidos suspendidos de muestras a través del tiempo durante el periodo operacional

Tabla 8.18 Resultados de los sólidos suspendidos de muestras a través del tiempo durante el periodo post - operacional

Muestras	mg/L
BLK	-2
GALT $t=0$	410
GALT $t=5$	283
GALT $t=30$	257
GALT $t=60$	237
GALT $t=120$	294

Muestras	mg/L
GALT $t=0$	23694
GALT $t=5$	23100
GALT $t=30$	22690
GALT $t=60$	23198
GALT $t=120$	22926

Tabla 8.19 Resultado de los sólidos disueltos de muestras a través del tiempo durante el periodo operacional

8.2.8.2 Caracterización metálica de muestras obtenidas durante el tratamiento del efluente de una empresa galvanizadora.

Se presentan a continuación en el grafico 12.9 y en la tabla 12.14 las cargas másicas registradas de los iones Zn, Cu, Ni en 120 minutos de tratamiento de agua real, proveniente de un proceso industrial a un pH de 7.21 empleando una suspensión complementada con una filtración en soxhlet, sumando un total de 10 gramos de sílice micro amorfa empleada. Cabe destacarse que los iones metálicos Cd, Ag, Pb y Cr no fueron detectados en la muestra.



Gráfico 8.11 Comportamiento de la carga metálica para muestras tomadas en una empresa galvanizadora con un sistema de filtración - suspensión a un pH de 7.21

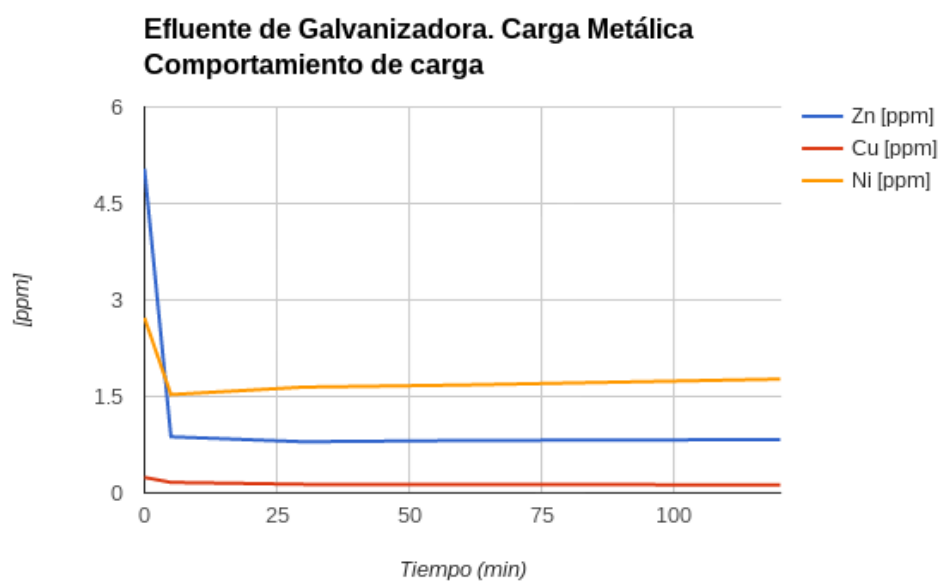


Tabla 8.20 Tabla de resultados para muestras tomadas en una empresa galvanizadora

Tiempo (min)	Zn [ppm]	Cu [ppm]	Ni [ppm]
0	5.0422	0.242	2.7223
5	0.8735	0.1641	1.5294
30	0.7959	0.1348	1.6453
60	0.8155	0.1317	1.68
120	0.8297	0.126	1.77

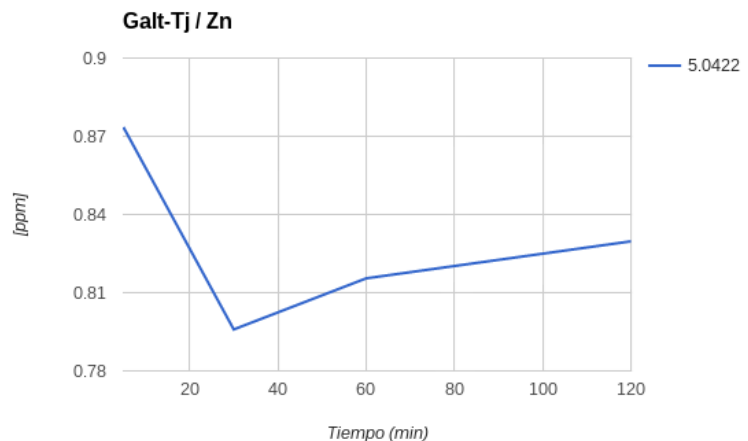
*Los metales Cd, Ag, Pb, Cr no fueron detectados



8.2.8.2.1 Tratamiento de agua industrial / Zinc

El grafico 12.10 presenta la remoción de ion Zinc a lo largo de 120 minutos de tratamiento para una muestra tomada de un efluente industrial de galvanizado, es importante apreciar la rápida disminución de la carga metálica en los primeros minutos de tratamiento; siendo la constante de remoción metálica de 8.19 miligramos de Zinc retenidos en la matriz sílicea por minuto de tratamiento.

Grafico 8.12 Remoción de carga de zinc en relación a tiempo de tratamiento en escala lineal

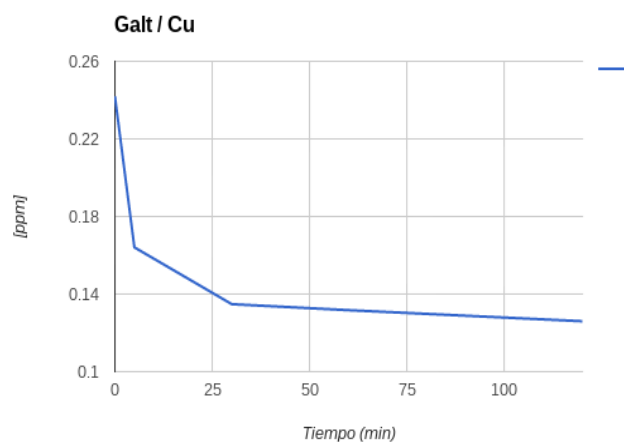


*Constante de remoción metálica: -8.192 E-3

8.2.8.2.2 Tratamiento de agua industrial / Cobre

El grafico 12.11 presenta la remoción de ion Cobre a lo largo de 120 minutos de tratamiento para una muestra tomada de un efluente industrial de galvanizado, es importante apreciar la rápida disminución de la carga metálica en los primeros minutos de tratamiento; siendo la constante de remoción metálica de 3.95 miligramos de Cobre retenidos en la matriz sílicea por minuto de tratamiento.

Grafico 8.13 Remoción de carga de cobre en relación a tiempo de tratamiento en escala lineal



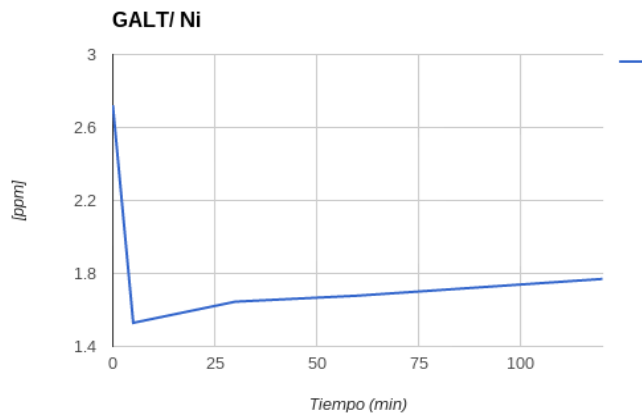
*Constante de remoción metálica: -3.949 E-3



8.2.8.2.3 Tratamiento de agua industrial / Níquel

El grafico 12.12 presenta la remoción de ion Níquel a lo largo de 120 minutos de tratamiento para una muestra tomada de un efluente industrial de galvanizado, es importante apreciar la rápida disminución de la carga metálica en los primeros minutos de tratamiento; siendo la constante de remoción metálica de 1.33 miligramos de Níquel retenidos en la matriz sílicea por minuto de tratamiento.

Grafico 8.14 Remoción de carga de níquel en relación a tiempo de tratamiento en escala lineal



*Constante de remoción metálica: $-1.334 \text{ E } -3$

8.2.8.3 Caracterización de cargas orgánicas e inorgánicas de muestras obtenidas durante el tratamiento del efluente de una empresa galvanizadora

Es la caracterización de cargas orgánicas e inorgánicas la que nos brinda información valiosa en relación al rango de contaminantes al cual el tratamiento de regeneración aun es efectivo, puesto que dentro de esta sección se pretende evaluar el efecto de la matriz en la eficiencia del proceso. Se presentan los resultados obtenidos de DQO, y sílice disuelta a lo largo de 120 minutos que duró el ensayo experimental.



8.2.8.3.1 Tratamiento de agua industrial / Determinación de demanda química de oxígeno (DQO)

Tabla 8.21 Relación absorbancia - concentración

Concentración [ppm]	ABS
25	0.018
50	0.023
100	0.043
200	0.07
300	0.108
500	0.184

Grafico 8.15 Curva de calibración para DQO en agua. Método 5200-COD. D Standard Methods of wastewater



Tabla 8.22 Resultados expresados en miligramos por litro de demanda química de oxígeno en las muestras industriales provenientes de una galvanizadora.

Muestras	ABS	Resultado [ppm]
GALT $t=0$	0.301	845
GALT $t=5$	0.272	762
GALT $t=30$	0.269	753
GALT $t=60$	0.269	753
GALT $t=120$	0.06	724



8.2.8.3.2 Tratamiento de agua industrial / Determinación de sílice disuelta

Cabe destacar que la determinación de la sílice disuelta a lo largo de tratamiento del efluente industrial, posee como fin asegurar que la sílice mico amorfa contenida en el filtro y en la suspensión del sistema de tratamiento no se está solubilizando, puesto que esto indicaría que el efluente a regenerar está siendo contaminado, es por eso que es en la tabla 12.17 en donde se presentan los Resultados expresados en miligramos por litro de sílice disuelta en las muestras industriales provenientes de una galvanizadora.

Grafico 8.16 Curva de calibración para sílica en agua. Método 4500-Si. D Standard Methods of wastewater



STD	ABS
0.1	0.031
0.5	0.158
1	0.308
2	0.621
4	1.192
5	1.42

Tabla 8.23 Relación absorbancia - concentración

Tabla 8.24 Resultados expresados en miligramos por litro de sílice disuelta en las muestras industriales provenientes de una galvanizadora.

GALT	ABS	Resultado [ppm]
GALT t=0	0.003	<0.1
GALT t=5	0.005	<0.1
GALT t=30	0.006	<0.1
GALT t=60	0.005	<0.1
GALT t=120	0.003	<0.1



8.9 Tratamiento de datos experimentales

Esta sección está destinada a trabajar matemáticamente con los resultados obtenidos a lo largo de las sesiones experimentales para facilitar de esta forma a la interpretación de resultados.

8.9.1 Tratamiento de resultados correspondientes a la primera parte experimental: Fase con muestras sintéticas

Cabe destacar que la mayor parte de los tratamientos de resultados de esta sección se enfocan a indicar los porcentajes de remoción obtenidos para cada uno de los iones metálicos acorde al ajuste de las condiciones experimentales de muestras sintéticas preparadas. Para de esta forma determinar de manera sencilla y rápida cuales son las condiciones que favorecen en mayor proporción la remoción de carga metálica.

Tabla 8.25 Porcentaje másico de remoción de carga metálica en experimento 1.

Metales	Zn [ppm]	Cu [ppm]	Cd [ppm]	Ni [ppm]	Ag [ppm]	Pb [ppm]	Cr [ppm]
Inicial	1.4701	1.0774	1.2461	1.6855	0.3654	1.0999	1.0773
Final	1.5866	1.0646	1.2285	1.6252	0.4488	1.0385	0.9915
% Remoción	-7.92	1.19	1.41	3.58	-22.82	5.58	7.96

Gráfico 8.17 Porcentaje másico de remoción de carga metálica en el experimento 1

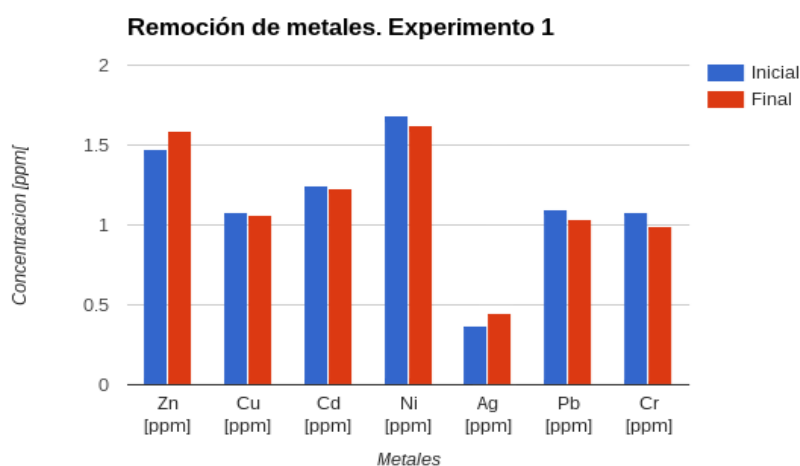




Tabla 8.26 Porcentaje másico de remoción de carga metálica en experimento 2.

Metales	Zn [ppm]	Cd [ppm]	Cu [ppm]	Ni [ppm]	Ag [ppm]	Pb [ppm]	Cr [ppm]
Inicial	1.2462	1.0931	0.9754	1.4704	0.8728	0.9082	1.0413
Final	0.4917	0.4757	0.4727	0.574	0.4751	0.4753	0.4719
% Remoción	60.54	56.48	51.54	60.97	45.57	47.67	54.68

Grafico 8.18

Porcentaje másico de remoción de carga metálica en experimento 2

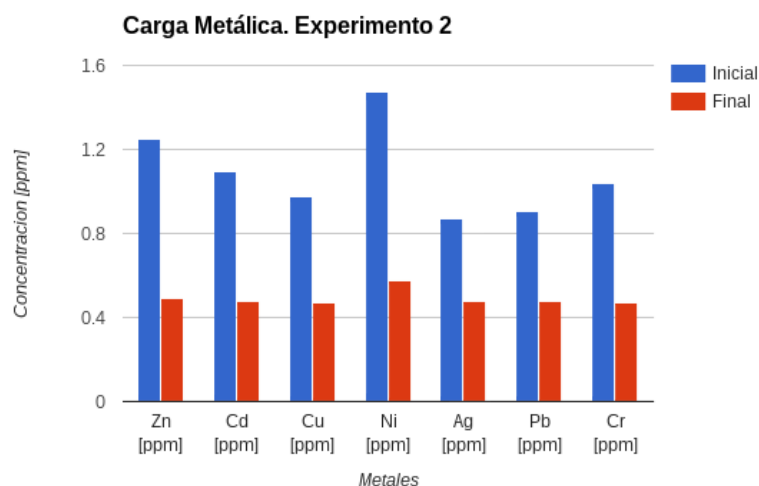


Tabla 8.27 Porcentaje másico de remoción de carga metálica en experimento 3.

Metales	Zn [ppm]	Cd [ppm]	Ni [ppm]	Ag [ppm]	Pb [ppm]	Cr [ppm]	Cu [ppm]
Inicial	1.0889	1.0474	1.3719	0.4771	0.9656	1.155	0.82
Final	1.0884	0.8536	1.1517	0.4055	0.667	1.15	0.2396
% Remoción	0.05	18.5	16.05	15.01	30.92	0.43	70.78



Grafico 8.19 Porcentaje máximo de remoción de carga metálica en el experimento 3.

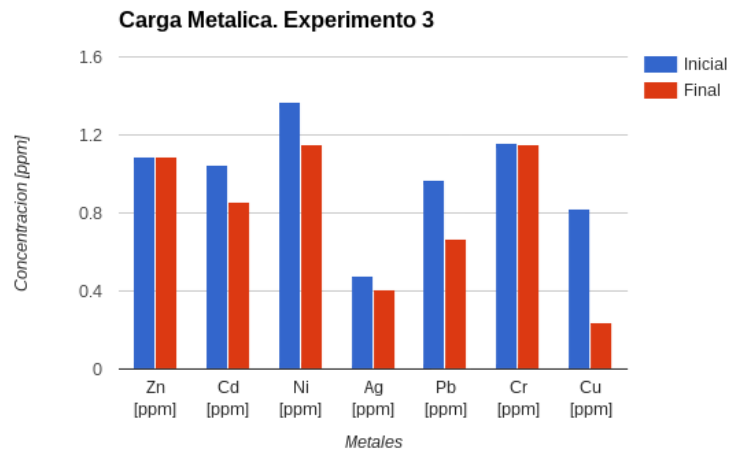


Tabla 8.28 Porcentaje máximo de remoción de carga metálica en experimento 4.

Metales	Zn [ppm]	Cd [ppm]	Cu [ppm]	Ni [ppm]	Ag [ppm]	Pb [ppm]	Cr [ppm]
Inicial	1.2388	1.1269	0.9041	1.4248	0.862	0.9994	0.8811
Final	0.5334	0.8121	0.2822	0.8937	0.6386	0.2513	0.3182
% Remoción	56.94	27.94	68.79	37.27	25.92	74.85	63.88

Grafico 8.20
Porcentaje máximo de remoción de carga metálica en el experimento 4.

