

**ESTUDIO DE UN METODO FISICOQUIMICO ALTERNATIVO PARA LA
REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA DEL LIXIVIADO PROVENIENTE DEL
RELLENO SANITARIO “EL CARRASCO”**

SILVIA CAROLINA RIOS MADIEDO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUIMICA
BUCARAMANGA
2006**

**ESTUDIO DE UN METODO FISICOQUIMICO ALTERNATIVO PARA LA
REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA DEL LIXIVIADO PROVENIENTE DEL
RELLENO SANITARIO “EL CARRASCO”**

SILVIA CAROLINA RIOS MADIEDO

Trabajo de grado para optar al título de Químico

Director:

Msc. JOSE CARLOS GUITERREZ G.

Profesor UIS

Co-Directores:

Dr. EDGAR FERNANDO CASTILLO

Director CEIAM

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE QUIMICA

BUCARAMANGA

2006

*A mi princesita Paula que es la luz de mis
ojos, a mi esposo Wilson que siempre me
ha apoyado a mi Madre y mi Padre por
todo su amor y a mis hermanos Claudia,
Lina, Enrique y Jhon que han estado
conmigo siempre*

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis agradecimientos a las siguientes personas que permitieron que este proyecto se pudiera realizar:

JOSÉ CARLOS GUTIÉRREZ Químico y Director del proyecto, por sus consejos y su gran apoyo incondicional.

Dr. EDGAR FERNANDO CASTILLO, co-director del proyecto de la investigación y director del Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales por su aporte científico y confianza.

JANNET QUINTERO Químico y directora del Laboratorio de Aguas del Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales por sus aportes a este trabajo.

A mis compañeros del laboratorio por apoyarme y estar conmigo en el transcurso de mis logros.

CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCIÓN	21
1. MARCO TEORICO	23
1.1 Residuos sólidos	23
1.2 Clasificación de las basuras	24
1.3 Métodos de disposición final	25
1.3.1 Botadero a campo abierto	25
1.3.2 Incineración	25
1.3.3 Compost	26
1.3.4 Reutilización y reciclaje	26
1.3.5 Relleno sanitario	26
1.4 Lixiviado	27
1.4.1 Tratamientos de lixiviados	27

1.4.2 Etapas de tratamiento	28
1.4.2.1 Regulación del pH	28
1.4.2.2 Sedimentación-decantación	29
1.4.2.3 Oxidación-reducción	29
1.4.2.4 Floculación-coagulación	29
1.4.2.5 Sedimentación	35
1.4.2.6 Precipitación química	35
1.4.2.7 Filtración	35
1.4.2.8 Adsorción por carbón	35
1.4.3 Tratamiento biológico	36
1.4.3.1 Reactores batch secuenciales	36
1.4.3.2 Discos biológicos rotativos	36
1.4.4 Parámetros fisicoquímicos que se evalúan	37
1.4.4.1 Turbiedad	37
1.4.4.2 Color	37

1.4.4.3 Sólidos	37
1.4.4.4 Demando química de oxígeno	39
2. Estado del arte	40
2.1 Situación actual de los lixiviados	40
2.2 Situación Colombiana en el tratamiento del lixiviado	43
2.2.1 Resolución No 1074 de 1997	43
2.3 Manejo del lixiviado en el departamento de Santander	44
2.4 Manejo del lixiviado en el municipio de Bucaramanga	45
2.5 Recopilación histórica de los monitoreos realizados por el CEIAM	46
3. Metodología	51
3.1 Muestreo para lixiviado	51
3.2 Preservación en la toma de la muestra	52
3.3 Parámetros y técnicas analíticas a utilizar	53
3.3.1 Técnicas analíticas	54
3.4 Segunda etapa	55

3.4.1 Prueba de jarras	55
3.4.1.1 Descripción, materiales, reactivos utilizados en el test de jarras	55
3.4.2 Oxidación	60
3.4.3 Coagulación-floculación	61
3.4.4 Neutralización	61
4. Análisis de resultados	63
4.1 Muestreo para lixiviado	63
4.2 Método utilizado en la toma de muestra	63
4.2.1 Realización del monitoreo	63
4.2.2 Preservación de la muestra	63
4.2.3 Características físicas y químicas	64
4.2.4 Test de jarras	69
4.2.5 Oxidación	69
4.2.6 Coagulación-Floculación	74
4.2.7 Neutralización	78

4.3 Análisis de los datos para la oxidación y coagulación / floculación	79
4.3.1 Resultados y discusiones	80
4.4 Eficiencia del tratamiento fisicoquímico	91
4.4.1 Determinación de metales	91
4.4.2 Determinación de porcentaje de remoción	94
5.0 Comparación del tratamiento propuesto con otros a nivel de laboratorio	98
BIBLIOGRAFÍA	103
ANEXOS	

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Comparación química de un lixiviado de un relleno sanitario y un agua doméstica.	42
Tabla 2. Normas de vertimiento a un cuerpo de agua	44
Tabla 3. Procesos diseñados para el tratamiento de lixiviado en los rellenos sanitarios	45
Tabla 4. Principales compuestos orgánicos encontrados en el estudio de cromatografía (GC/MS) al lixiviado generado en “El Carrasco”	48
Tabla 5. Concentración de los principales metales encontrados en el lixiviado de “El Carrasco”	49
Tabla 6. Parámetros de calidad del agua realizados al lixiviado que se produce en el sitio de disposición final “El Carrasco”	50
Tabla 7. Preservantes utilizados para el análisis de lixiviados	53
Tabla 8. Parámetros a determinar y técnicas a emplear	54
Tabla 9. Parámetros de pruebas de jarras	59

Tabla 10. Parámetros analizados en el lixiviado proveniente del Carrasco reportados durante los tres meses del muestreo	68
Tabla11. Valores de P y R^2 calculados por el Statgraphics en la etapa de la oxidación	85
Tabla 12. Valores de P y R^2 calculados por el Statgraphics en la etapa de la coagulación-floculación	89
Tabla 13. Condiciones de trabajo para Espectrofotometría de Absorción atómica (Laboratorio del CEIAM Guatiguara)	87
Tabla 14. Metales encontrados en la parte líquida + sólido en el tratamiento físico-químico propuesto	88
Tabla 15. Parámetros que se compararon según la norma después del tratamiento fisicoquímico propuesto	94
Tabla 16. Ventajas y desventajas de los métodos propuestos	99
Tabla 17. Comparación del tratamiento fisicoquímico realizado con otros	100

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Prueba de floculación / coagulación en el test de jarras mecánico	60
Figura 2. pH del lixiviado proveniente del Carrasco reportado en los tres muestreos realizados	64
Figura 3. Temperatura del lixiviado reportado en los tres muestreos realizados	65
Figura 4. Color del lixiviado reportado en los tres muestreos realizados	65
Figura 5. Sólidos totales del lixiviado reportado en los tres muestreos realizados	66
Figura 6. Turbidez del lixiviado reportado en los tres muestreos realizados	67
Figura 7. Demanda química de oxígeno del lixiviado reportado en los tres muestreos realizados	67
Figura 8. Porcentaje de remoción de color, turbidez, sólidos y DQO vs. Concentración de KMnO_4 a pH 5	69

Figura 9. Porcentaje de remoción de color, turbidez, sólidos y DQO vs. Concentración de KMnO_4 a pH 6.0	71
Figura 10. Porcentaje de remoción de color, turbidez, sólidos y DQO vs. Concentración de KMnO_4 a pH 6.5	71
Figura 11. Porcentaje de remoción de color, turbidez, sólidos y DQO vs. Concentración de KMnO_4 a pH 7.0	72
Figura 12. Oxidación con KMnO_4 a pH 5.5	73
Figura 13. Porcentaje de remoción de color, turbidez, sólidos y DQO vs. Concentración de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ a pH 5	74
Figura 14. Porcentaje de remoción de color, turbidez, sólidos y DQO vs. Concentración de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ a pH 5.5	75
Figura 15. Porcentaje de remoción de color, turbidez, sólidos y DQO vs. Concentración de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ a pH 6.0	76
Figura 16. Floculación-coagulación con $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ a pH 5.5	78
Figura 17. Valores observados vs. valores predichos por la variable Color final	81
Figura 18. Valores observados vs. valores predichos por la variable Turbidez final	82

Figura 19. Valores observados vs. valores predichos por la variable Sólidos finales	82
Figura 20. Valores observados vs. valores predichos por la variable DQO final	83
Figura 21. Valores observados vs. valores predichos por la variable A. Color final	86
Figura 22. Valores observados vs. valores predichos por la variable A. Turbidez final	87
Figura 23. Valores observados vs. valores predichos por la variable A. Sólidos finales	88
Figura 24. Valores observados vs. valores predichos por la variable A. DQO final	89
Figura 25. Remoción de algunos parámetros del lixiviado después del tratamiento fisicoquímico propuesto	93
Figura 26. Remoción de sólidos del lixiviado después del tratamiento fisicoquímico propuesto	95

LISTA DE ANEXOS

	Pag.
ANEXO 1. Resultados de oxidación del lixiviado proveniente del relleno sanitario el “Carrasco”	98
ANEXO 2. Resultados de floculación-coagulación del lixiviado proveniente del relleno sanitario el “Carrasco”	99
ANEXO 3. Resultados de floculación /coagulación del lixiviado proveniente del relleno sanitario el “Carrasco”	100
ANEXO 4. Regresión múltiple A. Color	101
ANEXO 5. Regresión múltiple A. Turbidez	103
ANEXO 6. Regresión múltiple A. Sólidos	105
ANEXO 7. Regresión múltiple A. DQO	107
ANEXO 8. Regresión múltiple B. Color	109
ANEXO 9. Regresión múltiple B. Turbidez	110
ANEXO 10. Regresión múltiple B. Sólidos	111
ANEXO 11. Regresión múltiple B. DQO	112

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO DE UN METODO FISICOQUIMICO ALTERNATIVO PARA LA REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA DEL LIXIVIADO PROVENIENTE DEL RELLENO SANITARIO “EL CARRASCO”¹

AUTOR: Silvia C. Rios M². José C. Gutiérrez.³

PALABRAS CLAVES:

Lixiviado, Relleno sanitario, Oxidación, Floculación, Coagulación

El relleno sanitario el Carrasco ubicado en el departamento de Santander, municipio de Bucaramanga, cuenta actualmente con un problema ambiental debido a que el lixiviado generado en éste es descargado a la quebrada “La Iglesia” sin cumplir con la norma de vertimientos.

El trabajo se desarrolló para minimizar este impacto ambiental. Para ello se estudió, diseñó y evaluó un tratamiento fisicoquímico que consta de la oxidación de la materia orgánica presente usando permanganato de potasio, floculación-coagulación de la materia en suspensión usando sulfato de aluminio y neutralización con hidróxido de calcio.

Se analizó la remoción de los siguientes parámetros: Demanda química de oxígeno (DQO), color (UV-254 nm), turbidez y sólidos totales para evaluar la eficiencia del proceso.

Se consiguió obtener los siguientes porcentajes de remoción : DQO 89.1%, turbidez 89.69%, color 94%, sólidos totales 52.42%.

¹ Trabajo se grado

² Centro de Estudios de Investigaciones Ambientales. Escuela de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Colombia. Calle 9 con carrera 27. pbx. 6344000.

³ silvin_rios@hotmail.com.co

SUMMARY

TITLE: STUDY OF An ALTERNATIVE PHYSICAL-CHEMICAL METHOD FOR THE REMOVAL OF ORGANIC FREIGHT OF THE LEACHED COMING FROM THE SANITARY FILLER THE CARRASCO"¹

AUTHOR: ²Silvia C. Ríos M. ³José C. Gutiérrez.

KEY WORDS:

Leached, sanitary Filler, Oxidation, Flocculation, Clotting

The sanitary filler the Carrasco located in the department of Santander, municipality of Bucaramanga, has an environmental problem at the moment because the leached generated in this is discharged to the gulch The Church without fulfilling the additive norm.

The work was developed to minimize this environmental impact. For it was studied it, it designed and it evaluated a physical-chemical treatment that consists of the oxidation of the matter organic present using permanganate of potassium, flocculation-clotting of the matter in suspension using aluminum sulfate and neutralization with lime.