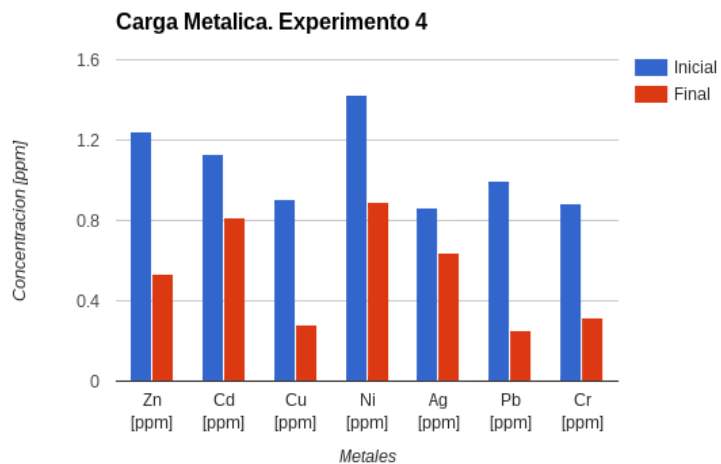


Tabla 8.29 Porcentaje máximo de remoción de carga metálica en experimento 5

Metales	Zn [ppm]	Pb [ppm]	Cu [ppm]	Ni [ppm]	Ag [ppm]	Cd [ppm]	Cr [ppm]
Inicial	1.1772	0.8339	0.8922	1.608	0.9732	1.1147	0.9663
Final	0.62	0.1639	0.2019	1.1896	0.9286	0.9797	0.1642
% Remoción	47.33	80.34	77.37	26.01	4.58	12.11	83



Grafico 8.21 Porcentaje másico de remoción de carga metálica en experimento 5

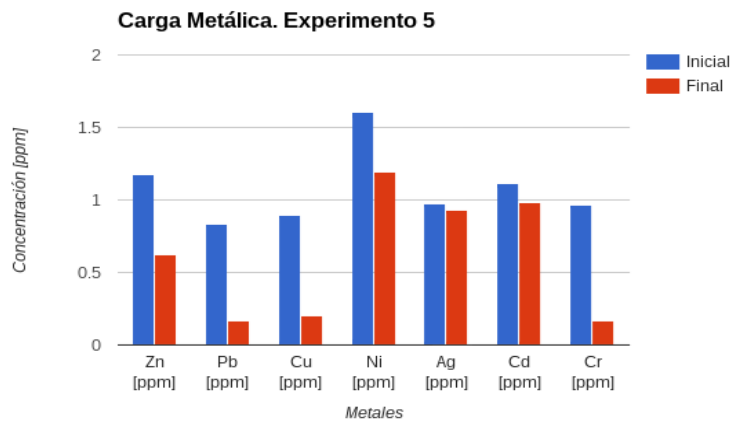


Tabla 8.30 Porcentaje másico de remoción de carga metálica en experimento 6.

Metales	Zn [ppm]	Cd [ppm]	Cu [ppm]	Ni [ppm]	Ag [ppm]	Pb [ppm]	Cr [ppm]
Inicial	1.0966	1.0192	0.701	1.403	0.8881	0.7205	0.7105
Final	0.6744	1.0066	0.0375	1.1144	0.5271	0.4581	0.0104
% Remoción	38.5	1.24	94.65	20.57	40.65	36.42	98.53

Grafico 8.22 Porcentaje másico de remoción de carga metálica en experimento 6.

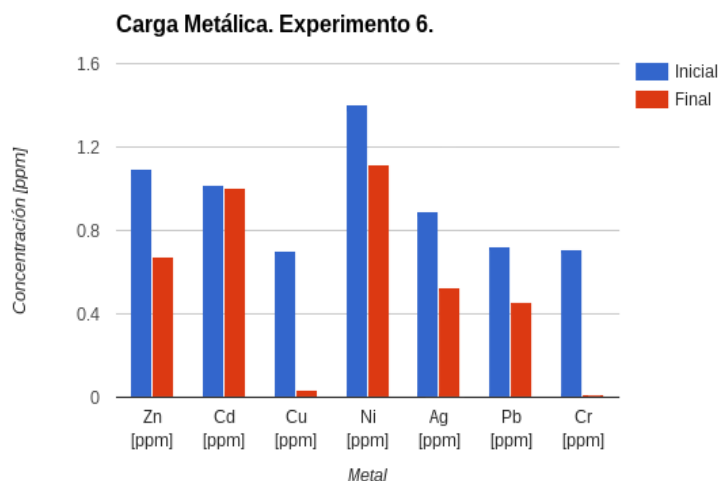
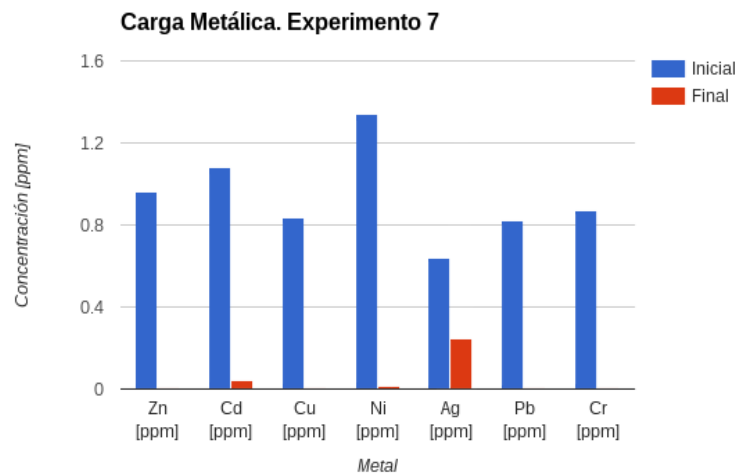


Tabla 8.31 Porcentaje másico de remoción de carga metálica en experimento 7.

Metales	Zn [ppm]	Cd [ppm]	Cu [ppm]	Ni [ppm]	Ag [ppm]	Pb [ppm]	Cr [ppm]
Inicial	0.9645	1.0809	0.8368	1.3409	0.6416	0.8199	0.8689
Final	0.0036	0.0402	0	0.0125	0.249	0	0
% Remoción	99.63	96.28	100	99.07	61.19	100	100



Grafico 8.23 Porcentaje másico de remoción de carga metálica en el experimento 7.



Por otra parte también se destaca que el tratamiento exponencial de los resultados obtenidos brinda un valor fundamental para la interpretación de resultados, puesto que son las constantes cinéticas las que indican cuantos miligramos de contaminante son retenidos en la superficie de la matriz silícea por minuto, a continuación en la tabla 8.32 se presenta la relación de las constantes cinéticas obtenidas experimentalmente con respecto a las variables controladas.



Tabla 8.32 Relación de constantes cinéticas obtenidas experimentalmente con respecto a las variables controladas

Metal	K/Exp1	K/Exp2	K/Exp3	K/Exp4	K/Exp5	K/Exp6	K/Exp7
Zn	1,19E-03	-4,87E-03	-0,014	-5,43E-03	-3,42E-03	-7,44E-04	-3,10E-02
Pb	-1,98E-04	-3,14E-03	-0,019	-8,61E-03	-9,84E-03	-3,98E-04	-1.00266*
Cd	-1,95E-05	-4,42E-03	-3,90E-03	-4,15E-03	-6,18E-04	-4,05E-04	-3,50E-02
Ni	-1,34E-04	-5,10E-03	-4,49E-03	-2,45E-03	-1,76E-03	-7,60E-04	-2,00E-02
Cu	-9,51E-06	-3,75E-03	-0,02	-7,97E-03	-8,22E-03	-5,63E-03	-1.0027*
Ag	1,61E-03	-3,35E-03	-8,92E-03	-4,20E-03	-2,74E-04	-3,95E-03	-4,92E-03
Cr	-6,78E-04	-4,17E-03	-0,023	-7,96E-03	-9,94E-03	0,014	-1.00278*

NOTA: (K) = mg de Contaminante eliminados / minuto

***Eliminación por completo del analito

K (-) : Eliminación de contaminantes del sistema acuoso con respecto al tiempo

K(+) : La concentración de contaminantes se mantiene constante con respecto al paso del tiempo

Tabla 8.32.a Relación de los experimentos realizados con respecto a las variables controladas

Experimento	pH	SiO ₂ (g)	T (°C)	Método
K/ 1	2.63	10.0098	25	Filtración con sílice amorfa
K/ 2	10.65	10.0098	25	Filtración con sílice amorfa
K/ 3	6.5	10.0466	25	Filtración con sílice amorfa
K/ 4	6.5	7.1742	25	Filtración con sílice amorfa
K/ 5	6.53	10.1807	25	Suspensión de sílice
K/ 6	6.56	10.2387	25	Filtración + Suspensión Sílice amorfa
K/ 7	6.56	10.0981	25	Filtración + Suspensión Sílice amorfa

8.9.2 Tratamiento de resultados correspondientes a la segunda parte experimental: Fase con muestras reales

Cabe destacar que la mayor parte de los tratamientos de resultados de esta sección se enfocan a indicar los porcentajes de remoción obtenidos para cada uno de los iones metálicos detectados en una muestra real tomada de un efluente industrial acorde al ajuste de las condiciones experimentales. Mediante dicho



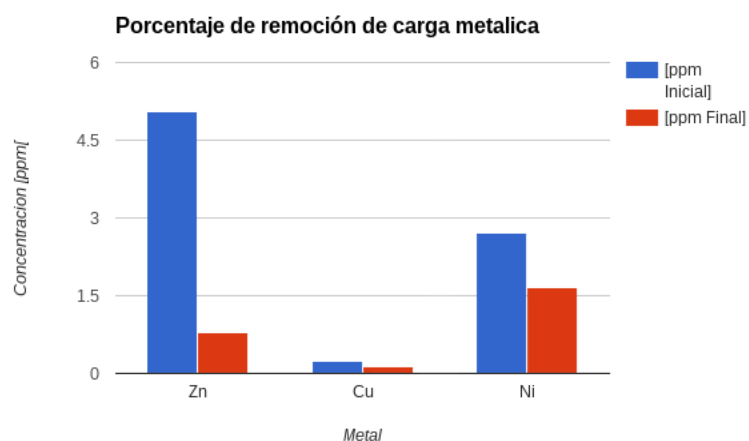
tratamiento de resultados se determinar de manera sencilla y rápida cuales son las condiciones que favorecen en mayor proporción la remoción de carga metálica.

Tabla 8.33 Porcentajes de remoción de contenido metálico en efluente industrial.

Metal	[ppm Inicial]	[ppm Final]	%Remoción
Zn	5.0422	0.7959	84.22
Pb	<0.2	<0.2	NA
Cd	<0.05	<0.05	NA
Ag	<0.1	<0.1	NA
Cu	0.242	0.126	47.93
Ni	2.7223	1.6453	39.56
Cr	<0.2	<0.2	NA

*NA: No aplica puesto que el metal en cuestión no fue detectado en la muestra inicial

Grafico 8.24
Porcentajes de
remoción de
contenido metálico en
efluente industrial.





9. Interpretación de resultados

Esta sección está destinada a determinar los factores que en conjunto favorecen significativamente la eficiencia del tratamiento de agua residual industrial propuesto; para ello cabe recordar que el tratamiento de datos en el apartado anterior brinda valores que resultan cruciales para realizar el análisis de las variables evaluadas en cada uno de los ensayos experimentales lo que se traduce en determinar si el tratamiento propuesto resulta rentable o no acorde a los objetivos establecidos, dichos valores son: el porcentaje de remoción así como también las constantes de eliminación de carga metálica.

La primera variable a tomar en cuenta es el diseño del sistema de tratamiento, puesto que esta influye directamente en el contacto entre las muestras acuosas y la materia prima seleccionada; por lo tanto, dentro de este punto es importante definir las metodologías seleccionadas para llevar a cabo la etapa experimental.

Ahora bien, fijando un criterio en donde las eficiencias de remoción de metales con respecto al tiempo de tratamiento se seleccionaron como los principales puntos a evaluar; se decidió realizar la evaluación de una metodología basada de filtración de la muestra vía soxhlet donde es colocada la materia prima y por otra parte la eficiencia con la que puede contar una suspensión de la sílice micro amorfa en la muestra la cual constituye también otra metodología de tratamiento.

Así como también dentro de esta sección se realiza una interpretación de los resultados obtenidos de un sistema conjunto de las dos metodologías mencionadas anteriormente a fin de demostrar o bien descartar la posibilidad de tener un efecto sinérgico al realizar un sistema híbrido entre los dos sistemas de tratamiento; finalmente es también importante recordar que tal y como se mencionó en la sección 9.5.2 los prototipos basados en un embudo abierto y columna empacada poseen tiempos de filtración muy altos con lo que limita la rentabilidad de establecer un proceso de tratamiento.

Por otra parte, se encuentra el potencial de hidrógeno (pH) de la muestra a tratar como una variable crítica para la obtención de resultados, el efecto del pH en la estabilidad de metales en fase acuosa se encuentra especificado en la sección 7.5. Puesto que se sabe que entre mayor sea el valor del pH en una solución la estabilidad metálica será menor puesto a que se tienden a formar los hidróxidos de los metales disueltos; como por ejemplo en el caso de la plata tal y como se cita



en la tabla 7.1 de la sección 7.5.2, el valor del producto de solubilidad de este metal es de $1 \cdot 10^{-10}$, lo que significa que este valor representa la cantidad másica de plata que puede estar en solución antes de precipitar.

Por lo tanto, es posible pensar que la mayor eficiencia del tratamiento se dará a un pH elevado por vía precipitación de hidróxidos de metálicos, recordando la estructura de la sílice micro amorfa citada en la sección 9.3 del apartado 9.3.1.1; esta materia prima contiene una significativa cantidad de enlaces hidróxidos al ponerse en solución y alterar el pH de la solución y con ello forzar la precipitación de los iones metálicos en las muestras.

Sin embargo, dentro de la caracterización de la materia prima presentada en la sección 11; se muestra un valor de potencial de hidrógeno de 7 (neutro) correspondiente a la saturación acuosa de la sílice micro amorfa, lo que nos indica que los hidróxidos contenidos en la estructura amorfa de la sílice no se transfieren por disociación a solución. Por lo que la posible teoría de lograr la precipitación metálica únicamente por medio del desprendimiento de iones hidroxilo provenientes de la materia prima quedó descartada.

Tal y como se mencionó anteriormente en la sección 7.5 la estabilidad del equilibrio químico de los metales en solución depende estrechamente de un número específico de variables dentro de las cuales destaca el potencial de hidrógeno; Hay que recordar que con el fin de contar con los resultados más claros posibles de la influencia de las variables sobre el tratamiento establecido se optó por trabajar con muestras sintéticas preparadas en el laboratorio para así manejarse como una constante la matriz en la que el tratamiento es efectivo.

Así pues, los resultados de los primeros tres ensayos de la fase experimental presentados en la sección anterior, indican la enorme diferencia que representa la variación del pH para la eficiencia del sistema de tratamiento.

Ya que por ejemplo en la gráfica 12.8 referente al comportamiento de la carga metálica en el sistema de tratamiento a un pH de 2; se denota que la concentración para cada uno de los metales evaluados en este ensayo es constante a lo largo de un periodo de 120 minutos, a pesar de que la experimentación fue realizada con el diseño de tratamiento (sistema soxhlet) que asegura el mejor contacto de la sílice micro amorfa con la muestra a tratar.

Citando por ejemplo el caso específico del Níquel en donde la concentración inicial al minuto 0 era de 1.6855 miligramos por litro y la concentración final al minuto 120 era de 1.6252; con una constante de eliminación de analito correspondiente a 0.000134 miligramos de níquel eliminados por cada



minuto de exposición en el sistema de tratamiento, es decir que para eliminar un miligramo de este metal bajo las condiciones estipuladas tomaría un periodo de 124 horas lo cual para fines prácticos no resulta rentable.

El mismo caso sucede con el cobre el cual tiene una constante de eliminación de 0.00000951 miligramos de analito removidos por cada minuto de tratamiento; esto es equivalente a un tratamiento de 1753 horas para eliminar únicamente un miligramo de cobre, lo cual indica de manera clara que la variable establecida de un pH con un valor de 2.

Se traduce en un tratamiento poco efectivo para la remoción de metales. Ya que tal y como muestra la gráfica 12.62 correspondiente a el porcentaje másico de remoción de carga metálica en experimento 1, las concentraciones iniciales y finales para cada uno de los siete metales evaluados en este ensayo experimental son prácticamente las mismas; por lo que los porcentajes de remoción metálica no rebasan el 10% masa/masa.

La explicación a estos resultados residen en la tendencia de los metales a aumentar su solubilidad en medios ácidos es decir a potenciales de hidrogeno menores de un valor de 7.0; por lo que el mecanismo de tratamiento basando en la retención de los metales en la superficie activa de la sílice micro amorfa (con grupos funcionales hidroxilos) queda obstruido por la alta solubilidad del metal en cuestión.

A modo de ejemplo consideremos una cantidad específica de iones zinc en agua des ionizada, por lo cual los únicos iones presentes en la solución serán hidroxilos(OH⁻), hidronios (H⁺) y los iones zinc (Zn⁺²), cabe destacar que el producto de solubilidad del hidróxido de zinc [Zn(OH)₂] es de 1.8×10^{-14} acorde a la tabla presentada en la sección 7.5.2.

Este valor representa la cantidad máxima de moles de zinc en solución acuosa, mientras que por otra parte 3.6×10^{-14} es la cantidad de moles que se requieren de ion OH⁻ para mantener en equilibrio acuoso al zinc, por lo que cualquier incremento másico con respecto a los valores antes mencionados representa un factor directo para que el zinc metálico comienza a precipitar en forma de hidróxido.

Por ende, en el ensayo experimental realizado en donde el pH es menor a un valor de 7; la actividad de los iones hidroxilo tiende a disminuir puesto a que la de los protones aumenta significativamente lo que conduce a que la tendencia a generar hidróxidos de zinc en medio acuoso o bien en la superficie de la materia prima se disminuya significativamente; lo que conduce a explicar la baja efectividad del sistema de tratamiento estipulado dentro de esta experimentación.



Puesto que la solubilidad metálica es favorecida por los valores bajos de pH, se decidió llevar a cabo en la segunda experimentación un ensayo que enfoca el esfuerzo en proveer al sistema de tratamiento la ventaja de desestabilizar la solubilidad de los iones metálicos en solución al máximo.

Es decir, incrementar significativamente el valor del pH en la muestra con el objetivo de incrementar exponencialmente la actividad de los iones hidroxilo con lo que se abre la posibilidad de precipitar los hidróxidos metálicos, recordando que los valores de los productos de solubilidad para metales como la plata, el zinc, el plomo y el níquel son considerablemente bajos.

Por lo tanto en esta segunda experimentación se modifica la variable del potencial de hidrógeno de la muestra a tratar, incrementando dicho factor a un valor de 10; tal y como se muestra en la gráfica 12.8 correspondiente al comportamiento de la carga metálica en relación al tiempo de tratamiento en el experimento #2; la concentración de iones metálicos en la muestra disminuye aproximadamente a la mitad de la carga másica en los primeros 5 minutos de exposición al sistema de tratamiento prosiguiendo a esto una estabilización de la remoción metálica.

Ya que se puede observar que a partir de los 25 minutos de tratamiento hasta los 120 minutos la concentración de los metales en estudio es constante o bien disminuye muy poco.

A modo de ejemplo se cita el caso del cadmio cuya concentración inicial a los 0 minutos fue de 1.0931 miligramos por litro; después de 5 minutos de exposición a tratamiento 0.5678 miligramos por litro lo que equivale casi a una eliminación del 50% de la carga másica; posterior a esto la concentración de cadmio en la muestra en tratamiento únicamente disminuye a 0.4757 miligramos por litro a los 120 minutos de exposición al sistema. Cabe destacar que los porcentajes de remoción de los siete metales puestos a prueba para dicha experimentación van desde 45 - 60%, lo que indica claramente que la variable del pH sí influye significativamente en la eficacia del tratamiento.

Por otra parte es fundamental prestar especial atención a las constantes de eliminación de la carga metálica ya que en contraste a la experimentación #1 en donde se tenía un rango de valores de constantes desde 1×10^{-4} hasta 1×10^{-6} , al adecuar la muestra a tratar a un valor de pH de 10, la eficiencia del sistema aumenta a valores del orden de 1×10^{-3} ; al fin de comprender con mayor profundidad lo anteriormente afirmado consideremos el caso del cadmio, el cual tiene una constante de remoción de 0.0000195 miligramos de analito por minuto de



tratamiento para el caso del experimento #1 a un pH de 2, a diferencia del experimento #2 en donde el potencial de hidrógeno fue incrementado cinco veces y la constante de eliminación de cadmio fue de 0.00442 miligramos de analito por minuto.

Quizá los valores citados anteriormente no son tan claros o sencillos de interpretar y percibir la gran diferencia que representan estos resultados para la rentabilidad del proyecto, puesto que bajo las condiciones citadas en la primera experimentación se requieren 855 horas para eliminar un miligramo de cadmio; a diferencia de la experimentación 2 en donde el simple hecho de ajustar el pH de la muestra permite eliminar un miligramo de dicho analito en un tiempo de 3.77 horas, sigue sin ser un tratamiento rentable más se puede apreciar que la diferencia en los tiempos de tratamiento de los metales son muy grandes puesto que el tiempo requerido para eliminar un miligramo de cadmio bajo las condiciones seleccionadas en la experimentación #1 es aproximadamente 227 veces mayor, al obtenido bajo las condiciones estipuladas en la segunda experimentación.

Por otra parte se hace necesario hacer énfasis en el mecanismo de tratamiento que se está siguiendo dentro de esta experimentación; puesto que retomando lo estipulado bajo los objetivos del proyecto realizado lo que se pretende es encontrar los factores que favorezcan de manera significativa la remoción de metales del medio acuoso por medio de la retención en la matriz sólida de la sílice micro amorfa, de modo que lo que se busca es ajustar las variables adecuadas para facilitar un enlace entre los grupos hidroxilos pertenecientes a la materia prima y los iones metálicos.

Sin embargo, dentro de este ensayo experimental la modificación drástica del potencial de hidrógeno a un valor mayor de 9.0 conduce a una precipitación casi instantánea de los metales en forma de hidróxidos, lo que explica el comportamiento de la carga metálica citado en la gráfica 12.8, en donde se muestra de manera clara, el rápido decrecimiento de la concentración de los metales en cuestión.

Por lo tanto la hipótesis del mecanismo de acción para la remoción de metales dentro de los parámetros y factores estipulados dentro de este ensayo experimental radica en la formación rápida de los hidróxidos metálicos al tener en su máxima desestabilización los iones de zinc, plata, cobre, plomo etc.; consecuencia de esto es que las sales ya insolubles son acarreadas por el sistema y se anclan o bien se retienen por obstrucción en la sílice micro amorfa



Muy por el contrario lo que se cree que está pasando no es propiamente dicha una reacción de acoplamiento-retención entre los grupos funcionales de la sílice micro amorfa y los metales en la muestra sí no sencillamente una reacción de precipitación en donde la sílice micro amorfa puede que contribuya en cierta medida más la remoción metálica sin embargo la remoción metálica para este caso se encuentra basada principalmente en la sedimentación de los hidróxidos o bien en la retención por obstrucción en el material filtrante.

Por dichas razones se prosiguió dentro de la etapa experimental a buscar los factores que forjen una remoción metálica basada en la retención de los iones en la superficie estructural del material filtrante; hay que recordar que nos encontramos evaluando la variable del potencial de hidrógeno y que ya dentro de ensayos experimentales ya fue puesto a prueba el sistema de tratamiento en medios ácidos y alcalinos; por lo tanto, es el pH neutro la única variable que resta por evaluar.

Dentro de las experimentaciones #3 y #4 el potencial de hidrógeno establecido para las muestras a tratar fue de 6.5; es decir se buscó la neutralidad en la actividad iónica de los protones y los hidroxilos.

Para ambas experimentaciones los resultados fueron muy semejantes; cabe destacar que la diferencia entre los citados ensayos radica en la cantidad de materia prima empleada para estructurar el filtro del sistema de tratamiento, puesto que en la experimentación #3 se emplearon aproximadamente 10 gramos de sílice micro amorfa mientras que en la experimentación #4 se utilizaron únicamente 7 gramos de materia prima es decir un 30% en masa menos con respecto a la tercera experimentación.

La variable del potencial de hidrógeno es constante para ambas experimentaciones sin embargo el objetivo principal de efectuar una variación en la cantidad de materia prima empleada está fundada en la hipótesis que establece que la cantidad de contaminantes removidos por unidad de tiempo es directamente proporcional a la cantidad de materia prima utilizada.

Por lo tanto, este par de experimentaciones tienen un tono de vi funcionalidad puesto que por una parte se evalúa el efecto que tiene un pH neutro en la remoción metálica, así como también es posible determinar si la cantidad empleada de materia prima juega un factor crítico para la efectividad y eficiencia del sistema de tratamiento.

Tal y como se puede apreciar en la gráfica 12.17 correspondiente al comportamiento de la carga metálica a través del tiempo en la tercera experimentación, la carga metálica va disminuyendo paulatinamente a través de



la exposición con el tratamiento de la muestra; lo que traza una notable diferencia con respecto a los resultados obtenidos dentro del segundo ensayo realizado en donde como fue mencionado anteriormente la remoción metálica fue prácticamente instantánea puesto que a los 5 minutos de tratamiento ya se había tenido una reacción hidróxido - ion metálico, la cual resulta espontánea bajo las condiciones adecuadas.

Cabe destacar que dentro del ensayo #3 los resultados obtenidos con respecto a la remoción metálica máxima fueron mejores que en los pasados ensayos para ciertos metales ya que por ejemplo el porcentaje de remoción para el cromo en este ensayo fue de 76% a diferencia del ensayo #2 con un pH muy alto donde la eliminación de dicho metal fue de 63%.

Sin embargo cabe destacar una diferencia muy notoria dentro de este punto debido a que quizá la eliminación másica del analito es semejante pero la cinética o bien la relación entre eliminación - tiempo con la que se llevó acabo si marca una notoria diferencia, puesto que para el segundo ensayo la constante de eliminación para el ion cromo fue de 0.00417 miligramos de analito por unidad de tiempo (minuto) a diferencia del valor obtenido a un pH de 7 donde dicha constante fue de 0.023 miligramos de cromo eliminados por minuto.

Esto en términos más prácticos se puede traducir en una diferencia de 3 horas en cuestión al tiempo que requiere eliminar un gramo del analito en cuestión; puesto que la cantidad de tiempo que requiere el sistema bajo las condiciones correspondientes al segundo ensayo es de 4 horas mientras que únicamente por el hecho de efectuar el mismo tratamiento pero en a un pH neutro el tiempo requerido de tratamiento se reduce a 43 minutos.

Esta gran diferencia se explica de manera sencilla cuando se comienza a pensar en la diferencia en los mecanismo de remoción , puesto a que en el caso de formar hidróxidos metálicos que precipitan y se retienen por obstrucción como lo es en el caso del segundo ensayo experimental la eficiencia del método siempre dependerá de la porosidad del material filtrante, de la capacidad de retención máxima, caudal, tiempo de filtración etc.

Pero sobre todo de la cantidad de iones hidroxilos presentes en el agua, reacción que hay que recordar que es espontánea sin embargo una vez saturado el sistema de las sales alcalinas de los metales y agotados los iones hidroxilos ya no es posible remover más metales de la muestra, lo que explica la rápida tendencia de eliminación metálica en los primeros 5 minutos de exposición al tratamiento y su posterior estabilización.



Por otra parte cabe destacar que la explicación a este decrecimiento paulatino observado en la experimentación #3 radica en una relación directamente proporcional entre el tiempo de exposición de la muestra con el material filtrante y la remoción de contaminantes, es decir que existen intercambios iónicos llevados a cabo en la superficie de la sílice micro amorfa, cabe destacar que dentro de la caracterización de la materia prima se determinó que el tamaño de partícula es muy pequeño <0.02 mm.

Por lo que es posible inferir que el área superficial de la sílice micro amorfa en cuestión tenga un valor muy grande, lo que ofrece una valiosa explicación a la retención metálica con respecto al tiempo. Hasta este punto se experimentó con las variaciones del potencial de hidrógeno, lo que permitió ver claramente que la mejor condición a adecuar para el tratamiento del agua resultó ser un pH neutro, así pues, en el párrafo anterior se estipuló una proporcionalidad directa entre el tiempo de exposición y la remoción metálica.

Con respecto a la evaluación efectuada en la cuarta experimentación correspondiente a la variación de resultados en relación a la cantidad de materia prima empleada, cabe destacar que los resultados esperados colindaban en una estrecha relación de proporcionalidad directa entre la efectividad del sistema de tratamiento y la cantidad de sílice micro amorfa utilizada.

De tal modo que de emplear una cantidad significativamente mayor de la materia prima en cuestión se esperaría un importante incremento con respecto a la efectividad del tratamiento; puesto que en este caso el área superficial de material filtrante aumenta incrementando a su vez el tiempo de exposición o bien el área de contacto.

Sin embargo los resultados obtenidos al emplear un 30% menos de la cantidad de sílice utilizada para la tercera experimentación, se encontró una variación muy poco significativa para la eficiencia del sistema es de suma importancia hacer notar que dentro de la comparación de ambos ensayos experimentales la única variable estipulada es la cantidad de materia prima empleada puesto a que el volumen de muestra, potencial de hidrogeno así como también las concentraciones metálicas de las muestras se manejaron como constantes.

Puesto a que las diferencias entre los porcentajes de remoción para las experimentaciones no marcan una tendencia clara de incremento o decrecimiento con respecto a la variable evaluada; ya que, en el caso del zinc, por



ejemplo, los porcentajes de remoción alcanzados en ambas experimentaciones fueron de 56%.

Sin embargo, la diferencia radica en la cinética de remoción de contaminantes puesto a que al emplear una cantidad mayor de sílice micro amorfa la constante de eliminación metálica fue de 0.014 miligramos de zinc por minuto de tratamiento, mientras que al emplear una cantidad menor de materia prima dentro de la cuarta experimentación el valor de remoción por unidad de tiempo fue de 0.00543 miligramos por litro.

Este mismo caso se repitió para los iones plomo, cobre y cromo en donde las cantidades de iones metálicos eliminados al término del tratamiento fueron muy semejantes; pero con una gran diferencia en los valores cinéticos de remoción. Tal y como se muestra en la siguiente tabla donde se aprecia la relación entre los porcentajes de remoción y sus respectivas constantes cinéticas de eliminación de contaminantes.

Tabla 9.1 Comparación: Constantes - porcentajes de remoción.

EXP 3	Zn [ppm]	Cu [ppm]	Pb [ppm]	Cr [ppm]
% Remoción	56.82	70.78	69.17	75.86
Constante (mg/min)	-0.014	-0.02	-0.019	-0.023
EXP4				
% Remoción	56.94	68.79	74.85	63.89
Constante (mg/min)	-5.43E-03	-7.97E-03	-8.61E-03	-7.96E-03

Gracias a los datos presentados en la tabla anterior es posible observar como la velocidad en la que una cantidad determinada de iones metálicos son retenidos y eliminados del medio acuoso tiene una relación directamente proporcional con respecto a la cantidad de materia prima utilizada.

Sin embargo por otra parte la evaluación experimental muestra de manera clara como la capacidad del sistema de tratamiento no varía mucho con respecto a la cantidad de materia prima empleada, en otras palabras la cantidad total de miligramos de contaminantes removidos bajo el sistema de tratamiento estudiado, no depende en gran medida de la cantidad de sílice micro amorfa utilizada si no de las condiciones en las que el sistema opera como lo es el potencial de hidrógeno del afluente a tratar; sin embargo la velocidad en la que estos iones metálicos se



eliminan si posee una relación directa con respecto a la masa de material filtrante empleado.

Ahora bien, los resultados analizados hasta este punto corresponden a un mismo prototipo de diseño del sistema de tratamiento propuesto; como recordará el lector el filtro de materia prima empaquetado es montado en un sistema de extracción tipo soxhlet lo que asegura un contacto eficiente de las muestras acuosas con la sílice micro amorfa.

Sin embargo también existe la posibilidad de establecer una suspensión de las partículas de materia prima en el medio acuoso (muestra) a fin de aumentar significativamente el contacto o bien la exposición de los iones metálicos presentes con respecto al área superficial de la sílice micro amorfa; ya que al tener la materia prima en un filtro empaquetado pudiera limitar en cierto grado el exposición de los contaminantes en el material filtrante; puesto a que las áreas de contacto son dependientes de los espacios, canales o poros resultantes de la compactación o empaquetado de la materia prima.

Es verdad que esta variable fue tomada en cuenta y es la razón principal por la cual se eligió un sistema soxhlet para contrarrestar dicho problema con respecto a un filtro de retención convencional, sin embargo, este hecho no descarta la importancia de realizar una comparación entre dos sistemas que juegan con la variable de ruta de exposición contaminante - material filtrante.

Por esta razón dentro del ensayo experimental #5 se optó por sustituir el método de filtro empacado, por una suspensión de sílice micro amorfa a un pH neutro y una cantidad de 10 gramos de materia prima, variables que como el lector recordara arrojaron los mejores resultados para el tratamiento de iones metálicos.

Tal y como se muestra en la gráfica 12.33 el comportamiento de la carga metálica de esta experimentación presenta una tendencia clara; una remoción significativa de los iones metálicos en los primeros minutos después de haber dado inicio al tratamiento de la muestra y una posterior estabilización con respecto a la cantidad de metales removidos por unidad de tiempo.

Es importante recordar que esta misma tendencia ya se había detectado en la segunda experimentación en donde el potencial de hidrógeno estipulado para la muestra fue de 10; sin embargo, dentro de esta experimentación en donde el pH es neutro, la exposición de contaminantes con respecto a la materia prima en suspensión juega un papel fundamental para la efectividad del tratamiento.

Es importante hacer ver la alta efectividad de sistema con respecto a la remoción de metales; tal y como lo fueron el cobre, plomo y cromo; puesto que los



porcentajes de remoción para dichos anualitos llegan a superar el 80%; tal y como lo fue el caso del ion cromo en donde el sistema de tratamiento por medio de suspensión alcanzó un porcentaje de remoción de 83%; es decir 8% más alto que el ensayo experimental basado en un filtro empacado.

Sin embargo a pesar de que para los tres metales citados anteriormente la variación de dicho factor favoreció en gran medida los resultados obtenidos; fue el caso contrario para los de más metales como lo son plata, níquel, cadmio y zinc ya que los porcentajes con respecto a la tercera experimentación donde la única diferencia estipulada es la ruta de exposición entre los contaminantes y la materia prima fueron significativamente menores; al tener como lo es en el caso de la plata un porcentaje másico de remoción que no supera el 5%; lo que indica claramente que el factor estipulado dentro de este ensayo favorece la formación selectiva de hidróxidos metálicos en la superficie del material suspendido, lo que explica la variabilidad de resultados obtenidos.

Por otra parte se encuentra la evaluación del comportamiento cinético del sistema de tratamiento bajo los factores estipulados, debido a que como ya fue mencionado anteriormente la tendencia de la experimentación para este caso tiende a mostrar una rápida remoción de la carga metálica en el primer lapso de tiempo.

Sin embargo después de los 5 minutos de tratamiento se presenta una estabilización con respecto a la disminución de las concentraciones metálicas a lo largo del tiempo, es decir que la eliminación de iones metálicos tiene un valor muy bajo o bien es prácticamente nula.

Lo dicho se puede observar en la relación de constantes de eliminación para los ensayos experimentales presentada en la tabla 12.66; en donde es posible comparar los valores de eliminación de contaminantes a través del tiempo de la experimentación #3 correspondiente a una filtración vía soxhlet con respecto a las obtenidas en un tratamiento por suspensión de la materia prima.

En la primera se denotan valores varían entre un rango de 1×10^{-2} hasta 1×10^{-3} miligramos de contaminante eliminado por minuto; sin embargo para la segunda experimentación el rango de valores obtenidos en las constantes de remoción varían desde 1×10^{-3} hasta 1×10^{-4} ; tal y como lo es el caso del cobre ya que por vía retención por suspensión se obtuvo una constante de remoción de 0.00822 miligramos de cobre eliminados por minuto, a diferencia del tratamiento efectuado por el empaquetado de la sílice cuyo valor cinético fue de 0.02 miligramos de contaminante por minuto.



Esto equivalente a una diferencia de 72 minutos entre cada uno de los tratamientos para efectuar la remoción de un miligramo de cobre en la muestra a tratar. Con lo que es posible inferir que la velocidad global de remoción para el sistema adecuado para la suspensión de la materia prima es menor que la filtración vía soxhlet; a pesar de su rápida reacción en los primeros minutos de tratamiento; la baja o nula remoción metálica que posee después de este periodo de tiempo constituye de esta metodología un tratamiento de baja eficiencia.

Hasta este punto es importante hacer notar que las rutas bajo las cuales se ha buscado llevar a cabo la eliminación de la carga metálica se han centrado en dos rutas principales basadas en empaquetar la sílice micro amorfa a modo de formar un filtro o bien suspender dicha materia prima directamente en la muestra a regenerar; cabe destacar que ambas metodologías de tratamiento han resultado ser eficaces bajo ciertas condiciones.

Tal y como lo es el potencial de hidrógeno a un valor de 7; cabe destacar que se han logrado alcanzar porcentajes máxicos de remoción que van desde 75% hasta 83%; sin embargo es en este punto donde es resulta fundamental hacer hincapié en la necesidad de estructurar un sistema de tratamiento con mayor capacidad; puesto que de esta manera la rentabilidad y viabilidad aumentan significativamente con lo que se abre la puerta a la posibilidad de llevar a cabo dicho tratamiento propuesto en una escala y un escenario real.