The removal of the following parameters was analyzed: Demand oxygen chemistry (DQO), color (UV-254 nm), turbid and total solids to evaluate the efficiency of the process.

It was possible to obtain the following removal percentages: DQO 89.1%, turbid 89.69%, color 94%, solids total 52.42%.

¹ Project degree

² Investigations Ambiental Study Center. School of Chemistry, School of Sciences, Industrial University of Santander, Post air 678, fax: (7) 6344000. Bucaramanga. Colombia.

³silvin_rios@hotmail.com.co

INTRODUCCIÓN

Uno de los aspectos más engorrosos en la gestión integral de un vertedero de residuos sólidos urbanos (RSU), o de una instalación de tratamiento de los mismos es el lixiviado.

Los lixiviados pueden definirse como líquidos que al percolarse por las capas del suelo u otro material sólido permeable, van disolviéndolo en su totalidad todos o algunos de sus componentes (WINKLER, Michael. 1993)

Los lixiviados constituyen uno de los más complejos residuos líquidos existentes, tanto por su alto contenido de materia orgánica (medida como DQO y DBO₅), como por su contenido de metales pesados, sustancias tóxicas, sólidos en suspensión y disueltos, sales de amonio y sales disueltas monovalentes como los cloruros (URL 3).

El enorme potencial contaminante, tanto en términos de materia orgánica (principal causa de la eliminación del oxígeno en las fuentes de agua receptora) como de sustancias de interés sanitario, tóxicas, compuestos no biodegradables, cancerígenos y demás, hace imperativo el tratamiento de estos residuos líquidos.

Este tratamiento se convierte, por un lado, en una necesidad impostergable en un entorno urbano, y por otro lado un desafío tecnológico para su realización efectiva. Los lixiviados producidos en el Relleno Sanitario “El Carrasco” son difíciles de tratar debido a características tales como: composición físico-química y microbiológica,

contenido de materia orgánica, caudal, condiciones medioambientales del entorno, tipo de residuo sólido depositado, etc.

El objeto del presente proyecto es el desarrollo de un método físico-químico para la remoción de la materia orgánica que combinado con el tratamiento biológico existente en el relleno “El Carrasco”, disminuya el nivel de contaminación de los residuos y estos puedan ser descargados a la quebrada “La Iglesia” cumpliendo los normas de vertimientos.

1. FUNDAMENTO TEORICO

1.1 Residuos sólidos

Residuo sólido o desecho. Es cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales, de servicios, que el generador abandona, rechaza o entrega y que es susceptible de aprovechamiento o transformación en un nuevo bien, con valor económico o de disposición final. Los residuos sólidos se dividen en aprovechables y no aprovechables. Igualmente, se consideran como residuos sólidos aquellos provenientes del barrido de áreas públicas.

Relleno sanitario. Es el lugar técnicamente seleccionado, diseñado y operado para la disposición final controlada de los residuos sólidos, sin causar peligro, daño o riesgo a la salud pública, minimizando y controlando los impactos ambientales y utilizando principios de ingeniería, para la confinación y aislamiento de los residuos sólidos en un área mínima, con compactación de residuos, cobertura diaria de los mismos, control de gases y lixiviados, y cobertura final.

La problemática de los residuos sólidos está asociada con tres factores esenciales: El número de habitantes, la cantidad de basuras y el hecho de que no sean biodegradables. Estos tres factores conllevan a problemas estéticos, presencia de vectores de algunas enfermedades, roedores, desvalorización de los terrenos y edificaciones y otros.

1.2 CLASIFICACIÓN DE LAS BASURAS

El decreto 2104 de 1983 establece diferencia entre:

Desperdicio: Se entiende por desperdicio todo residuo sólido o semisólido de origen animal o vegetal, sujeto a putrefacción, proveniente de la manipulación, preparación y consumo de alimentos. (VILLEGAS 1995).

Desecho: Se entiende por desecho cualquier producto deficiente, inservible o inutilizable que su poseedor destina al abandono o del cual quiere desprenderse.

La clasificación del Cifra, Centro Internacional de Formación en Ciencias Ambientales con sede en Madrid, establece tres divisiones generales de las basuras y once ítem. (VILLEGAS 1995).

Material inerte:

1. Metales
2. Vidrio
3. Tierras y cenizas
4. Otros inertes

Materia fermentable:

5. Materia orgánica

Materia combustible

6. Papel
7. Carbón
8. Plástico
9. Madera
10. Caucho y cueros
11. Trapos.

1.3 MÉTODOS DE DISPOSICIÓN FINAL

1.3.1 Botadero a campo abierto. El botadero a campo abierto es el método más primitivo. No se requiere técnica alguna, sólo depositar la basura y formar grandes hacinamientos al aire libre.

1.3.2 Incineración. La incineración es el segundo método en antigüedad. Consiste en reducir el volumen y el peso de las basuras y transformarlas en material no combustibles eliminando de paso los problemas de vectores y olores desagradables.

1.3.3 Compost. El compost o composting, que se ha traducido como compostaje, es un método de disposición final muy antiguo. Se cree que el proceso surgió hace cerca de 4000 años en la China y en la India. Consiste en disponer la basura y someterla a un proceso de descomposición natural (aerobio, anaerobio). (VILLEGAS 1995).

1.3.4 Reutilización y Reciclaje. Aunque con frecuencia se emplean los dos términos como sinónimos, existen diferencias. En el reciclaje el desecho sirve como materia prima para un nuevo proceso de producción, tal es el caso del papel y la chatarra. En la reutilización se vuelve a utilizar el desecho sin tratamiento industrial previo, excepto al lavado, como ocurre con botellas de gaseosas o vidrio.

1.3.5 Relleno sanitario. Es un método de disposición final de basuras bastante antiguo y de los más recomendados por los expertos para emplear en Colombia.

El decreto 2104 de 1983 en su artículo 21: Se entiende por relleno sanitario de basuras la técnica que consiste en esparcirlas, acomodarlas y compactarlas al volumen más práctico posible, cubriéndolas diariamente con tierra y otro material de relleno y ejercer los controles requeridos al efecto. (VILLEGAS. 1995) .