Por dichas razones se optó por generar un nuevo ensayo experimental buscando efectuar una unificación entre los mecanismos de retención metálica vía filtración soxhlet y suspensión de partículas de sílice micro amorfa; con dicho arreglo se pretende encontrar una importante mejora en términos de la capacidad del sistema para remover iones metálicos en unidades de tiempo.

De tal modo que una muestra acuosa con una concentración dada de iones metálicos al ser expuesta a dicho sistema tendrá un doble frente de exposición con respecto a la materia prima seleccionada para retener dichos contaminantes; puesto que la suspensión de sílice micro amorfa mantendrá un contacto directo con la carga metálica todo el tiempo en el que la muestra sea retenida en el tanque de recepción.

Mientras tanto la muestra impulsada por el motor eléctrico mantendrá un contacto directo con el material filtrante colocado en el sistema soxhlet a lo largo de su paso por el sistema de filtración.



Los resultados obtenidos en el séptimo ensayo experimental dejan en claro que la efectividad del sistema aumenta considerablemente al efectuar las adecuaciones citadas anteriormente; puesto que en la gráfica 12.48 correspondiente al comportamiento de la carga metálica durante la experimentación #7; es posible observar que la carga metálica disminuye drásticamente en los primeros minutos de tratamiento. cómo ha de recordar el lector dicho comportamiento también se había presentado durante la experimentación #2 donde las condiciones manejadas con respecto al pH eran de un valor de 10; o bien también dicho efecto se pudo apreciar durante la quinta experimentación, sin embargo, este comportamiento no se refleja en los resultados correspondientes al sistema de filtración vía soxhlet el cual tiene una disminución gradual y continua.

La unión entre los mecanismos citados alcanza un notorio aumento de la capacidad del sistema; puesto que los porcentajes de remoción de carga metálica van desde un 61% para el ion de la plata hasta un 100% como lo fue en el caso de los iones cobre, plomo y cromo; lo cual marca una gran diferencia con respecto a los sistemas por separado de filtración soxhlet y suspensión en donde los porcentajes de remoción máxima para ambos arreglos experimentales corresponden a 75% y 83% respectivamente.

Así pues, es importante hacer notar que durante esta experimentación cinco de los siete metales estudiados fueron eliminados por completo del medio acuoso exceptuando al ion cadmio que fue eliminado en un 96% y el ion plata cuyo porcentaje de eliminación ya fue citado anteriormente.

A modo de ampliar un poco más la comprensión del efecto que tiene sobre la carga metálica de la muestra el arreglo propuesto en la séptima experimentación; es necesario realizar una comparación entre las metodologías de filtración vía soxhlet, suspensión y la unión de ambos procesos; tomando a modo de ejemplo el comportamiento del ion zinc a lo largo de los diferentes arreglos del tratamiento estipulados anteriormente; el porcentaje de dicho metal removido a lo largo de un periodo de 120 minutos fue de 57%, 47%, 99.6% correspondientes a el tratamiento vía filtración soxhlet, suspensión y la unión de ambos procesos respectivamente.

Tal y como es posible observar, la diferencia entre los resultados es bastante puesto que la cantidad de zinc removido por bajo las condiciones del tercer prototipo de tratamiento es casi el doble con respecto a la filtración soxhlet o la metodología basada en la suspensión de la materia prima en el tanque receptor.



Así pues, un caso donde es más notorio el aumento de la capacidad de remoción del sistema se da al prestar atención en el ion de cadmio en donde el porcentaje de remoción alcanzado al unir los procesos de filtración y suspensión tuvo un valor de 96%.

Puesto que la concentración al iniciar el tratamiento fue de 1.0809 miligramos de cadmio por litro, y al término de la experimentación a los 120 minutos la concentración para este analito fue 0.0402 miligramos por litro de cadmio. Mientras que para los modelos experimentales correspondientes a filtración soxhlet y a la suspensión de sílice micro amorfa en el tanque de suspensión los porcentajes de remoción no superan valores de 18% para la eliminación del ion cadmio del medio acuoso. Dejando una clara diferencia del 78% en cuanto a la cantidad total de ion cadmio removido entre las metodologías citadas.

Por lo tanto hasta este punto es posible hacer notar como existe un efecto de sinergia al efectuar la unión entre el mecanismo de suspensión y filtración; puesto que la eficiencia del tratamiento aumentó considerablemente al ser ahora capaz de eliminar los iones metálicos prácticamente en su totalidad, sin embargo ahora también resulta importante evaluar dicho sistema de tratamiento desde el punto de vista cinético puesto que se puede lograr obtener un sistema muy eficaz en cuanto a términos de porcentajes de remoción de contaminantes más si su velocidad de eliminación de carga metálica por unidad de tiempo es muy baja, esto constituirá un factor que impedirá que la realización del tratamiento sea rentable.

Con respecto a la evaluación llevada a cabo en cuanto a la velocidad de miligramos de contaminante removidos por minuto cabe destacar que las constantes de eliminación de la carga metálica para esta experimentación remarcan la alta capacidad del sistema de tratamiento; puesto en experimentaciones anteriores los máximos valores alcanzados varían en un rango de magnitud de 1×10^{-3} miligramos de contaminante eliminado por minuto.

Sin embargo, al unir los procesos de filtración y suspensión la cinética de remoción tiende a ser mucho mayor, puesto que ahora se alcanzan a eliminar en un periodo corto de tiempo la concentración total de un ion metálico en cuestión.

A modo de ejemplo se realizará la comparación entre las metodologías evaluadas en la fase experimental, por lo que se tomarán valores de las constantes de eliminación en específico del ion cadmio; cabe destacar que las constantes para las tres experimentaciones en cuestión son las mismas: un potencial de hidrógeno con un valor de 7, temperatura ambiente, misma concentración de anualitos, así como también tiempo de exposición.



Por ende es importante citar el valor correspondiente a la constante de remoción metálica obtenida para el sistema de tratamiento basado en una filtración el cual fue de 0.00390 miligramos de cadmio removidos por cada minuto de tratamiento lo que equivale a un periodo de 4.27 horas para concretar la eliminación de un miligramo del contaminante en cuestión, por otra parte al realizar la suspensión de la materia prima la constante de remoción disminuye hasta un valor de 0.000618 miligramos de cadmio por minuto de tratamiento, siendo necesario un tiempo de 27 horas para llevar a cabo la remoción de un miligramo del ion cadmio.

Hasta este punto como el lector puede notar la rentabilidad del proyecto es muy poca; puesto que las metodologías propuestas tienden a brindar remociones metálicas significativas puesto que sus porcentajes de remoción alcanzan hasta un 80% pero con la desventaja que los tiempos de exposición se elevan demasiado, incluso a pesar de ajustar el sistema a las mejores condiciones de remoción.

Sin embargo cabe destacar que un sistema constituido por las metodologías citadas anteriormente brindo un muy buen resultado puesto que su constante de remoción metálica tiene un valor de 0.035 miligramos de cadmio por minuto de tratamiento, equivalente a un periodo de 28 minutos para llevar a cabo la eliminación de un miligramo de cadmio en solución; lo que abre una posibilidad real de conformar con un sistema de tratamiento que elimine la mayor cantidad de los iones metálicos en el menor tiempo posible.

Hasta este punto es importante mencionar que se han efectuado experimentaciones con agua sintética, es decir un volumen de agua desionizada adecuada a un pH conocido y a una concentración específica de iones metálicos; con lo que fue posible definir el conjunto de factores que favorecen en mayor grado la remoción de la carga metálica.

Dichas variables pueden resumirse en llevar a cabo el tratamiento vía filtración soxhlet en unión al proceso de suspensión empleando 10 gramos de sílice micro amorfa cuando el potencial de hidrógeno de la muestra tiene un valor neutro. Sin embargo cabe resaltar que puesto que el proyecto propuesto está enfocado específicamente a la remoción de metales en muestras de agua provenientes de la industria se hizo necesario ampliar la etapa experimental, con el fin de evaluar a escala real la efectividad del sistema de tratamiento propuesto.

Por lo que se llevó a cabo un ensayo practicado con una muestra real tomada de una empresa galvanizadora, rama de la industria que se caracteriza por sus altas cargas metálicas en sus efluentes o descargas.



Es importante mencionar que durante este ensayo experimental se mantuvieron constantes todos los factores estipulados en las experimentaciones anteriores; al igual que en la séptima experimentación donde se unieron los procesos de filtración y suspensión de la materia prima el comportamiento de la carga metálica con respecto a cada unidad de tiempo fue muy semejante en el caso de la experimentación con la muestra real ya que como se muestra en la gráfica 12.56 la concentración de metales como el zinc y el cobre disminuye significativamente durante los primeros minutos de tratamiento seguido de una estabilización de la carga metálica con respecto al tiempo de tratamiento es decir que la máxima remoción de iones metálicos bajo el procedimiento propuesto se da en los primeros 10 minutos de exposición de los contaminantes frente a la materia prima; esta semejanza del comportamiento de las cargas metálicas del ensayo experimental llevado con agua real y las experimentaciones llevadas con agua sintética brinda un dato que resulta ser muy importante puesto que a lo largo de este ensayo se destaca un factor con respecto a la complejidad de la matriz.

Ya que en el caso de los ensayos realizados con agua sintética la matriz resulta ser muy sencilla puesto que se trata de agua desionizada (experimentación #7) la cual se piensa favorece el contacto entre la materia prima y los iones metálicos puesto que no tiene sólidos suspendidos o bien otros componentes que puedan llegar a interferir entre el contacto de la materia prima y los contaminantes; por otra parte la matriz en la muestra proveniente de la galvanizadora tiende a ser un tanto más compleja puesto que se tiene materia flotante, un total de 410 miligramos por litro de sólidos suspendidos, una turbidez de 12 NTU así como también una alta tasa de demanda química de oxígeno correspondiente a 845 miligramos de oxígeno por litro lo cual indica un alto grado de contaminación en la muestra.

Así pues también es crucial hacer hincapié en que fueron tres los iones metálicos presentes en la muestra industrial tomada: níquel, cobre y zinc; siendo el último de mayor importancia para la empresa galvanizadora en cuestión puesto que este contaminante es el que les genera mayores problemas a la hora de realizar descargas acorde a la NOM-002-1996.

A pesar de estos factores citados anteriormente, la remoción de iones metálicos para la muestra tomada en la industria galvanizadora se llevó a cabo de manera muy eficiente puesto que un 84% del zinc metálico fue removido aproximadamente un 15% menos que el resultado alcanzado durante la séptima experimentación en donde el porcentaje de eliminación para el metal en cuestión fue de 99%.



Sin embargo tal y como ya fue mencionado anteriormente la caracterización de la muestra es decir la matriz en la que se encuentran inmersos los iones metálicos influyen de manera negativa conforme se va complicando la matriz en cuestión, puesto que en las muestras reales la disposición de los iones puede ser diferente, tomando en cuenta que durante las experimentaciones sintéticas los metales son agregados directamente y se ionizan espontáneamente con lo que la alta disponibilidad en combinación a la buena exposición ante el agente filtrante o medio de retención favorecen en gran medida la remoción del metal en cuestión.

Tal y como es posible observar en la tabla 12.67 la concentración inicial del ion zinc para la muestra correspondiente al efluente de la planta de tratamiento de la industria galvanizadora tiene un valor de 5.04 miligramos de zinc por litro de muestra, cabe destacar que esta concentración es cinco veces más grande con respecto a las empleadas durante la fase experimental en donde se emplearon muestras sintéticas.

Por lo que esta experimentación también brinda información en relación al comportamiento o bien la efectividad del sistema de tratamiento cuando se incrementan las concentraciones de los contaminantes a remover; por otra parte una concentración de 5 ppm equivale a 5 gramos de zinc por cada metro cúbico de agua generada en el proceso de galvanizado. Tomando en cuenta el porcentaje de remoción de dicho metal citado anteriormente se puede calcular que aproximadamente 4.2 gramos serán removidos y retenidos en la sílice micro amorfa por cada metro cúbico que sea expuesto al tratamiento.

Con respecto a la cinética o bien la velocidad de remoción del metal en cuestión es importante mencionar que el máximo porcentaje de remoción es alcanzado a los pocos minutos de haber iniciado el tratamiento de la muestra; es decir se tiene un proceso espontáneo en lo que respecta a la retención del ion metálico en la capa superficial de la sílice micro amorfa puesto que a los 5 minutos ya se había retenido el 84% de la concentración inicial del zinc, mientras que a pesar de extender el tratamiento de la muestra a un periodo de 120 minutos no se logra remover ya una cantidad significativa del analito en cuestión.

Ya que a los 5 minutos durante esta experimentación la concentración del zinc restante en medio acuoso corresponde a un valor de 0.8735 ppm y al transcurrir un periodo de dos horas la concentración final es de 0.8297 miligramos de zinc por litro, es decir no existe una diferencia significativa entre las concentraciones del contaminante al haber transcurrido el primer periodo de tratamiento.



Por otra parte cabe destacar que esta característica que tiene el sistema de filtración retención no solo se limita al ion zinc debatido anteriormente sino que también resultó ser muy eficiente en relación a los iones metálicos níquel y cobre que también encontrados en el efluente industrial; puesto que la concentración inicial para el primero corresponde a 2.7223 miligramos por litro de muestra; es decir un total de 2.7 gramos por cada metro cúbico de agua a tratar lo cual es una cantidad másica considerable; sin embargo el sistema de tratamiento propuesto alcanza una remoción máxima de casi un 40% para el metal en cuestión.

Es decir que un total de 1.088 miligramos de níquel por litro de muestra son removidos en los primeros minutos del tratamiento de filtración retención con sílice micro amorfa. En este caso la diferencia con respecto a la experimentación llevada a cabo con una muestra sin interferencias de matriz es mucha puesto que en el séptimo ensayo el porcentaje de remoción para el metal en cuestión fue de 99%.

Sin embargo he aquí un factor que vale la pena mencionar puesto que si se presta especial atención en los valores de remoción para los sistemas de tratamiento de filtración y retención por separado es posible observar que los porcentajes a las experimentaciones mencionadas corresponden a 16% y 26% respectivamente, es decir valores menores al obtenido mediante la unión de ambos procedimientos con una muestra real, lo que nos da un buen indicativo del proceso complementario de la filtración con respecto a la retención en la materia prima empleada.

Otro de los factores que resultan cruciales a evaluar descartar la posibilidad de una solubilización de la sílice empleada a modo de materia prima para el proceso de tratamiento de las muestras, ya que de ser así la rentabilidad del sistema baja significativamente puesto que esta ventaja ya demostrada del sistema, en cuestión de eliminación de carga metálica se contrarresta al contaminar dicha muestra con una carga considerable de sílice soluble.

Dado a este factor fue necesario llevar a cabo la evaluación de sílice soluble en el laboratorio basado en la norma mexicana NMX-AA-75-1982 con respecto a análisis de sílice en agua; dicho análisis se efectuó en cada una de las muestras tomadas a lo largo del ensayo experimental realizado con la muestra tomada en la industria galvanizadora.

La razón por la cual se tomó esta muestra a modo de referencia es por su ya citada complejidad de matriz por lo que el contacto con otras especies suspendidas en la muestra entre otros factores podrían contribuir a favorecer la solubilización de la sílice.



Sin embargo una vez concretado el análisis de la sílice soluble en cada una de las muestras tomadas a lo largo de los 120 minutos de ensayo experimental se determinó que la concentración para dicho analito en las cinco muestras tomadas fue menor a 0.1 miligramos por litro es decir que los resultados obtenidos se encuentran por debajo del límite de detección del método empleado.

Con lo que es posible demostrar que la sílice no se transfiere a la muestra durante el tratamiento sino que también brinda un respaldo a la rentabilidad del proyecto propuesto.

Un punto que resulta importante de hacer notar es la variación entre la turbidez desarrollada durante el tratamiento y después del mismo; nos encontramos hablando de los sólidos suspendidos en la muestra.

Puesto que no hay que olvidar que el sistema propuesto para el tratamiento está constituido en parte por un filtro de sílice micro amorfa el mismo que podría influir en la eliminación de un cierto porcentaje de la materia suspendida en la muestra; sin embargo de aquí resultan dos vertientes de análisis.

La cuantificación de los sólidos suspendidos durante la operación de tratamiento puesto que no hay que descartar que el sistema acoplado de tratamiento se encuentra basado en suspender parte de la materia prima en la misma muestra a tratar por lo que la cantidad de sólidos suspendidos aumentará de manera considerable; es por eso que dentro de este punto es importante hacer notar que la concentración inicial de sólidos suspendidos fue de 318 miligramos de materia suspendida por litro de muestra.

Sin embargo, como ya fue explicado anteriormente la carga de sólidos suspendidos aumentó significativamente una vez comenzada la etapa de tratamiento a un valor final de 534 miligramos de sólidos suspendidos por litro al transcurso de 120 minutos de exposición de la muestra frente al sistema de tratamiento.

Desde un punto de vista analítico es posible definir que la cantidad de materia suspendida aumenta 1.68 veces con respecto a la concentración inicial de sólidos suspendidos puesto que la materia prima también es empleada a modo de suspensión para concretar la remoción de carga metálica de manera efectiva.

A fin de comprender con mayor profundidad los efectos que tiene el tratamiento propuesto en la muestra industrial tomada, es también evaluar la cantidad de materia suspendida una vez descartada la cantidad de materia prima empleada en suspensión para la remoción efectiva de metales, puesto que se pretende analizar si existe algún efecto alterno en cuanto a la eliminación de



contaminantes del afluente industrial aparte de los iones metálicos que como anteriormente se logró interpretar disminuyeron considerablemente en los primeros minutos de tratamiento, por lo que se busca encontrar posibles ventajas alternas con las que cuenta el tratamiento propuesto.

Con lo que se destaca que la concentración inicial de sólidos suspendidos que corresponde a una etapa de post- tratamiento fue de 410 miligramos materia suspendida por litro de muestra mientras que a diferencia de los datos expuestos anteriormente de sólidos suspendidos en fase operacional la concentración final de materia en suspensión al término del tratamiento disminuye a un valor de 294 ppm.

Lo que se traduce a un porcentaje de remoción de sólidos suspendidos del 28% una vez eliminado el factor agregado de la sílice micro amorfa empleada en suspensión para el tratamiento.

Finalmente es importante hacer ver como la interpretación de resultados es una guía altamente útil para efectuar la evaluación y determinación de la factibilidad de realizar el proyecto propuesto.

Así como también constituye la principal herramienta para la toma de decisiones en relación a la mejora o la modificación de variables a fin de tratar hacer más efectivo el sistema de tratamiento.

Dentro de esta sección fue posible comparar de manera sencilla los diferentes resultados obtenidos a lo largo de la etapa experimental a fin de determinar cuáles son los factores que favorecen en mayor proporción la remoción de la carga metálica contenida en una muestra.

Así como también se destacó que independientemente de la naturaleza de la muestra a tratar se hizo notar la poca variación de resultados y eficiencias obtenidas; tal y como lo fue en el caso de los ensayos experimentales realizados con muestras producidas en el laboratorio con estándares metálicos así como también en el caso de la muestra tomada en la industria galvanizadora.



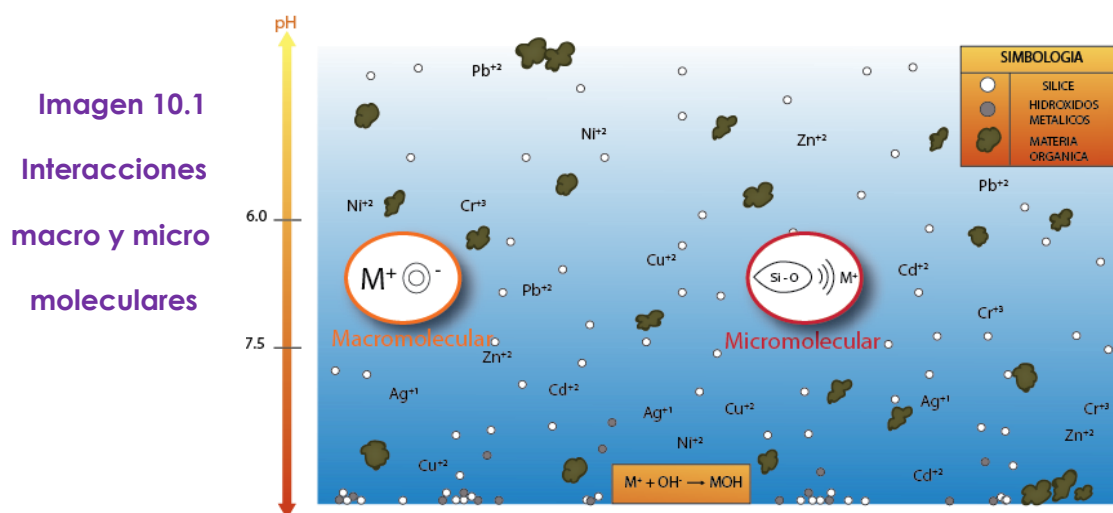
10. Discusión de Resultados

A lo largo del análisis experimental se determinó que el sistema de retención - filtración basado en sílice micro amorfa tiene una significativa eficacia cuando se ajustan las variables más adecuadas para favorecer la remoción de iones metálicos en las muestras acuosa.

Puesto que como fue estudiado en la sección 12; las condiciones que favorecen la regeneración de los efluentes a tratar radican en trabajar a condiciones de pH neutras, así como también la unificación sinérgica entre las metodologías de suspensión y filtración, sumadas a la cantidad de sílice amorfa adecuada para lograr la máxima remoción de carga metálica del agua en cuestión.

Es sumamente importante generar una hipótesis globalizada del mecanismo de remoción a nivel molecular, puesto que ya se sabe de antemano que el sistema de retención - filtración es efectivo sin embargo ahora la cuestión recae en clarificar o bien explicar de manera concisa y lógica el proceso mediante el cual se retiene los iones metálicos en la superficie estructural de la sílice micro amorfa por medio de interacciones intermoleculares, las cuales fueron descritas detalladamente en el apartado 8.

A modo de lograr un mayor entendimiento entre las interacciones tanto micro como macro moleculares llevadas a cabo durante el tratamiento del agua se elaboró la imagen 10.1 la cual presenta un vistazo general de las condiciones más adecuadas para llevar a cabo la regeneración del agua por medio de la retención metálica en matriz sólida.





Primeramente, es crucial recordar que dentro de los ensayos experimentales se determinó que la mayor eficiencia se alcanzaba a un pH neutro por lo que en la imagen 15.1 se estipula un rango entre 6.0 – 7.5 de pH para la mayor interacción micro – macro molecular, así como también es en el apartado 9.3.1.1 titulado Sílice como un material de filtración donde se presentó la conformación básica de la sílice micro amorfa, la cual facilita la comprensión de los mecanismos de retención.

Puesto que la sílice posee una estructura tetraédrica donde cuatro oxígenos a completan su octeto tras concretar enlaces estables con el silicio; así pues la distribución electrónica de dicho material conlleva a la formación de enlaces covalentes entre los elementos anteriormente mencionados.

Sin embargo dentro de este punto se distinguen dos particularidades de dicho vínculo, en primer lugar se distingue que dicho enlace atómico consiste en un enlace muy fuerte comparado con el enlace carbono - oxígeno (809 frente a 538 kJ/mol).

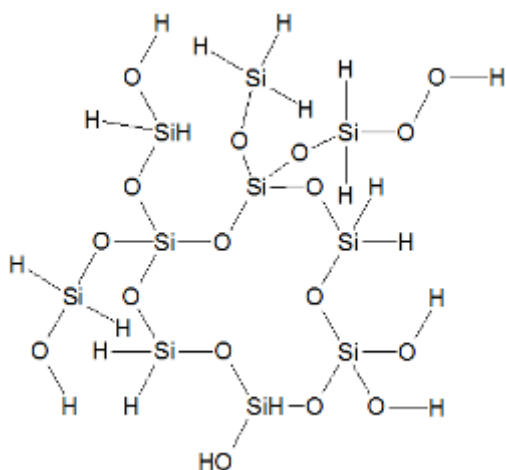


Imagen 10.2 Vista Macromolecular de Sílice Amorfa

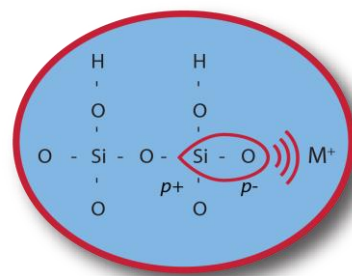
En segundo lugar tal y como se especificó anteriormente la naturaleza del enlace entre el silicio y el oxígeno es de carácter covalente y puesto a su diferencia de electronegatividades se destaca que la estructura sílicea presenta un momento dipolar considerablemente alto, es decir que una buena parte de la nube electrónica que vincula ambos átomos se encuentra desplazada hacia el oxígeno.

Lo que genera una molécula polarizada en otras palabras la zona allegada al oxígeno se encuentra parcialmente negativa mientras que la zona parcialmente positiva es la que le corresponde la silicio.



Ahora bien si se presta atención al efecto que tienen dichas parcialidades de distribución electrónica sobre los iones metálicos contenidos en las muestras acuosas; se podrá analizar que las diferentes zonas electroestáticas generadas por las diversas parcialidades negativas de los oxígenos en la estructura silícea favorece en gran medida las interacciones intermoleculares de tipo coulombianas con los iones metálicos, dicho efecto se representa en la imagen 15.3.

Imagen 10.3 Interacción ion - dipolo



Tal y como se mencionó en la sección 8.3.2 correspondiente a las fuerzas ion - dipolo, la interacción entre la zona parcialmente negativa del oxígeno y el catión metálico depende en su mayoría de tres factores principales, la carga, la distancia y la fuerza del momento dipolar, por dicha razón en la imagen 10.3 es posible apreciar con mayor claridad como en el medio acuoso los momentos dipolares de la sílice amorfa pueden llegar a atraer y retener parte de los contaminantes metálicos.

Cabe destacar que dentro de la etapa de experimentación se trabajó con siete diferentes cationes metálicos, de los cuales seis tenían número de oxidación +2 (carga positiva) y únicamente la plata con una valencia de +1, por lo tanto se puede llegar a la hipótesis basada en una relación directamente proporcional entre la carga positiva de un ion metálico y la interacción electrostática con la parcialidad negativa de la materia prima, es decir que a mayor sea el carácter positivo de la carga en cuestión mayor será la interacción con el oxígeno de la estructura silícea y viceversa.

Dentro de la sección 13.1 se muestran los porcentajes de remoción obtenidos a lo largo de todas las experimentaciones llevadas a cabo y claramente se denota que la remoción del ion plata en todos los casos es menor a los correspondientes porcentajes de remoción de los iones zinc, plomo, cobre, níquel, cromo y cadmio.



Otro aspecto del cual depende la interacción electroestática entre la densidad negativa del oxígeno con los iones metálicos en las muestras acuosas consiste en el tamaño del radio iónico acorde a la sección 8.4; el radio de un catión, ion positivo, es menor que el del átomo neutro del mismo elemento, ya que al ser menor el número de electrones, aumenta la carga efectiva del núcleo que atraerá más a los electrones restantes por lo que su tamaño disminuirá.

Dicho en otras palabras nos encontramos hablando de una de las principales variables que favorecen las fuerzas coulombianas de tipo ion - dipolo, puesto que en iones cuyo estado de oxidación sea +2 como es el caso del cobre o el zinc el tamaño del radio iónico será menor con respecto a su propio radio atómico en estado basal; mientras que por otra parte también se encuentra la variación de los radios iónicos basados no solamente en la magnitud de la carga sino también por su correspondiente posicionamiento en la tabla periódica.

Sin embargo, cuando nos encontramos hablando de cationes metálicos en donde la magnitud de carga es menor como lo es el caso de la plata +1, dicho favorecimiento esta dictado por la distancia de interacción; ya que si nos encontramos hablando de un catión con un radio iónico relativamente pequeño la distancia entre el núcleo del ion en cuestión y la nube electrónica negativa del oxígeno será mucho menor siendo de esta manera inversamente proporcional a la fuerza de interacción.

Por otra parte, resulta fundamental mencionar que existe otro factor que influye en la remoción de los cationes metálicos en las muestras tratadas, tal y como se mencionó en el apartado 8.5 se conoce como adsorción a un proceso mediante el cual se extrae materia de una fase y se concentra sobre la superficie de otra fase (generalmente sólida).

Por ello se considera como un fenómeno su superficial de naturaleza física; dicho fenómeno ofrece una explicación lógica ante la remoción de la carga metálica la cual es representada en la imagen 15.1 en un círculo color amarillo el cual representa la interacción macromolecular dada por una partícula con una carga superior parcialmente negativa y un ion metálico positivo.

Por otra parte también es de reconocerse la relación existente entre las características principales de la sílice micro amorfa y los factores que influyen de manera directa en los procesos de adsorción, puesto que tal y como se citó en el apartado 8.5.2 una alta área superficial influye directamente en la capacidad adsorción; ahora bien es importante retomar parte de la caracterización de la

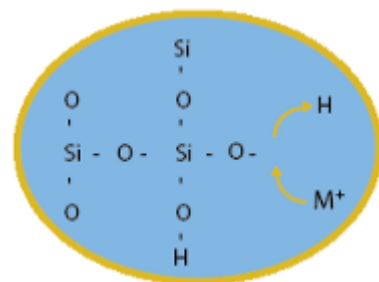


materia prima puesto que tal y como fue estudiado en el apartado 11 correspondiente a la caracterización de la materia prima el tamaño de partícula para la materia prima en cuestión tiene un valor muy pequeño (<0.02 mm); haciendo de la sílice micro amorfa un material idóneo para llevar a cabo la adsorción física de los cationes metálicos.

Por otra parte existe otro fenómeno químico explica parte de la remoción de iones metálicos en el medio acuoso, puesto que existe la posibilidad de contar con un material síliceo que actúa como un medio de intercambio iónico, ya que como fue mencionado en el apartado 9.3.1.1 dentro de la estructura básica de la sílice amorfa se encuentran átomos de oxígeno con alta electronegatividad enlazados covalentemente a átomos de hidrogeno, los cuales pueden ser sustituidos por los iones metálicos tal como se muestra en la imagen 10.4,

Hay que tomar en cuenta que durante los intercambios iónicos la estabilidad de carga electrónica se mantiene en equilibrio, es decir que los intercambios se efectúan entre iones de misma carga sin desestabilizar electrónicamente la molécula sílicea.

Imagen 10.4 Intercambio Iónico entre sílice amorfa - iones metálicos en muestras acuosas



Finalmente es importante hacer mención de un factor que contribuye directamente en la remoción de iones metálicos del medio acuoso sin depender del tratamiento regenerador propuesto, la reacción de hidróxidos metálicos es favorecida en potenciales de hidrogeno superiores a valores de 8.0, hay que tomar en cuenta la solubilidad (estudiado en la sección 7.5.2) de los iones metálicos es totalmente dependiente a cambios de temperatura, concentración y pH.

En otras palabras, al incrementar el pH de una muestra acuosa con contaminantes metálicos se favorece la precipitación los iones metálicos en forma de hidróxidos, tal y como representa la imagen 15.1. Sin embargo, a pesar de efectiva, esta solución resulta poco rentable puesto a los elevados costos de inversión en reactivos, homogenización y la neutralización total del agua a tratar, costos que aún son más altos si se considera efectuar este tratamiento para altos volúmenes de efluente.



11. Conclusión

Primeramente, es importante recordar las crecientes demandas hídricas acorde a las necesidades urbanas, industriales y medioambientales; es decir que hoy en día la demanda de los recursos hídricos es cada vez mayor, por lo que se hace necesaria la búsqueda de soluciones que permitan la descontaminación eficiente de aguas provenientes de procesos industriales para lograr de esta manera su posible reutilización en diversas actividades.

Dentro de los principales problema que representa el tratamiento de un agua industrial radica en la alta tasa de contaminantes y su amplia gama de los mismos; dentro de los cuales se destacan los metales en solución, es importante hacer mencionar que la disponibilidad de dichos contaminantes en el medio acuoso depende directamente de diversos factores que influyen directamente en la solubilidad de los mismos, tal y como lo es el potencial de hidrógeno (pH) del afluente, la temperatura y el estado de oxidación de los iones metálicos.

Es por eso que en los últimos años se ha enfocado especial atención en la regeneración de aguas residuales tanto urbanas como industriales, mediante múltiples tratamientos de diversas naturalezas que logran un significativo aumento de la calidad de la misma, es importante realizar hincapié en la relación existente entre la calidad de efluente alcanzada y el posible empleo o destino final del agua regenerada.

Así pues es importante remarcar que la regeneración de aguas residuales depende de ciertos factores como lo son la calidad del afluente, el tiempo de operación, coste operativo, espacio empleado por los sistemas de tratamiento y los contaminantes que se desean eliminar acorde a la futura aplicación del agua es fundamental remarcar que el tratamiento del agua se complica significativamente a medida que la exigencia con respecto a la calidad del agua producto incrementa, sin embargo el balance de los puntos anteriormente citados dictaminan la rentabilidad de un proceso de tratamiento propuesto.

En función a lo anterior es importante mencionar que actualmente se busca la integración sinérgica de procesos regeneradores de aguas residuales urbanas, es decir encontrar la adaptación adecuada de mecanismos tratadores que logren un efecto conjunto de eliminación de contaminantes, por dicha razón dentro de este proyecto se efectuó el estudio con respecto a la integración de los procesos de retención y filtración selectiva para la regeneración de aguas residuales industriales en sistemas operacionales de un solo paso.



Por lo tanto, se fijó como objetivo principal llevar a cabo el estudio de los factores que favorecen en mayor proporción la integración de los procesos anteriormente mencionados para efectuar la remoción de iones metálicos en muestras acuosas.

Es importante mencionar que la eliminación de la carga metálica presente en disolución en el efluente de una planta tratadora de agua residual urbana es crucial para el desarrollo sustentable o el ciudad del equilibrio entre la población y el ecosistema; acorde a recientes investigaciones "existe un una porción significativa de carga metálica que es fuente de contaminación directa para fuentes alimenticias ya que una porción significativa de los metales en disolución son asimilados por vegetales en cultivo y por animales de ganado²⁴²".

Cabe destacar que en las plantas tratadora de aguas residuales tanto urbanas como industriales no se tienen desarrollados aún procesos operativos específicos para reducir de manera significativa la concentración de metales disueltos en el afluente a tratar; puesto que los costos de inversión y de operación son muy altos; por dicha razón dentro de este trabajo no solo se propuso si no también se puso a prueba un sistema de tratamiento que permita efectuar la remoción metálica mediante una operación sencilla, rápida y económica.

Empleando como medio filtrante y de retención catiónica la sílice micro-amorfa obtenida como un residuo industrial en el proceso geotérmico de la planta de Cerro Prieto, Mexicali, siguiendo el objetivo de obtener un agua regenerada como producto del sistema propuesto en esta investigación

Dentro de la etapa pre experimental se prestó especial atención a llevar a cabo la generación de un diseño experimental de filtración - retención basado en la apropiada selección de componentes adecuados y su correspondiente arreglo; permitiendo así lograr un eficiente contacto entre las muestras y la materia prima empleada para de este modo lograr una efectiva remoción de los contaminantes metálicos contenidos en el agua a tratar.

Es importante mencionar que la factibilidad de emplear la sílice micro amorfa como medio filtrante viene dada por una limitante constante a lo largo de la fase pre- experimental puesto que dicha materia prima se caracteriza por ser un material con una tamaño de partícula muy pequeño lo que aumenta de manera significativa la compresibilidad del mismo, influyendo de este modo en la porosidad

²⁴² Mejia, Cecilia Metales Pesados en Suelos y plantas, Contaminacion y Fitotoxicidad. Universidad Nacional Jose Faustino Sanchez Carrion. 2011 Recuperado el día: 11/04/15
URL:<http://es.scribd.com/doc/204360496/METALES-PESADOS-EN-SUELOS-Y-PLANTAS-CONTAMINACION-Y-FITOTOXICIDAD#scribd>



del filtro en cuestión; lo que constituye una gran desventaja puesto que este factor disminuye considerablemente la cantidad y la velocidad con la cual el agua puede fluir a través de la sílice micro amorfa.

Recordando que a pesar de ser importante mantener un tiempo suficiente de residencia o de exposición entre el medio filtrante y el contaminante, se requiere un caudal de tratamiento (volumen de agua por unidad de tiempo) considerable para que resulte ser un proceso operacional rentable.