1.4 LIXIVIADO

La descomposición o putrefacción natural de la basura, produce un líquido maloliente de color negro conocido como lixiviado o percolado, muy parecido a las aguas residuales domésticas, pero mucho más concentrado (URL7).

El lixiviado contienen material suspendido, sólidos que pueden sedimentar en reposo, ó sólidos dispersados que no sedimentan con facilidad. Una parte considerable de estos sólidos que no sedimentan pueden ser coloides.

En los coloides, cada partícula se encuentra estabilizada por una serie de cargas de igual signo sobre su superficie, haciendo que se repelan dos partículas vecinas como se repelan dos polos magnéticos. Puesto que esto impide el choque de las partículas y que formen así masas mayores, llamadas flóculos, las partículas no sedimentan (URL 5).

Las operaciones de coagulación y floculación desestabilizan los coloides y consiguen su sedimentación.

1.4.1 Tratamientos de lixiviados. Frente a la elevada concentración de material sólido en el lixiviado, un tratamiento exclusivamente químico resulta demasiado costoso. Dado que el percolado de los residuos sólidos municipales presenta características semejantes a las aguas residuales domésticas (con gran porcentaje de materia orgánica biodegradable de difícil decantación), se deben realizar estudios de factibilidad para aplicar los tratamientos biológicos con el fin de mejorar en lo posible la calidad de este líquido. Entre los procesos biológicos

que pueden ser utilizados en el tratamiento del lixiviado, están los filtros percoladores y las lagunas de estabilización. Existen algunos procesos físico-químicos que sirven para remover metales y ayudan a reducir el DQO (WINKLER, Michael, 1993).

En el diseño de tratamiento de los lixiviados se debe considerar por lo menos lo siguiente: remoción de material particulado (orgánico e inorgánico), remoción de materia orgánica soluble y articulada (medida como DBO_5), remoción de metales pesados y otros compuestos tóxicos, remoción de sustancias solubles de interés sanitario, tales como el amoníaco, etc.

Para lograr lo anterior existen diferentes combinaciones de procesos, las cuáles deben considerar, al menos en parte, los siguientes: homogeneización e igualación del lixiviado, precipitación de metales y compuestos insolubles mediante procesos físico-químicos, sedimentación y/o filtración, tratamiento biológico, aeróbico y/o anaerobio para la remoción de la materia orgánica, procesos especiales para la remoción de nitrógeno (desnitrificación), amonio (torres de separación), ósmosis inversa ó nanofiltración para remoción de sustancias inorgánicas solubles, igualación del flujo, precipitación química, filtración con lecho granular, filtración de membrana-ósmosis reversa, intercambio iónico, procesos de oxidación avanzada, ozonización, recompresión mecánica del vapor, etc (CHIAN y otros 2000).

1.4.2 Etapas del tratamiento

1.4.2.1 Regulación del pH La regulación de pH de una solución que tenga un pH ácido o alcalino consiste simplemente en adicionarle un álcali o

un ácido respectivamente, en forma controlada de manera tal que obtener el valor de pH pretendido. (RAMÍREZ Ignacio . y otros. 2000)

1.4.2.2 Sedimentación-decantación. En la sedimentación los sólidos más densos que el agua son separados debido al efecto de la gravedad. La velocidad de sedimentación de los flóculos depende fundamentalmente de la calidad del agua cruda, de las características químicas de la coagulación y de los parámetros físicos de la floculación.

1.4.2.3 Oxidación-Reducción La oxidación química consiste en añadir agentes oxidantes para degradar los compuestos orgánicos presentes en el lixiviado.

1.4.2.4 Floculación- Coagulación. La Coagulación y Floculación son dos procesos dentro de la etapa de clarificación del agua. Ambos procesos se pueden resumir como una etapa en la cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas llamadas flocs tal que su peso específico supere a la del agua y puedan precipitar (ADIN,R 1998).

La coagulación se refiere al proceso de desestabilización de las partículas suspendidas de modo que se reduzcan las fuerzas de separación entre ellas.

El término coágulo se refiere a las reacciones que suceden al agregar un reactivo químico (coagulante) en agua, originando productos insolubles. La coagulación comienza al agregar el coagulante al agua y dura fracciones de segundo.

La coagulación es muy efectiva en la remoción de materia orgánica. La eficiencia en la coagulación para la remoción de la materia orgánica depende de la carga, solubilidad, y característica molecular de la misma. La eficiencia en la remoción de carbono orgánico es proporcional al tamaño molecular; con componentes de gran peso molecular es más efectiva que con las de menor peso (URL 2).

El pH para remover color generalmente es más bajo que el que se necesita para remover turbiedad. Para sales de aluminio el color se remueve mejor a pH entre 5 - 6 y la turbiedad entre 6 – 7, mientras que para sales de hierro el pH óptimo para la remoción de color y para turbiedad está entre 3.2 - 4.5, la superficie de los coloides se hace mayor y esto estimula adsorción de las moléculas de color, lo que se traduce en una menor dosis de coagulante, frente a esta ventaja está en contra la naturaleza de los compuestos húmicos, bien sea constituidos por coloides hidrofóbicos de bajo peso molecular en la mayoría de los casos presentes en el lixiviado, los cuales requieren altas dosis de coagulantes (VELÁSQUEZ, R 1999).

La remoción en la coagulación de orgánicos es una extensión del concepto de la coagulación para turbiedad que se hace por dos mecanismos similares (DENNET, K. 1996):

1. Adsorción en el precipitado de hidróxido de aluminio Al(OH)_3 ó férrico Fe(OH)_3 y por lo tanto el mecanismo predominante es la coagulación de barrido.
2. Formación de moléculas complejas insolubles en el agua materia orgánica-metal (fulvatos y humatos de aluminio o de hierro), en forma similar a como se neutralizan las cargas en los coloides.

El pH óptimo para la remoción de orgánicos está del lado ácido (5 a 6), donde la remoción se produce por la precipitación de los humatos , que es el mecanismo que requiere menor dosis de coagulante, a pH más altos con mayores dosis de coagulante, se produce la adsorción del carbono orgánico total en el floc de barrido.

La floculación tiene relación con los fenómenos de transporte dentro del líquido para que las partículas hagan contacto. Esto implica la formación de puentes químicos entre partículas de modo que se forme una malla de coágulos, la cual sería tridimensional y porosa. Así se formaría, mediante el crecimiento de partículas coaguladas, un floc suficientemente grande y pesado como para sedimentar.

a. **Mecanismos de desestabilización de partículas.** Existen cuatro mecanismos de desestabilización de partículas coloidales (URL 7) :

1. Compresión de la doble capa
2. Adsorción-neutralización;
3. Barrido
4. Adsorción y formación de puente

Los mecanismos más importantes cuando se emplean sales de aluminio o de hierro son adsorción-neutralización y barrido, los cuales están en función del tipo de coagulante empleado, dosis, pH de coagulación y características del agua cruda como turbiedad inicial, alcalinidad, etc. Cuando se utilizan polímeros, el mecanismo predominante es el de adsorción y formación de puente.

1) **Neutralización de carga.** Donde la carga negativa de los coloides se neutraliza con la carga de los iones o productos de las reacciones hidrolíticas de las sales metálicas de Fe (III) y Al (III). Una característica de la coagulación adsortiva es la posibilidad de re-estabilización o sea el regreso a dispersión coloidal en el caso que exista una dosis alta a través de la inversión de la carga en las partículas. Otra característica de la coagulación por absorción es la

proporcionalidad estequiométrica entre la dosis de coagulante y la concentración de los coloides.

- 2) **Coagulación de barrido.** La coagulación de barrido se refiere a la remoción de contaminantes a través de la formación de un precipitado sólido. La precipitación de un hidróxido voluminoso es debido a que el agua es supersaturada varios órdenes de magnitud por encima de la solubilidad de la sal metálica. Los contaminantes disueltos son removidos por adsorción en el sólidos precipitado y las partículas suspendidas son atrapadas en la caída de una masa esponjosa llamada floc de masa.

Para cada valor de pH existe una concentración máxima de partículas coloidales que permite la predominancia del mecanismo de adsorción –neutralización para su desestabilización, en el cual las especies monoméricas y poliméricas formadas como resultado de la adición del coagulante y sus reacciones de hidrólisis en medio acuoso son las responsables de la desestabilización de los coloides. La adsorción de las especies hidrolizadas del coagulante se da en la superficie del coloide, siendo éstas las responsables de la reducción de carga de la partícula coloidal .

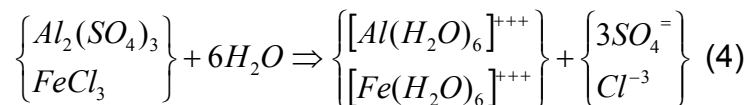
Si la adición de coagulante es superior a su solubilidad en el medio acuoso, ocurrirá la formación del hidróxido metálico correspondiente y su precipitación en la superficie de los coloides será el principal responsable de la desestabilización, dando lugar al mecanismo de barrido .

Los precipitados voluminosos de hidróxido se forman porque el agua es saturada por encima de la solubilidad de la sal metálica; los contaminantes disueltos son removidos por adsorción en el precipitado sólido y los particulados, por

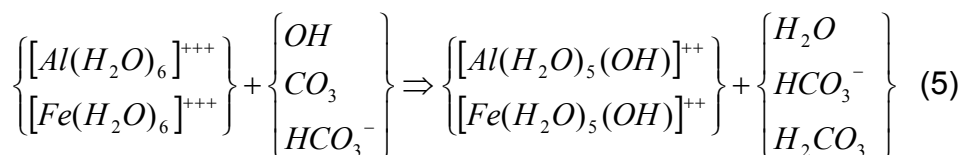
enmallamiento o atrapamiento dentro de una masa del precipitado (MENELLA; A.1997)

- i) **Química de la coagulación con sales metálicas de Fe(II) y Al (III).** A partir de los tipos de coagulación, absorción-neutralización y la de barrido o incorporación. La primera se realiza en un tiempo muy corto y ocurre entre 0.01-1.0 segundos sin producción de hidróxido y adsorción de contraiones (física o químicamente) en la doble capa. La segunda se presenta cuando hay precipitación masiva de hidróxido que atrapa o incorpora los coloides y la reacción se completa en un tiempo aproximado de 7 segundos. La dispersión de los coagulante puede considerarse que progresa en 3 fases distintas que son conceptualmente diferentes:

Fase I: Hidrólisis de los iones Al(III) y Fe(III); cuando las sales de hierro y aluminio están es solución se encuentran hidrolizadas así:



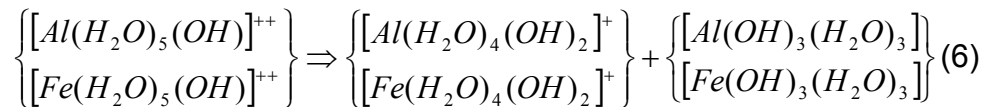
los iones de hierro y aluminio hidratados $[Al(H_2O)_6]^{+++}$ y $[Fe(H_2O)_6]^{+++}$ actúan como un ácido en el sentido Brønsted y reaccionan con las bases; que se encuentran en el agua así: con la alcalinidad (OH^- , $CO_3^{=}$, HCO_3^-) y con las moléculas de agua de la siguiente forma:



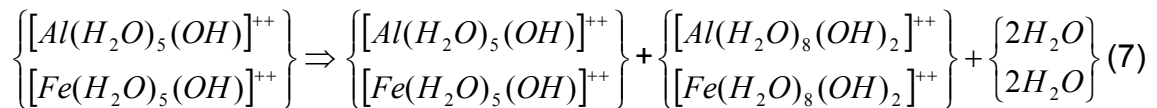
Está reacción se realiza en un tiempo extremadamente corto entre 10^{-10} y 10^{-3} segundos.

Fase II: Difusión de los compuestos formados y absorción de ellos en las partículas coloidales de acuerdo a los autores citados, el tiempo necesario para cubrir el coloide y desestabilizarlo puede variar entre $8.5 \cdot 10^{-5}$ y $2.4 \cdot 10^{-4}$ segundos.