Una de las características principalmente destacadas durante la experimentación con sílice micro amorfa consiste en que dicha materia prima posee un alto valor de área superficial; el cual influencia directamente en su capacidad de intercambio catiónico.

Ya que la interacción con los contaminantes metálicos se pueden realizar por dos vías principales que recaen en la absorción de iones metálicos por medios físicos en la capa superficial del material filtrante o bien por medios químicos al enlazarse con los iones hidroxilos anclados en la estructura semicristalina de la sílice micro amorfa.

En ambos casos es posible afirmar que la retención de metales se efectúa rápidamente al entrar en contacto los contaminantes metálicos con la materia prima empleada tal y como fue apreciado durante la etapa experimental; puesto que los comportamientos de la carga metálica a lo largo del tiempo de tratamiento en los diferentes ensayos experimentales efectuados a diferentes condiciones ajustadas, muestran un declive casi espontáneo de la concentración de iones metálicos en los primeros minutos de tratamiento.

Por otra parte también es fundamental hacer mención de lo importante que resultó para la etapa experimental trazar un plan de trabajo acorde a los objetivos específicos definidos al comienzo de este proyecto.

Puesto que dentro de los ensayos experimentales se llevó a cabo la remoción de iones metálicos de una muestra preparada en el laboratorio basando dicho tratamiento únicamente en el montaje de un filtro elaborado con sílice micro amorfa en un sistema de extracción tipo soxhlet adaptado para asegurar el mejor contacto entre la muestra y el material filtrante; condiciones bajo las cuales se obtuvieron remociones metálicas satisfactorias puesto que nos encontramos hablando de porcentajes de remoción aproximados al 80%.

Mientras que por otra parte también fue realizado a modo de ensayo experimental la remoción de iones metálicos de una muestra sintética empleando únicamente la suspensión de la materia prima en la muestra a tratar; ensayo que



demostró a su vez un cierto porcentaje de eficiencia en cuanto a la eliminación de iones metálicos como el cromo a cuál corresponde una remoción del 83% con respecto a la cantidad inicial contenida en la muestra de dicho metal.

Ahora bien, es crucial realizar hincapié en un punto crítico presentado a lo largo de la elaboración del proyecto, puesto que se efectuó la unión de los procesos de filtración - suspensión; ya que como fue comentado anteriormente la efectividad de ambos procesos fue comprobada de manera individual; por lo que se decidió estudiar la unificación de ambas metodologías.

Los resultados obtenidos bajo esta decisión fueron claros; un aumento considerable de la eficacia del sistema de tratamiento; puesto que para una muestra adecuada a un potencial de hidrógeno neutro la tasa de remoción para los contaminantes metálicos se elevó a un 100%.

Tal fue el caso de iones metálicos como zinc, cadmio, cobre, níquel, plomo y cromo; la explicación a estos resultados se deben en gran parte a la alta exposición o tiempo de residencia que enfrentan los iones metálicos en el sistema elaborado.

Ya que los metales en solución tienen un doble contacto con la sílice micro amorfa la cual como se ha mencionado anteriormente tiene un alto poder de intercambio catiónico, por lo tanto los iones metálicos están en contacto directo con la materia prima contenida en el filtro montado en el sistema soxhlet.

Así como también tiene una exposición directa en el tanque receptor puesto que parte de la sílice micro amorfa es empleada para formar una suspensión, con lo que es posible afirmar que la remoción de los cationes metálicos tiene mayor eficiencia cuando se lleva a cabo la unión de los procesos de filtración (obstrucción por diferencial de tamaño) - suspensión (basado en el acoplamiento químico catiónico del material filtrante y el contaminante metálico) a diferencia de los resultados obtenidos mediante las mismas metodologías de manera individual.

Por otra parte también es crucial mencionar que en la hipótesis se habían estimado resultados que colindaban en la remoción de la carga metálica en un 30%, en un periodo de 1 hora para volúmenes de 2 a 4 litros.

Sin embargo los resultados reales obtenidos durante la fase experimental superan las expectativas elaboradas al inicio del proyecto puesto que los porcentajes de remoción de iones metálicos alcanzaron el 100% para seis de los siete metales puestos a prueba en los ensayos experimentales; removiendo la mayor parte de dichos contaminantes en los primeros 10 minutos de tratamiento y



obteniendo cinéticas de remoción que varían desde los 28 y los 43 minutos de tratamiento para la remoción de un miligramo de los contaminantes metálicos.

Ahora bien también importante remarcar que tal y como fue mencionado en la sección correspondiente a la interpretación de resultados se efectuaron experimentaciones a diferentes condiciones en donde se demostró que a un pH neutro se obtienen los mejores resultados en cuestión de porcentaje de remoción de cargas metálicas.

Lo cual resulta ser ventajoso puesto que en el caso de emplear dicho tratamiento para regenerar aguas residuales urbanas o bien afluentes industriales que cuenten con un potencial de hidrógeno aproximado a un valor de 7.

Por lo que no es necesario realizar una neutralización ácido - base, eliminando de este modo el manejo y el empleo de reactivos químicos para llevar a cabo dicho proceso, así como también se descarta la generación de residuos industriales como lo son las mermas de los ácidos o bases empleados en grandes cantidades para llevar a cabo la neutralización de un afluente.

Por todas las razones antes expuestas se destaca que dentro del proyecto se conformó un sistema de tratamiento con una alta capacidad de remoción de contaminantes; sin embargo, también es importante remarcar que dicho procedimiento sustenta su rentabilidad en la reutilización de un residuo industrial y los bajos costos de operación lo que se traduce a un claro panorama sobre la factibilidad de emplear el sistema filtración - retención para generar un agua producto con la calidad deseada.

La determinación de la factibilidad de llevar este proyecto a mayor escala depende directamente del análisis de del proyecto desde diferentes puntos de vista, puesto que la evaluación de las diversas áreas de impacto representa un instrumento básico para la toma de decisiones.

Cabe destacar que la interrelación de diferentes áreas sobre las cuales se desarrollará el trabajo permite establecer un margen de condiciones bajo las cuales es posible estipular, la rentabilidad, factibilidad, efectividad.

Desde el punto de vista económico la característica sinérgica con la que cuenta el proyecto representa una gran ventaja, ya que se destaca que unión del proceso de filtración y el de retención metálica en un solo paso reduce de manera significativa el espacio físico que ocupa el área de tratamiento.

Así como también la sinergia del sistema permite consumos energéticos menores en comparación a una inversión específica para llevar a cabo la remoción metálica como lo podría ser un sistema de intercambio catiónico; ya que



únicamente se necesita bombear los volúmenes de agua una sola vez para que entre al sistema de tratamiento, a diferencia de un proceso seriado o etapas; esto también destaca que la velocidad de tratamiento sea mayor o bien el tiempo de retención en el sistema sea menor lo que permite a largo plazo tratar volúmenes de agua significativamente mayores.

Recordando que el principio de la eficiencia se basa en la producción máxima al menor consumo de recursos, se hace necesario remarcar que uno de los principales objetivos alcanzados en este trabajo fue lograr formular un proceso eficiente y robusto de tratamiento; puesto que se aprovecha un residuo industrial sin aplicación alguna hasta la fecha, la Sílice micro- amorfa "es generada y catalogada como un residuo del proceso geotérmico en la planta de cerro prieto, Mexicali.^{243 244"}.

Esta material fuente de muchas investigaciones llevadas a cabo en el estado de Baja California tiene propiedades características muy importantes dentro de las cuales se pretende impulsar la remoción de contaminantes en el agua depurada; sin embargo, en la actualidad ninguna aplicación se le da a este material, es importante hacer mención que se produce en grandes cantidades en la planta y que su impacto en el proceso geotérmico es negativo por lo que su eliminación del sistema es fundamental.

Cabe destacarse de que la carga másica generada únicamente se extrae del sistema y se dispone al aire libre, lo que representa una fuente importante de contaminación (partículas suspendidas en el aire).

Por lo que el aprovechamiento de este recurso no solo representa un impacto ambiental positivo en cuanto a la remoción de contaminantes en el agua producto de la aplicación de la sílice micro amorfa; si no que también representa una manera directa de evitar el desequilibrio ecológico en las zonas apegadas o cercanas a la planta geotérmica en Mexicali.

Es importante remarcar que el material filtrante se genera de manera constante en la planta geotérmica y en grandes cantidades, por lo que es posible purificar y empaquetar diversos filtros a fin de que sean reemplazables en el sistema de tratamiento, cabe remarcar que la purificación de la sílice micro amorfa es un

²⁴³ Luz, Quintanilla Suarez, Francisco Fuente de calor en el campo geotérmico de Cerro prieto y su relación con la anomalía magnética Nuevo León, México. Geofísica internacional. Vol.33 Nym. 4 pp 575-584 , 1994.

²⁴⁴ Díaz, Cesar. Tratamiento químico de la escoria de sílice de una planta geotérmica para su aplicación en cerámica y vidrio. BOLSOC.ESP.CERAM.VIDR. 29, 3, 18J-184. 1990. Recuperado el día: 01/12/2014.
URL: <http://boletines.secv.es/upload/199029181.pdf>



proceso sencillo, rápido y con un consumo mínimo de recursos al consistir únicamente de lavados con agua desionizada caliente.

Por otra parte, resulta también importante hacer ver que se pretende establecer un procedimiento de post-tratamiento en donde se regenere la sílice micro amorfa de filtro saturado de contaminantes (adsorción) para tener nuevamente materia prima lista para reutilizarse, lo cual impacta aún más en las ventajas económicas con las que cuenta el proyecto desarrollado.

Por otra parte, es fundamental hacer ver que el sistema de tratamiento de filtración- retención tiene un impacto directo en el área ambiental al mejorar considerablemente la calidad del agua ya sea de un efluente industrial o urbano; puesto que hay que tomar en consideración que muchas de las descargas realizadas se llevan a cabo directamente en el río Tijuana, es decir se tiene contacto constante de los contaminantes con respecto al ambiente. Una relación existente entre los iones metálicos y el sistema ecológico (flora, fauna, suelo, aire etc.)

Por lo que la falta de remoción de contaminantes en el sistema de tratamiento provocará una gamma de impactos: a corto, mediano y largo plazo. "Como lo es la asimilación, retención y concentración de contaminantes metálicos y orgánicos en seres vivos.²⁴⁵".

El sistema propuesto cuenta con múltiples ventajas como la alta velocidad de remoción metálica y sus bajos costos con lo que es posible estructurar una metodología de tratamiento dentro del área industrial para disminuir de manera considerable la carga metálica con la que puede contar un afluente.

Tal y como lo fue por ejemplo en el caso de la empresa galvanizadora en donde se tomaron muestras para llevar parte de la etapa experimental, al hablar con la química en cargo de la planta tratadora de los efluentes generados se identificó la primer problemática con la que cuentan los procesos efectuados en dicha industria ya que se generan altos volúmenes de agua con concentraciones de ion zinc que varían entre las 5 ppm y las 10 ppm.

Lo que complica en cierta medida acatar las normas estipuladas en relación a descarga de contaminantes en alcantarillado estatal, sin embargo al realizar un tratamiento de filtración - retención basado en sílice micro amorfa no solo remueve un 84% aproximadamente de la cantidad total del zinc en las muestras sino que también disminuye parte de los sólidos suspendidos y a consecuencia de esto

²⁴⁵ Mejia, Cecilia Metales Pesados en Suelos y plantas, Contaminacion y Fitotoxicidad. Universidad Nacional Jose Faustino Sanchez Carrion. 2011 Recuperado el día: 11/04/15
URL:<http://es.scribd.com/doc/204360496/METALES-PESADOS-EN-SUELOS-Y-PLANTAS-CONTAMINACION-Y-FITOTOXICIDAD#scribd>



disminuye también la demanda química de oxígeno, aumento de la calidad que se traduce a un menor impacto ambiental.

Finalmente cabe destacar que en este proyecto se realiza la propuesta de un nuevo sistema de tratamiento terciario para aguas residuales depuradas; que asegura mejorar de manera exponencial la calidad del recurso hídrico tan necesitado hoy en día.

Dentro del ámbito tecnológico - científico es necesario resaltar la naturaleza de innovación; centrada en el concepto básico de sinergia; puesto que la eficiencia resultante de la unión de los procesos de filtración y suspensión es significativamente mayor a la obtenida mediante los mismos elementos operados de manera individual.

Las propiedades de la sílice micro amorfa permiten estructurar una operación unitaria mediante la cual es posible remover un cierto porcentaje de los sólidos suspendidos contenidos en la muestra teniendo a su vez una alta capacidad para remover una gama amplia de metales.

Es crítico hacer hincapié en el impacto que genera esta nueva innovación puesto que recae en el aumento de la competitividad en relación al aprovechamiento eficaz de los recursos disponibles, estructurando un proceso en donde se aprovecha al máximo el espacio, cuenta con menores tiempos de residencia y mayor capacidad de tratamiento de flujo. Llegando a un punto en donde podremos afirmar que los sistemas de tratamiento de agua más eficientes tenderán a estas nuevas ventajas que ofrecen los sistemas que actúan bajo los conceptos de trabajo conjunto.

Lo que orienta a las áreas de investigación a trazar nuevas metas relacionadas al estudio de las diferentes probabilidades de establecer patrones de compatibilidad - sinergia de los diferentes procesos de tratamiento. En otras palabras, la evolución de los sistemas tradicionales de tratamientos primarios, secundarios y terciarios; radica en el trabajo conjunto de los mismos mediante interrelaciones dominadas por el efecto: sinergia.



12. Perspectiva a futuro.

Dentro de las principales características con las que cuenta el sistema de tratamiento de agua residual propuesto en el presente trabajo se encuentran numerosas cualidades que radican en ventajas económicas, tecnológicas y sociales mediante las cuales es posible abastecer la creciente necesidad por el agua.

Es posible citar que dicho tratamiento está basado en tecnologías de un solo paso con lo que es posible aprovechar espacio, reducir los consumos energéticos durante la operación, posee una alta efectividad a tiempos cortos lo que reduce de manera significativa el tiempo de residencia necesario para llevar a cabo la regeneración del afluente.

Por otra parte, se distingue el aprovechamiento de un residuo a base de Sílice de característica amorfa, generada en la Central Geotérmica, localizada en el área de Cerro Prieto en la ciudad de Mexicali, Baja California, es importante hacer ver que se aprovecha dicha sílice residual que en la actualidad se lleva a confinamiento a una laguna de evaporación en la zona de la Central Geotérmica, no tiene aplicación alguna.

Es por dicha razón que se abre la oportunidad de idear a futuro una metodología de purificación de dicha materia prima a grande escala, puesto que como se sustenta en capítulos anteriores el método de limpieza de la sílice micro amorfa es efectivo y está bien estudiado sin embargo dentro de las experimentaciones llevadas a cabo únicamente se llevó a una escala pequeña puesto que aproximadamente fueron purificados 500 gramos.

Por lo que se hace necesario idear un proceso que permita incrementar de manera considerable la carga másica de material síliceo a emplear durante el tratamiento, contribuyendo de esta manera a aumentar de manera significativa el volumen de agua a tratar.

Por otra parte es importante recordar que mediante el sistema de retención - filtración fue posible eliminar en muestras reales entre un 40 y 84 %p de iones metálicos, es decir una calidad de efluente en condiciones químico-físicas óptimas para su aprovechamiento industrial en torres de refrigeración, condensadores evaporativos, sistemas contra incendios, lavado industrial de vehículos, aguas de proceso y limpieza, así como también se puede llegar a darle un uso urbano como como riego de jardines privados o zonas verdes y baldeo de calles.



Otro proyecto de aplicación al efluente generado consiste en la utilización del agua producto con fines ambientales, para reducir de este modo la carga antropogénica que tiene el fuerte sector industrial en la ciudad de Tijuana, puesto que actividades como recarga de acuíferos por percolación a través del terreno, recarga de acuíferos por inyección directa, silvicultura , o bien recarga de cuerpos acuáticos artificiales como lo son los lagos del parque de la amistad ubicado en Otay o bien el parque recreativo Morelos.

Como es posible observar la gama de aplicaciones para el efluente es amplia y variada por lo que el desarrollo a futuro del proyecto tiene que considerar variables como el volumen a satisfacer y la capacidad del sistema estudiado, por dicha razones se pretende estructurar un sistema de mayor escala para analizar si los resultados obtenidos a pequeña escala pueden ser extrapolados bajo las condiciones previamente estudiadas, como lo son el potencial de hidrogeno, la carga contaminante y la cantidad de sílice micro amorfa empleada para elaborar los filtros y crear la suspensión.

Dentro de todos los ensayos experimentales elaborados dentro de este proyecto se estableció un volumen de muestra de 2 litros, en donde el tiempo de tratamiento colinda a una eficiencia de 85% en 15 a 20 minutos, por lo que a futuro se tiene por objetivo principal como ya fue mencionado antes el incremento de la eficiencia del tratamiento es decir la cantidad de carga metálica que es capaz de remover del medio acuoso, pero en este caso se piensan emplear volúmenes de 50 litros.

Lo que representa todo un reto puesto que no solo la cantidad de sílice a utilizar para la suspensión y el filtro va a ser mayor si no que también el sistema de homogenización, de distribución y de contención de la muestra tienen que estar estructurados de tal forma que no pierda efectividad el proceso.

Es preciso hacer hincapié en que el volumen citado anteriormente va acorde a los afluentes generados por industrias pequeñas, puesto que si dicha cantidad de agua puede ser regenerada en un periodo de 20 minutos esto es equivalente a 2.5 L por minuto, lo cual es rentable acorde a los estudios realizados dentro de este proyecto.

Por otra parte también es interesante hacer ver que la variación de la matriz puede favorecer o bien desfavorecer los resultados de remoción de carga metálica, por lo que se pretende realizar muestreo en diferentes sectores industriales



que tengan una carga metálica representativa, como lo podrían ser pinturas, fundición primaria de metales, generación de baterías, producción de coque etc.

Es decir la intención de realizar diferentes muestreos en la zona industrializada es hacer constar que el sistema sinérgico de retención – filtración es efectivo independientemente de la matriz, puesto que se trata de interacciones electroestáticas se tiene la creencia de que quizá en presencia de una alta carga orgánica la efectividad del sistema puede caer.