El $[Al(H_2O)_5(OH)]^{++}$ y el $[Fe(H_2O)_5(OH)]^{++}$ son compuestos inestables que se hidrolizan rápidamente, reemplazando un H_2O por un OH^- así:



Fase III: De polimerización o de reacción de los iones hidratados para formar especies diméricas y poliméricas, se realiza en un tiempo que puede variar entre 10^{-2} – 1 segundo. La reacción de estos productos monoméricos entre sí produce:



Estas reacciones continúan con el tiempo, hasta llegar como producto final, a un hidróxido de hierro y aluminio neutro (mecanismo de barrido) $Fe(OH)_3$, $Al(OH)_3$ o negativo $Fe(OH)_4^-$ y $Al(OH)_4^-$. Una vez los coloides desestabilizados empiezan a unirse formando primero microfloculos o partículas con un diámetro inferior a una micra, lo que puede tardar menor de 60 s, luego estos núcleos se aglutinan en partículas mayores (20-246 s) y por último se hidratan aumentando de volumen.

1.4.2.5 Sedimentación. Consiste en la agregación de pequeñas partículas en suspensión que forman flóculos de mayor tamaño y peso; de esta manera se produce la sedimentación por gravedad y consiguiente espesamiento de los barros que precipitan (GUARIN 2002).

1.4.2.6 Precipitación química. Consiste en la eliminación de compuestos que pudieran interferir en el desarrollo de la etapa biológica. Un ejemplo típico es la elevación del pH con agua de cal que posibilita la precipitación de los metales pesados como hidróxidos insolubles. (GUARIN 2002).

1.4.2.7 Filtración. Consiste en una operación mediante la cual se separan los sólidos suspendidos en la masa líquida, haciendo pasar el fluido a través de un medio poroso, lo cual posibilita reciclar el líquido hacia la etapa de neutralización y posteriormente al reactor biológico; los sólidos debidamente acondicionados, (cuando cumplen la Norma de Barros), se disponen en las celdas de barro en el módulo del Relleno Sanitario (GUARIN 2002).

1.4.2.8 Adsorción por carbón . La adsorción a través de un filtro de carbón activo consiste en filtrar el líquido a través de un lecho de este material, donde se retienen las sustancias contaminantes. El grado de depuración es muy bueno, hasta el 80%, pero es un sistema costoso (CANOURA, J.M. 1997)

1.4.3 Tratamiento biológico. Este tratamiento comprende a los procesos biológicos utilizados en el tratamiento del lixiviado. Siendo sus objetivos principales la coagulación y eliminación de los sólidos coloidales no sedimentables, y la estabilización de la materia orgánica. (HILLEBOE M. 1964)

1.4.3.1 Reactores batch secuenciales (RBS). Un reactor Batch secuencial es un tipo de tratamiento de barros activados a carga completa. A diferencia de los sistemas convencionales de flujo continuo, que tienen tanques separados para la equalización, aireación y clarificación en el RBS se realizan todas estas etapas en un solo reactor (FERHAN Cecen. 2001).

1.4.3.2 Discos biológicos rotativos. Es sistema de Discos Biológicos Rotativos, es un proceso de tratamiento biológico aeróbico que consiste en una serie de discos con poco espacio de separación entes ellos, montados sobre un eje horizontal; estos discos ensamblados son colocados en un tanque semicircular abierto que contienen el líquido a tratar. La superficie inmersa es de aproximadamente el 40% del disco.

En los discos en los que se forma una capa viscosa de 2 a 4 mm de espesor, la superficie mojada, gira alternativamente entre el lixiviado y el aire de donde toma el oxígeno. (GUARIN 2002).

1.4.4 Parámetros físico-químicos que se evalúan

1.4.4.1 Turbiedad. La turbiedad es la propiedad de dispersar la luz por parte de las partículas en suspensión de tamaño coloidal que contiene el agua.

La turbiedad es causada por partículas de origen inorgánico tales como arcillas y óxido de metales, o de origen orgánico como limos, cieno y bacterias. La unidad de turbiedad es equivalente a 1mg/dm^3 de SiO_2 que equivale casi a 1 ppm (VILLEGAS 1995).

1.4.4.2 Color. El color es producido en el agua por materiales coloreados ya sea disueltos o en suspensión, en particular ácidos fúmicos, algas, iones de metales de transición. Se distinguen dos clases:

1. *Color aparente*: el que posee el agua antes de ser eliminada la turbiedad.
2. *Color real*: El que queda después de eliminar la turbiedad, causando por material coloreado disuelto (VILLEGAS 1995).

1.4.4.3 Sólidos. Los sólidos son todas aquellas sustancias diferentes del agua que se encuentran en ella. Con mayor precisión, es el residuo que queda después de la evaporación de la muestra a 105°C y que no ejerce una presión de vapor apreciable a esta temperatura (sólidos

totales) . Sus concentraciones se expresan en mg / dm³ (ppm). Se distinguen las siguientes clases de sólidos:

- a) **Sólidos suspendidos (SS).** Los SS son aquéllos retenidos al pasar la muestra por un crisol de Gooch. Se hallan por diferencia de peso y están en relación directa con la turbiedad. Su determinación se realiza para controlar la calidad del agua y la eficiencia de los procesos de sedimentación o de filtración.

- b) **Sólidos disueltos (SD).** Los SD son los que quedan después de la evaporación a 105°C del filtrado del paso anterior.

- c) **Sólidos volátiles (SV).** Los SV son los que se volatilizan después de la evaporación de la muestra a 600°C. su valor está relacionado con el contenido de materia orgánica presente en el agua, aunque se prefieren otros métodos para su determinación. Pueden ser suspendidos (SVS) o disueltos (SVD).

- d) **Sólidos sedimentables.** Su determinación tiene importancia en el control de procesos de sedimentación. Estos se determinan en un cono Imhoff. Los sólidos sedimentables son los que se depositan hacia el vértice del cono, después de una hora de reposo de un litro de muestra; se expresan en mililitros de sólidos sedimentables por litro de agua.

1.4.4.4 Demanda química de oxígeno (DQO). La determinación química del oxígeno también se usa para caracterizar aguas servidas y es equivalente a la cantidad de oxígeno requerido para oxidar toda la materia orgánica presente sea biodegradable o no.

Su análisis es más rápido que el de la DBO y si existen suficientes datos estadísticos se pueden correlacionar con este último: Por ejemplo, en aguas negras típicas de origen doméstico la relación es:

$$\text{DQO} / \text{DBO} = 2.5$$

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 SITUACION ACTUAL DE LOS LIXIVIADOS

Debido a la peligrosidad que representan los lixiviados existen varios métodos para su tratamiento. La elección del método dependerá de lo que sea más fiable y adecuado dependiendo tanto de aspectos económicos como técnicos. Los tratamientos pueden ser biológicos y/o físico químicos.

Los tratamientos biológicos, los mismos que se emplean en la depuración de aguas residuales; son: aerobios, anaerobios. Las técnicas de depuración aerobia consisten en la degradación de los compuestos orgánicos contenidos en el lixiviado por microorganismos en presencia de oxígeno y agitación, para evitar condiciones de anaerobiosis dentro de los tanques de depuración. Durante esta degradación se formarán sólidos decantables que se separan fácilmente de la fracción líquida. Al ser un sistema de tratamiento "vivo", la degradación biológica requiere de ciertas condiciones estables de funcionamiento, carga orgánica, concentración de nutrientes, pH, etc. En condiciones no optimas se pueden presentar problemas de baja sedimentación, espumas y otros.

La depuración anaerobia se basa en la degradación de materia orgánica mediante una población bacteriana en condiciones de ausencia de oxígeno. Los reactores más empleados son de película fija de flujo estacionario descendente, reactores RBS y filtros anaerobios. Estos sistemas deben soportar altas velocidades de

carga con tiempos de retención bajo, sobrecargas y arranques rápidos tras periodos de parada, todo ello sin detener las condiciones depuradoras de la flora bacteriana.

Los sistemas de lagunaje profundo se basan en la depuración conseguida en balsas y lagunas, por la acción de la flora bacteriana contenida en la misma. Las condiciones de depuración pueden ser: anaerobias, sí es una laguna profunda; aerobia, con una relación superficie/volumen alta, o mixta. En zonas cálidas, el aporte de calor beneficia la actividad microbiana y, en las frías la reduce.

Los tratamientos físico-químicos son más caros de implementar, requieren de instalaciones más pequeñas y sencillas, con menor sensibilidad a las variaciones de las condiciones del medio. Las técnicas empleadas son: precipitación química, oxidación química, adsorción y osmosis inversa. En resumen, el tratamiento de los lixiviados producidos en un relleno debe considerarse como un aspecto más de la gestión del mismo, para lo cual, deben analizarse los aspectos medioambientales, productivos, etc. para conseguir el mejor tratamiento posible, siendo este en muchas ocasiones la combinación de dos o tres de los anteriormente citados (URL 3).

Tabla 1. Comparación química de un lixiviado de un relleno sanitario y un agua residual doméstica.

Parámetros	Valores*	
	Lixiviado**	Agua Residual***
DQO	40-89520	250-1000
DBO ₅	81-33360	110-400
COT	256-28000	80-290
ST	0.0-59200	350-1200
SDT	584-44900	250-850
SST	10-700	100-350
Alcalinidad (CaCO ₃)	0.0-20850	50-200
P-Total	0.0-130	4.0-15
Nitritos y nitroatos	0.2-10.29	0.0
Amoniaco	0.0-1106	12-50
PH	3.7-8.5	7-8
Conductancia específica	2810-16800	N.R
Dureza CaCO ₃	0.0-22800	N.R

*Todos los valores están en mg/L , excepto pH y conductancia (μ moh/cm); N.R: No reportado
Fuente: **(ENGELBRECHT Y AMIRHOR); ***(TCHOBANOGLOUS)

Debido a las características que tiene el lixiviado, este es un efluente peligroso con una alta carga contaminante en comparación con un agua residual doméstica, que pone en riesgo la salud pública, es capaz de contaminar el suelo a su alrededor, los acuíferos subterráneos y las lagunas superficiales.

2.2 SITUACION COLOMBIANA EN EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS

Para clasificar las aguas es necesario establecer en forma previa los límites aceptados de calidad, según los usos. Los criterios de calidad se refieren a las máximas concentraciones (expresadas generalmente en miligramos o microgramos por litro, para parámetros fisicoquímicos) permisibles de contaminantes que no interfieran con el uso de las aguas. Su cálculo es el resultado de la investigación científica y, por lo tanto no depende de decisiones de tipo administrativo o económico. La normatividad ambiental vigente para la calidad del agua incluye la siguiente Resolución:

2.2.1 Resolución No 1074 de 1997. Hace relación a los vertimientos de residuos líquidos de la siguiente manera:

- ART. 3º-Todo vertimiento de residuos líquidos a la red de alcantarillado público y/o a un cuerpo de agua, deberá cumplir con los estándares establecidos en la siguiente tabla.

Tabla 2. Normas de vertimiento a un cuerpo de agua.

SUSTANCIA	EXPRESADA COMO	CONC
Arsénico	As (mg/L)	0.1
Bario	Ba (mg/L)	5.0
Cadmio	Cd (mg/L)	0.003
Cobre	Cu (mg/L)	3.0
Carbonatos	Agente activo (mg/L)	0.1*
Cianuro	CN (mg/L)	1.0
Compuestos fenólicos	Fenol (mg/L)	0.2
Compuestos organoclorados	Concentración de agente activo	0.05*
Compuestos organofosforados	Concentración de agente activo	0.1*
DBO ₅	(mg/L)	1000*
DQO	(mg/L)	2000
Grasas y aceites	(mg/L)	100
Magnesio	Mg (mg/L)	0.12
Mercurio	Hg (mg/L)	0.02
pH	Unidades	5-9
Sólidos suspendidos	S.S (mg/L)	2.0
Sólidos suspendidos totales	S.S.T (mg/L)	800
Temperatura	Grados centígrados (°C)	<30°
Tensoactivos (SAAM)	(mg/L)	0.5

* Concentración de tóxico que produce la muerte del organismo.

2.3 MANEJO DE LIXIVIADOS EN EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER

En el ámbito regional se han diseñado plantas piloto para el tratamiento de lixiviados donde se combinan los tratamientos biológicos y físicos. Tal es el caso de los rellenos sanitarios en los diferentes municipios de Santander que se observan en la tabla 3.

Tabla 3. Procesos diseñados para el tratamiento de lixiviados en los rellenos sanitarios de los diferentes municipios del departamento de Santander.