Por la razón antes mencionada es fundamental hacer hincapié en que existe también como proyecto futuro estudiar la posibilidad de acoplar el sistema de retención – filtración a un sistema de oxidación química avanzada con el fin de analizar si en esta ocasión existe alguna relación de sinergia entre los componentes de tratamiento, puesto que la reducción de la materia orgánica como se mencionó anteriormente posibilitara la atracción entre la sílice micro amorfa y los cationes metálicos presentes en la muestra, así como también el filtro de sílice disminuirá la cantidad de sólidos suspendidos totales, por lo que la eficiencia del sistema de tratamiento orgánico también aumentara.

Finalmente cabe destacar que tal y como se especificó dentro de la sección de los impactos se distingue que la unificación sinérgica de sistema de tratamiento es proporcional a la calidad del agua a alcanzar y con ello variedad de usos que se le puede dar es mucho mayor.

En este caso en específico el sistema de retención filtración elaborado con un residuo industrial como la sílice micro amorfa es un muy buen ejemplo de lo importante del estudio de nuevos tratamientos para aumentar la calidad del agua puesto que con ello es posible contribuir de manera significativa al equilibrio ambiental y a la demanda creciente de un recurso tan importante para nuestra vida: el agua.



REFERENCIAS:

1. Rodriguez, Lorena. *Business News Americas*. UNAM desarrolla sistema de reciclaje de aguas grises de bajo costo para uso domestico. Publicado en Octubre 2011. Recuperado el día: 22/11/15
URL: <https://www.veoverde.com/2011/10/mexico-desarrollan-sistema-para-de-reciclaje-de-aguas-grises-de-bajo-costo/>
2. Lebrija, Alejandro. Reciclado de agua industrial: La unica solucion en algunos casos. Recuperado el día: 22/11/15
URL: <http://www.agualatinoamerica.com/docs/pdf/1-2-02lebrija.pdf>
3. De la Peña, Maria. Ducci, Jorge. Zamora, Viridiana. Tratamiento de aguas residuales en Mexico. Publicado en Mayo 2013. Recuperado el día: 22/11/15
URL: http://www.siaqua.org/sites/default/files/documentos/documentos/tratamiento_de_aguas_residuales_en_mexico.pdf
4. Díaz, C., Rincón, J. M. (1990). Tratamiento químico de la escoria de sílice de una planta geotérmica para su aplicación en cerámica y vidrio". *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 29(3), 181-194.
5. Díaz Trujillo, G. C. (1994). Caracterización y purificación del residuo de sílice de la central geotérmica de Cerro Prieto (Baja California, México). Su aplicación a la producción de materiales vítreos y cerámicos. repositorio.uam.es (1994)
6. Rincon, J. M., Romero, M., Díaz, C., Balek, V., & Malek, Z. (1999). Thermal behaviour of silica waste from a geothermal power station and derived silica ceramics. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 56(3), 1261-1269.
7. Diaz, C., Torres-Martinez, L. M., Garza, L., Avalos-Borja, M., & Rincón, J. M. (1993). Turning geothermal waste into glasses and glass ceramics. *American Ceramic Society Bulletin*, 72(10), 81-82
8. Diaz, C., Rincon, J. M., Riciclo di Scarti di sílice da centrale elettrica geotermica per la produzione di ceramici silicatici, *Ceramurgia*, 12-15, (1996).
9. Valenzuela, D., Diaz, C., Avalos-Borja, M., Sinterization of doping mullite with rare earths using a silica rich residue from a geothermal power plant, *Engineering Materials vols. 132-136* (1997) pp. 1862-1865, European Ceramic Society, (1997).
10. Diaz, C. , Formulation of Zircon refractory using silicic residue from a geothermal power plant as intergranular cement, *Engineering Materials vols. 132-136* (1997) pp. 2284-2288, European Ceramic Society, Francia (1997).
11. C. Diaz, F.J. Valle-Fuentes, Use of silicon residue en ceramic and glass, *American Ceramic Society Bulletin*, 78(8), 112-115.
12. Diaz, C., Gracia, H., Zayas, M. E., Espinoza, F. J., & Valle-Fuentes, F. J. (2000). Producing optical glass with geothermal waste. *American Ceramic Society bulletin*, 79(3), 57-59.



13. Díaz, C., Salgado, S., Jordan, R., Cruz, E., & Zayas, M. E. (2003). GLASS-CERAMICS MADE FROM ANODISING PLANT INDUSTRIAL WASTE. Am. Ceram. Soc. Bull., 82(9), 4.
14. Díaz Trujillo, G. C., Ruiz, R., Haro Vazquez, M. P., Carrillo Cedilla, E. G., Wakida, F. T., & Zayas Saucedo, M. E. (2008). Inorganic galvanic waste added to glass-ceramic affects crystallization process. AMERICAN CERAMIC SOCIETY BULLETIN, 87(6), 9201-9203.
15. Hernandez, Raul. Tecnologías de Regeneración de cuencas para la obtención de Agua. El programa Agua para Siempre. Publicado 2004. Recuperado el día: 22/11/15
URL:<http://www.alternativas.org.mx/Regeneracion%20de%20cuencas.pdf>
16. Alba, Fernando. Leton, Pedro. Rosal, Pedro. Dorado Miriam. Villar, Susana. Sanz, Juana. Vt Miod. Tratamientos avanzados de aguas residuales. Capitulo 1. Marco Legal y características de las aguas residuales industriales. Recuperado el día: 14/11/2015
URL:http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/VT2_Tratamientos_avanzados_de_aguas_residuales_industriales.pdf
17. UNESCO. Hecho:36. Gran parte de las aguas residuales industriales se vierten sin tratamiento en los cursos de agua abiertos, lo cual reduce la calidad de mayores volúmenes de agua. Recuperado el día: 15/11/15 URL: <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact-36-industrial-wastewater/http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact-36-industrial-wastewater/>
18. Autor Desconocido. La contaminación industrial del agua; causas, consecuencias y datos. Recuperado el día: 15/11/15
URL:<http://actualidad.notizalia.com/cambio-climatico/la-contaminacion-industrial-del-agua-causas-consecuencias-y-datos/>
19. Simon, E. Grupo de Fisicoquímica de Procesos Industriales y Medioambientales, FQPIMA. Universidad Complutense de Madrid. Los metales pesados en las aguas residuales. Recuperado el día: 02/11/15
URL:<http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2008/02/02/83698>
20. Sin Autor. Lección 17. Procesos de adsorción. Recuperado el día: 07/11/15
URL:<http://www.agua.uji.es/pdf/leccionHQ17.pdf>
21. Sin Autor. Propiedad de QuimiNet. El uso de dióxido de silicio en la industria. Publicado el día: 31/04/10 Recuperado el día: 10/10/15
URL: <http://www.quiminet.com/articulos/el-uso-del-dioxido-de-silicio-en-la-industria-42402.htm>
22. Autor de QuimiNet. Los dos principales tipos de sílice. Recuperado el día: 13/10/15



- URL: [://www.quiminet.com/articulos/los-dos-principales-tipos-de-silices-2782524.htm](http://www.quiminet.com/articulos/los-dos-principales-tipos-de-silices-2782524.htm)
23. Autor desconocido. Ciencia e Ingenieria de Materiales. Capitulo 2 - Estructura Atomica. Recuperado el día: 16/10/15
URL: <http://es.slideshare.net/almendraprado3/askelandphulenotes-ch02printable-1>
24. Autor desconocido. Universidad Carlos III de Madrid. Bloque V. Materiales Ceramicos. Sílice y Silicatos. Recuperado el día: 15/10/15
URL: <http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/tecnologia-de-materiales-industriales/bloque-v/Tema15-Silice-Silicatos.pdf>
25. Autor Desconocido. Sílice. Recuperado: 15/10/15
URL: <http://aetox.es/wp-content/uploads/2009/04/silice.pdf>
26. Sin autor definido. 100ciaquimica. Ciencia Quimica. Tabla periódica y propiedades físicas y químicas. Radio atómico e iónico. Recuperado el día: 18/10/15
URL: <http://www.100ciaquimica.net/temas/tema3/punto10e.htm>
27. Derpich, C. Pura Quimica. Acercando la quimica al mundo. Radio atomico y Radio ionico. Recuperado el día: 17/10/15
URL: <http://es-puraquimica.weebly.com/radios-atomico-e-ionico.html>
28. Sin Autor. Interacciones débiles en medios acuosos. My POV planet. Recuperado: 20/10/15
URL: <http://pov-planet.webnode.es/bioquimica/el-agua/interacciones-debiles-en-sistemas-acuosos/>
29. Olmo, M. Consideraciones sobre la energia del enlace quimico. Electronegatividad. Recuperado: 20/10/15
URL: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/chemical/bondd.html>
30. Autor Desconocido. Fuerzas de Van der Waals. Recuperado el día: 23/10/15
URL: <https://bioquibi.webs.ull.es/bioquimica%20estructural/Archivoszip/enlacsnovalentes/Fuerzas%20de%20Van%20der%20Waals.pdf>
31. Gonzales, M. Cursos de Biomoleculas. Fuerzas Intermoleculares. Recuperado el día: 18/10/15
URL: <http://www.ehu.eus/biomoleculas/moleculas/fuerzas.htm>
32. Autor Desconocido. Fuerzas Intermoleculares. Recuperado el día: 23/10/15
URL: http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/FuerzasIntermoleculares_11310.pdf
33. Gonzalez, Monica. Interaccion Ion - Dipolo. La guia. Publicado 20 de Septiembre 2010. Recuperado: 20/10/15
URL: <http://quimica.laguia2000.com/conceptos-basicos/interaccion-ion-dipolo>
34. Autor Desconocido. Elementos de Fisicoquímica UNEXPO. Recuperado el día: 20/10/15



- URL: <https://fisicoquimicaunexpo.files.wordpress.com/2009/08/fuerzas-intermoleculares.pdf>
35. Autor Desconocido. Kioskea. Dosis Letal Media- Definicion. Junio 2014. Recuperado el día: 22/05/15
URL:<file:///home/chronos/u-66c261b08f6bb2309f785e34cb7131ad432ed883/Downloads/dosis-letal-media-definicion-12755-mv116u.pdf>
 36. Autor Desconocido. Filtración en resumen. Recuperado el día: 17/05/15
URL:<http://www.acefesa.es/filtra/filtracion.pdf>
 37. Gamez, Catalina. Emilce,Ramirez. Determinacion de la concentracion Letal Media (CL50-48) del herbicida roundup 747 sobre ecosistemas acuaticos mediante pruebas toxicologicas con Daphnia magna. UNIVERSIDAD DE LA SALLE FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTA Y SANITARIA BOGOTÁ D.C 2008 Recuperado el día: 17/05/15
URL:<http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14062/T41.08%20G145d.pdf?sequence=1>
 38. Autor Desconocido. Equilibrio Químico. Principio de Le Chatellier. Fisquiweb. Recuperado el día: 17/05/15 URL:
<http://web.educastur.princast.es/proyectos/fisquiweb/Videos/EquilibrioQ/>
 39. Garcia, R. El principio de Le Chatelier. Recuperado el día: 17/05/15
URL: <http://www.unlu.edu.ar/~qgeneral/lechatlier.PDF>
 40. Wilson,B. Reducción del riesgo de la exposición al plomo. El compromiso de cooperación de la industria. The International Lead Management Center. Recuperado: 17/05/15 URL:
<http://www.ilmc.org/Workshops/Basel/Trinidad/Notes/Spanish/centro.html>
 41. Hamilton, A. Cooperación para el manejo adecuado de sus tancias químicas en América del Norte. En Breve. Recueperado el día: 17/05/15
URL: http://www.cec.org/Storage/43/3495_smocs_ES.pdf
 42. OCDE. Acerca de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos. Recuperado el día: 17/05/15
URL:<http://www.oecd.org/centrodemexico/laocde/>
 43. Semarnat. Convenio de Basilea. Modificado por Unidad Coordinadora de Asuntos Internacionales. Recuperado el día: 17/05/15
URL:<http://www.semarnat.gob.mx/temas/agenda-internacional/convenio-de-basilea>
 44. SEGOB. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Diaro Oficial de la Federacion. Recuperado: 12/05/15. URL:
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4881304&fecha=03/06/1998



45. Noticiero Televisa. Supervisan zona donde se derramó sulfato de cobre en Sonora. Noticia: 14/08/2015. Recuperado: 12/05/15
URL:<http://noticieros.televisa.com/mexico-estados/1408/supervisan-zona-donde-se-derramo-sulfato-cobre-sonora/>
46. Cisneros, Jose. Derrame en el río Sonora: lo que sabemos y lo que no sobre el caso. CNN Mexico. Noticia publicada el: 28 de agosto de 2014. Recuperado: 12/05/15.
URL:<http://mexico.cnn.com/nacional/2014/08/28/derrame-en-el-rio-sonora-lo-que-sabemos-y-lo-que-no-sobre-el-caso>
47. *Eróstegui, Carlos*. CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS. Rev Cient Cienc Méd v.12 n.1 Cochabamba 2009. Recuperado el día: 12/05/15
URL: http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1817-74332009000100013
48. Gonzalez, Diego. Cadmio. Recuperado el día: 12/05/15
URL: <http://www.bvsde.paho.org/texcom/cd051461/gonzalca.pdf>
49. William, J. Kolb, D. Química para el nuevo milenio. Octava Edicion 1999. pp 356-358.
50. PNUMA. Modulo 3. El uso del mercurio en la minería del oro artesanal y en pequeña escala. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2008. Recuperado el día: 12/05/15
URL:http://www.unep.org/chemicalsandwaste/Portals/9/Mercury/AwarenessPack/Spanish/UNEP_Mod3_Spanish_Web.pdf
51. Valverde, Carlos. Síndrome de Falconi. Presentacion de caso y revision de la literatura. Salud uninorte. Barranquilla. Col. 14(1) 14-22. 1999. Recuperado el día: 11/05/15
URL:
<http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/salud/article/viewFile/4210/2589>
52. Higuera, Pablo. Oyarzun, Roberto. Maturana, Hugo. Minería y toxicología. Universidad de Castilla la Mancha. Recuperado el día: 11/05/15
URL: http://www.uclm.es/users/higuera/mam/Mineria_Toxicidad4.htm#Cd
53. Sakurai, Kunitoshi. Contaminación de suelo por Cadmio en Japón. Contaminación y protección ambiental. 1982. Recuperado: 11/05/15
URL: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan2/012435/012435.pdf>
54. NIOSH. Mercury (organo) alkyl compounds (as Hg). Pocket Guide to Chemical Hazards. Recuperado el día: 11/05/15
URL: <http://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0384.html>
55. Castellan, Gilbert. Equilibrio en celdas electroquímicas; Electrodo de mercurio-óxido mercúrico. 1987 pg. Segunda Edicion 408.
56. Ramiro, Augusto. Intoxicación ocupacional por mercurio. American College of Occupational and Environmental Medicine. Scielo. An Fac med. 2008;69(1):46-51 Recuperado: 11/05/15



URL:<http://www.scielo.org.pe/pdf/afm/v69n1/a10v69n1.pdf>

57. EPA. Capitulo 15: Fungicidas. Recuperado: 11/05/15
URL:
<http://www.epa.gov/oppfead1/safety/spanish/healthcare/handbook/Spch15.pdf>
58. Sin Autor. Contaminacion por metales. Recuperado: 09/05/15
URL:http://www2.uah.es/tejedor_bio/bioquimica_ambiental/T11-metales.pdf
59. Sin Autor. Mapa en inglés de la ubicación de la Empresa Chisso y su relación con el río y bahía de Minamata. Wikipedia. Recuperado: 11/05/15
URL:http://es.wikipedia.org/wiki/Enfermedad_de_Minamata#/media/File:Minamata_map_illustrating_Chisso_factory_effluent_routes2.png
60. Gonzalez, Diego. Definiciones de interés en toxicología. Recuperado el día: 10/05/15
URL:
http://www.bvsde.paho.org/bvstox/e/cursos/peru_julio07/dia04/03_Gonzalez.pdf
61. Castillo, M. Elementos Esenciales en las plantas. Ciencia, Agricultura y Ecología. 2011. Recuperado el día: 03/05/15 URL:
<http://ecoloagro.blogspot.mx/2011/05/elementos-esenciales-en-las-plantas.html>
62. Sin Autor. ¿QUE ES EL EQUILIBRIO ECOLÓGICO?, Enciclopedia de Tareas. Recuperado el día: 04/05/15
URL:<http://www.encyclopediadetareas.net/2012/05/que-es-el-equilibrio-ecologico.html>
63. Lenntech Elementos químicos ordenados por su abundancia. 1998-2015. Recuperado el día: 03/05/15
URL:<http://www.lenntech.es/tabla-peiodica/abundancia.htm>
64. Sin autor. 3. Introduccion, 3.1 Contaminacion por metales pesados. Recuperado el día: 28/04/15
URL:http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lbi/lobos_s_vn/capitulo3.pdf
65. A, Steven. F, Beck. P, Clark. A, Keeley. R, Ludwig. R, Ross. R, Wilkin. EPA: NRMLM, Performance Evaluation of Organic Carbon Substrate and Limestone-Based PRB for Treatment of Heavy Metals, Arsenic, and Acidity. Recuperado el día: 03/05/15.
URL:http://www.epa.gov/ada/gw/pdfs/research_02.pdf
66. Sin Autor. EPA. Heavy Metals Removal from Contaminated Water Solutions. Recuperado el día: 03/05/15
URL:http://cfpub.epa.gov/ncer_abstracts/index.cfm/fuseaction/display.abstractdetail/abstract/5291/report/0



67. Sin Autor. III La Litosfera, metales y metalurgia. Recuperado el día: 25/04/15
URL:http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/097/htm/sec_9.htm
68. Chang, R. Química. Mc Hill. Séptima Edición. 2002.
69. Sin Autor. Contaminación del agua por metales. Centro Virtual de Información del Agua. Recuperado el día: 25/04/2015
URL:http://www.agua.org.mx/h2o/index.php?option=com_content&view=article&id=3218:contaminacion-del-agua-por-metales&catid=1291:saneamiento-basico&Itemid=100148
70. Sin Autor. Metales Pesados. INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO, MÉXICO - ALGUNOS DERECHOS RESERVADOS © 2012 - POLÍTICAS DE PRIVACIDAD. Recuperado: 25/04/15 URL: <http://www.inecc.gob.mx/sqre-temas/763-aqre-metales>
71. Sin Autor. 10.3 Producto de solubilidad. Recuperado el día: 25/04/2015
URL: <http://www.100ciaquimica.net/temas/tema10/punto3.htm>
72. Green, Arnold. Clesceri, Leonore. Eaton, Andrew. Standar Methods, For the Examination of water an wastewater. APHA AWWA WEF 18th Edition 1992
73. Mejía, Cecilia Metales Pesados en Suelos y plantas, Contaminacion y Fitotoxicidad. Universidad Nacional Jose Faustino Sanchez Carrion. 2011
Recuperado el día: 11/04/15
URL:<http://es.scribd.com/doc/204360496/METALES-PESADOS-EN-SUELOS-Y-PLANTAS-CONTAMINACION-Y-FITOTOXICIDAD#scribd>
74. Canter, Larry. Manual de evaluación de impacto ambiental, Técnicas para la elaboración de estudios de impacto. Segunda edición. Editorial Mc Graw Hill. Madrid. 2000
75. Tamayo, Juan. Saneamiento, Tijuana y Playas de Rosarito. Sin Fecha. Recuperado el día: 05/11/2014. URL: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/P2-Saneamiento%20en%20Tijuana%20y%20Playas%20de%20Rosarito,%20Baja%20California.pdf>
76. Sin Autor. Ministerio de la Presidencia, REAL DECRETO 1620/2007. BOE núm. 294; 2007.
URL: <https://www.boe.es/boe/dias/2007/12/08/pdfs/A50639-50661.pdf>
77. Sin Autor. Ministerio de la Presidencia, REAL DECRETO 1620/2007. BOE núm. 294; 2007.
URL: <https://www.boe.es/boe/dias/2007/12/08/pdfs/A50639-50661.pdf>
78. Sin Autor. Analisis de agua – Determinacion de la Conductividad electrolítica – Metodo de Prueba 77. NMX-AA-093-SCFI-2000. Secretaria de comercio y fomento industrial. 2000. Recuperado el día: 28/11/2014.
URL: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/NMX-AA-093-SCFI-2000.pdf>



79. Gonzalez, Carmen. Monitoreo de la calidad del agua, 2 La turbidez. Servicio de Extensión Agrícola. 2011. Recuperado el día: 16/09/2014.
URL: <http://academic.uprm.edu/gonzalezc/HTMLobj-859/maguaturbidez.pdf>
80. Jimenez, Blanca. Beltran, Norma. Eficiencia de la luz ultravioleta para la desinfección del agua residual con alto contenido de patógenos. Instituto de Ingeniería. Grupo de Tratamiento y Reúso Universidad Nacional Autónoma de México. sin fecha. Recuperado el día: 25/10/2014
URL: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/mexicon/R-0071.pdf>
81. Muñoz, Amilcar. Caracterización de tratamiento de aguas residuales. Universidad Autónoma de Hidalgo. Monografía. Capítulo 2, pp. 89. 2008. Recuperado el día: 11/10/2014
URL: <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/231104/514/1/Caracterizacion%20y%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales.pdf>
82. Hernandez, Aurelio. Galan, Pedro. Sistemas de control: Manual de depuración de Uralita. Recuperado el día: 11/10/2014
URL: http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/simulacion/modulos/Libros/uni_02/libro4/control.pdf
83. Muñoz, Amilcar. Caracterización de tratamiento de aguas residuales. Universidad Autónoma de Hidalgo. Monografía. Capítulo 3, 2008. Recuperado el día: 11/10/2014
URL: <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/231104/514/1/Caracterizacion%20y%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales.pdf>
84. Izquierdo, Georgina. Aragon, Alfonso. Portugal, Enrique. Arellano, Victor. De león, Jesus. Alvarez, Julio. Mineralogía de la zona mineralizada de sílice-epidota (ZMSE) del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto, B.C., México. Geotermia, Vol. 19, No. 2, 2006. Recuperado el día: 12/11/2014.
URL: <http://132.248.9.34/hevila/Geotermia/2006/vol19/no2/1.pdf>
85. Autor desconocido. Capítulo I. Sin Fecha. Recuperado el día: 12/10/2014.
URL: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/3148/Capitulo1.pdf>
86. Diaz, Cesar. Tratamiento químico de la escoria de sílice de una planta geotérmica para su aplicación en cerámica y vidrio. BOLSOC.ESP.CERAM.VIDR. 29, 3, 18J-184. 1990. Recuperado el día: 01/12/2014.
URL: <http://boletines.secv.es/upload/199029181.pdf>
87. Sin Autor. Sinergia; Definicion.de. 2014 Recuperado el día: 01/12/2014.
URL: <http://definicion.de/sinergia/>
88. COM 2007. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo y al Consejo. Afrontar el desafío de la escasez de agua y la sequía en la Unión Europea. COM (2007) 414 final.
89. Fernandez, Amadeo. Malato, Sixto. Gomez, Maria del Mar. Carbonell, Gregoria. Fernandez Carlos. Porcel, Miguel. Pro, Francisco. Contreras, Mariano. Cresco, Juan. Jacquin, Catherine. Elorrieta, Maria. Consolidar tragua. Ejemplos Practicos de Reutilizacion de agua



residual tratada y regenerada para el riego de cultivos. Evaluacion de Riesgo
Recuperado el día : 03/09/2014
http://www.consolider-tragua.com/documentos/ejemplos_practicos_riego.pdf

90. De Bustamante, I, Cabrera, M.C, Candela, L, Lillo, J y Palacios, MP. LA REUTILIZACIÓN DE AGUAS REGENERADAS EN ESPAÑA: EJEMPLOS DE APLICACIÓN EN EL MARCO DEL PROYECTO CONSOLIDER-TRAGUA. Aqua-LAC - Vol. 2 - Nº 1. pp. 1- 17, 2010. Recuperado el día: 03/09/2014
http://www.unesco.org.uy/ci/fileadmin/phi/aqualac/Bustamante_et_al.pdf
91. Bustamante,I. Ramos, J. Segura, M. Iglesias, J. Gomez, D. Ortiz, I. Carreño, F. Bienes, R. Martín, T. Marquez, A. Gil, J. Martín, S. Carenas, S. Carenas, B. Salas, J. De Miguel , A. Leal, M. Martín, I. García, R. Martínez, V. Adaptacion de los filtros verdes: De estaciones depuradoras de agua (EDAR) a estaciones de regeneracion y reutilizacion de aguas depuradas (ERRAD). Sin Fecha. Recuperado el día: 03/09/2014
URL:<http://www.consolider-tragua.com/eventos/ADECAGUA/COMUNICACIONES/R1-BUSTAMANTE.pdf>
92. Cabrera, M. Palacios, M. Estevez, E. Cruz, T. Hernandez, J. La reutilización de aguas regeneradas para riego de un campo de golf: evolución geoquímica y probable afección a un acuífero volcánico (Islas Canarias). Boletín Geológico y Minero, 120 (4): 543-552. 2009. Recuperdo el día: 05/09/2014
URL: http://www.igme.es/Boletin/2009/120_4_2009/5-ARTICULO%203.pdf
93. Ortuño, Felip. Niñero, Josep. Fraile, Josep. Juarez, Iker.BARRERA HIDRÁULICA CONTRA LA INTRUSIÓN MARINA EN EL ACUÍFERO PRINCIPAL DEL DELTA DEL LLOBREGAT (BARCELONA): PRIMERA FASE . Sin fecha.
Recuperado el día: 05/09/2014
URL:
http://www.arena.com/public/uploads/Articulo_Barrera_es_1271689849.pdf
94. RD 1620/2007 de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de reutilización de las aguas depuradas. BOE nº 294, sábado 8 de diciembre de 2007.
95. Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua . Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas Capitulo 18. TECNOLOGÍAS INNOVADORAS EN LA REGENERACIÓN Y REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES Recuperado el día: 23/10/14 URL:
http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda/pdfs/Capitulo_18.pdf
96. Aguado, Jose Regeneracion y reutilizacion de las aguas : Actuaciones en las EDAR de España. 2010. Recuperado el día: 16/09/2014
URL: <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2010/03/15/131429>
97. Aguado, Jose Tratamiento y reutilizacion de aguas residuales mediante humedales: Alternativa ecologica para poblaciones con problemas de abastecimiento. 2009. Recuperado el día: 16/09/2014
URL: <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2009/04/02/115734>



98. Garcia, Juan. Universidad de Salamanca. Regeneracion y reutilizacion del agua. Sin fecha. Recuperado 15/10/2014 URL: <http://cidta.usal.es/formacion/Reutilizacion.pdf>
99. Sanz, Joan. De Regeneracion basica a regeneracion avanzada: Tecnologia y calidad del agua regenerada. 2013. Recuperado: 19/09/2014 URL:<http://www.iagua.es/blogs/veolia-water/de-regeneracion-basica-regeneracion-avanzada-tecnologia-y-calidad-del-agua-regenerada>
100. Grupo E3. Catedra Unesco de Territorio y medio ambiente, Universidad Rey Juan Carlos. La regeneración de aguas residuales en el sector industrial español. Recuperado: 15/09/14 URL: <http://www.consolider-tragua.com/documentos/ALICANTE/POSTERS/E/POSTER%20E3.pdf>
101. Jovés, Joan. Navaz , Alfredo. Trillo, Juan. Riera, Simón. Sanz, Joan. Ortega, Juan. Mujeriego, Rafael. Regeneración de Aguas para la Industria: Proyecto de Demostración de El Camp de Tarragona Sin fecha. Recuperado: 10/10/14 URL:<http://www.veoliawatertechnologies.es/vwst-iberica/ressources/documents/1/6286,Regeneraci%C3%B3n-de-Aguas-para-la-Indus.pdf>
102. Sanz, Joan. Guerrero, Leopoldo. Ortega, Juan. VEOLIA Water Systems Iberica. Direccion Tecnica. Reutilizacion de aguas residuales: Un recurso alternativo. Tratamiento de regeneración. Sin fecha. Recuperado: 10/10/14 URL:<http://www.veoliawatertechnologies.es/vwst-iberica/ressources/documents/1/6207,Reutilizaci%C3%B3n-de-aguas-residuales.pdf>
103. Marrero, Ignacio del Rio. Centro de Estudios Hidrograficos del CEDEX. Tendencias e inovacion en los tratamientos de depuración y regeneración de agus residuales. Sin fecha. Recuperado: 06/11/14 URL:http://www.coiim.es/rrii/descargas/jornadasyconferencias/innovacion_medioambiente/idelrio.pdf
104. Sotelo, J. Ovejero, G. Rodríguez, A. Mestanza, M. Álvarez, S. García, J. Tecnologías de tratamiento de aguas para su reutilización. Capitulo 6. Adsorción con nuevos materiales pp. 169, 2010. Recuperado: 18/10/14 URL:http://www.consolider-tragua.com/documentos/Tecnologias_tratamiento_agua.pdf
105. Seguí, Luis. Politecnica de Cataluña. Sistemas de regeneracion y reutilizacion de aguas residuales. Metodologia para el analisis tecnoci-económico y casos. 2003. Recuperado: 27/10/14 URL:http://www.cibernetia.com/tesis_es/CIENCIAS_TECNOLOGICAS/INGENIERIA_Y_TECNOLOGIA_DEL_MEDIO_AMBIENTE/TECNOLOGIA_DE_AGUAS_RESIDUALES/2#sthash.XqtnR9Mz.dpuf
106. Urtiaga, R. Ibáñez, I. Ortiz, J.L. Acero, F. Teva y F.J. Benítez. Tecnologías de tratamiento de aguas para su reutilización. Capítulo 7. Tecnología de membranas: ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa. pp. 183, 2010.



Recuperado: 18/10/14 URL:http://www.consolider-tragua.com/documentos/Tecnologias_tratamiento_agua.pdf

107. Adewumi, J. Llemobade, A. Van Zyl, J. Factors predicting the intention to accept treated waste water reuse for non-potable uses amongst domestic and non-domestic respondents. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*. Vol 56. No 1. pp 11-19. 2014
108. Andrade, L Covelo, E.F, Vega F.A Uso de arcillas especiales para depuración de aguas residuales. *Información tecnológica* - Vol. 16 N.1 - 2005 pages 3-10
109. Vaca, Mabel. Magdaleno, Laura. Sosa, Mónica. Monroy, Magdalena. Jiménez, Blanca. Tratamiento terciario de aguas residuales por filtración e intercambio iónico. Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco - Instituto de Ingeniería, UNAM. Sin fecha. Recuperado: 24/11/14 URL:<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/mexico/01126e14.pdf>
110. Zamzow, M. J., Murphy, J. E., "Removal of heavy metals and other cations from wastewater using zeolites", *Separation Science and Technology*, Vol. 25, No.13-15, 1555-1569, 1990.
111. Acevedo, Diana. Builes, Sandra. Ordoñez, Carlos. Lopez, Idalia. Evaluation of efficiency of a filter battery packaging zeolite in the removal of heavy metals in a mixed liquor under laboratory conditions. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*. Vol 10, No 18 pp. 31-4, 2011.
112. Abo-Ghander, N.S Rahman, S.U Zaidi, S.M A modified electrodialytic cell to recover heavy metals from wastewater. *Portugaliae Electrochemica Acta* 24, 367-376, 2006.
113. Martínez, Carlos Andrade, Leonardo Electrocatalysis in wastewater treatment: Recent Mechanism advances *Quim. Nova*, Vol 34. No. 5, 850-858, 2011.
114. Rodrigo, Manuel. Cotillas, Salvador. Llanos, Javier. Miranda, Oscar. Díaz, Gerardo. Coupling UV irradiation and electro-coagulation for reclamation of urban wastewater. *Electrochimica Acta*, 2014.
115. Quezada, Romina. Villa, María. Varela, Eliana. James, Craik. Rosa, Miguel. Tratamientos de aguas residuales provenientes de la curtiembre por vía electroquímica, 2010. Recuperado: 02/10/14 URL:http://www.edutecne.utn.edu.ar/cytal_frm/CyTAL_2010/Trabajos%20y%20Prologo/Trabajos%20CyTAL%202010/TF%20-%20002%20-%2020Tratamientos%20de%20Aguas%20Residuales.pdf
116. Hernández, Ivonne. Martínez, Verónica. Barrera, Carlos. Pavón, Sergio. Bernal, Lina. Lugo, Violeta, Lugo. OXIDACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA PERSISTENTE EN AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES MEDIANTE TRATAMIENTOS ELECTROQUÍMICOS. *ACI: VOL. 2(1)*, pp. 21-36, 2011. Recuperado: 16/09/14 URL:<file:///C:/Users/Laboratorio/Downloads/DialnetOxidacionDeMateriaOrganicaPersistenteEnAguasResidu-3624174.pdf>
117. Sáez, Cristina Universidad de Castilla la Mancha. Oxidación Electroquímica de Aguas Residuales con Ánodos de Diamante Dopado con Boro. 2004. Recuperado: 07/10/14



URL:http://www.cibernetia.com/tesis_es/CIENCIAS_TECNOLOGICAS/INGENIERIA_Y_TECNOLOGIA_DEL_MEDIO_AMBIENTE/TECNOLOGIA_DE_AGUAS_RESIDUALES/1

118. Mariz, Medeiros. Hernández, Aurelio. Lehmann, Aurelio. Lucas, Manoel. *Electrooxidación del amonio en aguas residuales domésticas*. "TecnoAmbiente : Revista profesional de tecnología y equipamiento de ingeniería ambiental" No.215. ISSN 1133-4665, 2011.
119. García, Jesús. Tratamiento electroquímico de aguas residuales fenólicas. Universidad de Castilla la Mancha, 2002. Recuperado: 15/09/14
URL:http://www.cibernetia.com/tesis_es/CIENCIAS_TECNOLOGICAS/INGENIERIA_Y_TECNOLOGIA_DEL_MEDIO_AMBIENTE/TECNOLOGIA_DE_AGUAS_RESIDUALES/2#sthash.XqtnR9Mz.dpuf
120. Palma, Ricardo. Uribe, Juliana. González, Ignaci. Torrez, Ricardo. Tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria textil mediante oxidación electroquímica. pp. 93 – 108, 2013. Recuperado: 26/09/14
URL:<http://aprendeenlinea.udea.edu.co/revistas/index.php/materiales/article/view/15085/13162>
121. Reyes, Julia. Vazquez, Mario. Electrochemical Remediation at laboratory scale of the coal dump in Paz de Rio (Colombia) Portugaliae Electrochimica Acta, 27 (3), 409-417, 2009.
122. López, Gonzalo. Vargas, Aida. Gutiérrez, María. Ramírez, Rosa. Durán, Alfonso. Oxidación fotoelectrocatalítica de fenol y de 4-clorofenol con un soporte de titanio impregnado con TiO₂. Rev. Int. Contam. Ambie. 27 (1) 75-84, 2011.
123. Patiño, Kelly. Arroyave, Sandra. Marín, Juan. Oxidación electroquímica y ozonización aplicadas al tratamiento de aguas de lavado de la producción de biodiesel. Información Tecnológica Vol 23. No. 2, 2012.
124. Sarria, Víctor. Parra, Sandra. Rincón, Ángela. Torres, Ricardo. Pulgarín, César. Nuevos sistemas electroquímicos y fotoquímicos para el tratamiento de aguas residuales y de bebida. Revista colombiana de química, Volumen 34, No. 2, 2005.
125. Luz, Quintanilla Suárez, Francisco. Fuente de calor en el campo geotérmico de Cerro Prieto y su relación con la anomalía magnética Nuevo León, México. Geofísica internacional. Vol.33 Nym. 4 pp 575-584, 1994.
126. Barragán, Rosa Arellano, Víctor Portugal, Enrique Vivar, Jesús de León. Equilibrio gaseoso en el sector CP IV del campo geotérmico Cerro Prieto, B. C., México. Boletín IIE, 2007.
127. Quijano, J. Gutiérrez, L. Geothermal production in Mexico in the year 2000. Geothermal Resources Council Transactions. 25, pp. 593-596, 2011. Recuperado el día: 07/11/14
URL: <http://www.iie.org.mx/boletin022007/apli1.pdf>



128. Espinosa, Hector Moosek, Federico EL POZO M-3 DEL CAMPO GEOTÉRMICO DEL CERRO PRIETO, B. C, MÉXICO. Boletín de la asociación mexicana de geólogos petroleros Vol. XVI. Núms. 7-8. Sin fecha. Recuperado el día: 05/11/14
URL: http://www.amgp.org/ws/articulos/1964/1964_Jul_Ago_03.pdf
129. Autor Desconocido CFE Proyecto Goetermoelectrico Cerro Prieto V. Sin fecha. Recuperado: 23/10/14
URL: <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/bc/estudios/2007/02BC2007E0001.pdf>