MUNICIPIO	PROCESOS	REMOCION DE CONTAMINANTES
Socorro	Sedimentación Reactor UASB Filtración Sistema SFS Deshidratación fangos	DBO Grasa Sólidos suspendidos
Barbosa (Relleno Sanitario el Esculapio)	Adición de alumbre-agitación Sedimentación Filtración (arena-antracita) Laguna (jacintos) Regulación pH (cal)	Olor y Color Turbiedad Dureza DBO;DQO Hierro y Zinc
Bucaramanga (Relleno Sanitario El Carrasco)	Nitrificación y desnitrificación en reactores biológicos Ultra filtración Adsorción (carbón activado)	Olor y Color Turbiedad Dureza DBO;DQO Fe,Hg,Cd,Cr,Mn,P Amino Fenoles / Sulfatos Sólidos Totales

Fuente: (GARCIA, Juan.1997), (GUALDRON, Nelson.1995), (ARENAS, Fabiola. 1998)

2.4 MANEJO DE LIXIVIADO EN EL MUNICIPIO DE BUCARAMANGA

En la ciudad de Bucaramanga el Relleno Sanitario “El Carrasco” esta ubicado en la zona de la escarpa denominada Malpaso, en la actualidad tiene un área disponible de 93 hectáreas de las cuales el 25% está siendo utilizada, tiene una capacidad de 1.800.000 toneladas de residuo y se calcula que puede prolongar su vida útil en 25 años más, cuando se reciban 13.000 toneladas al mes y con una cobertura para 800.000 habitantes. En la actualidad llegan 850 toneladas diarias de basuras de 10 municipios de Santander, incluyendo Bucaramanga.

La planta de tratamiento de lixiviados se empezó a construir en marzo de 1.999 e inició su operación en julio siguiente, consta de dos lagunas facultativas y una estructura en al que se realiza el proceso fisicoquímico que limpia, en parte, las impurezas del líquido que producen las basuras (URL 4).

Según estudio realizado por el CEIAM en el año 2001 estas lagunas reportaron bajos porcentajes de actividad biológica y remoción de carga orgánica (19.7% en DBO₅, 8.7% en DQO y 44% en sólidos suspendidos totales (SST)). De estos análisis se puede concluir que hoy en día actúan como pre y post sedimentadores para el tratamiento fisicoquímico que se encuentra en medio de estas dos lagunas. La planta tiene un tratamiento de 0.4 litros a casi un litro por segundo de lixiviados, de acuerdo con la época del año: en tiempo de lluvias se aumenta el caudal; hay que tener en cuenta que un 10 por ciento aproximadamente que escurre por las faldas de las montañas y va a la quebrada la Iglesia sin ningún tratamiento.

2.5 RECOPIACIÓN HISTÓRICA DE LOS MONITOREOS REALIZADOS POR EL CEIAM

a) Composición química del lixiviado

Existen tres clasificaciones o categorías específicas de sustancias que generalmente son analizadas en un vertimiento como el lixiviado y son: los Compuestos Orgánicos Volátiles COVs y Semivolátiles, los Metales y los Parámetros de Calidad de Agua. En esta sección se describirá los Compuestos Orgánicos Volátiles COVs y Semivolátiles indicadores de contaminación presente en el lixiviado que se generan en el sitio de disposición de residuos sólidos de la ciudad de Bucaramanga “El Carrasco”.

b) Compuestos Orgánicos Volátiles, VOCs. Los Compuestos Orgánicos Volátiles, también llamados VOCs o hidrocarburos, son compuestos complejos de difícil degradación por los microorganismos y por los procesos químicos con altísima capacidad de movilidad para poder migrar junto al lixiviado hacia los límites del relleno. Generalmente son tóxicos o cancerígenos como por ejemplo: en productos químicos utilizados para el aseo, disolventes y limpiadores en el hogar, en la producción de químicos, plásticos, agroquímicos, bases para pinturas, etc.

En el estudio de cromatografía de gas acoplada con espectrometría de masas (GC/MS), efectuado al lixiviado por el CEIAM en el laboratorio de Cromatografía de la escuela de Química-UIS fueron identificados alrededor de 70 compuestos entre COVs, Semivolátiles, ácidos grasos, alcoholes, ésteres y ftalatos en los extractos obtenidos con procedimientos de extracción líquido-líquido para compuestos de muestras acuosas. (Soxhelt y LLEC) descritos en el manual SW-846 de la EPA, procedimiento 3520C, utilizando como solventes Diclorometano y Pentano (Ver anexo A, procedimientos). A continuación se

listan en la tabla N° 4 los principales compuestos identificados junto a sus características de toxicidad y su efecto en la salud humana.

Tabla 4. Principales compuestos orgánicos encontrados en el estudio de cromatografía (GC/MS) al lixiviado generado en “El Carrasco”

% PROM, CANTIDAD RELATIVA	COMPUESTO	GRUPO FUNCIONAL	FUENTE Y TOXICIDAD
0.27	Ciclohexanol	-OH	N.R.
17.69	Ácido Octanoico	-COOH	N.R.
19.69	1-Metil-2-pirrolidiona	R-CO-R	N.R.
1.01	Nicotina	Pirrolidina	Utilizado en medicamentos e insecticidas, alcaloide de tabaco. Muy tóxico por ingestión e inhalación
38.40	Dioctil ftalato		N.R.
8.17	Bis-(2-Etilhexil ftalato)	-COO-	Plastificante, endurecedor de resinas. Moderadamente tóxico. Irritante para la piel.

N.R. no reportado; Fuente CEIAM, 2.002

c) Metales Debido a las condiciones ácidas presentes en el relleno, metales pesados como el Cadmio, Cobre, Hierro, Manganeso y plomo, pueden disolverse y migrar a través del lixiviado hacia la superficie. La mayoría de estos metales son utilizados en los procesos de fabricación e industriales, en la fabricación de aleaciones, en electroplateado, en pinturas, vidrio, plásticos y pesticidas.

En la tabla 5 se encuentra la lista de los metales encontrados en el lixiviado de “El Carrasco”, analizados por Absorción Atómica de llama a partir de las digestiones propuestas en el manual SW-846 de la EPA, (Métodos: 3010^a.

“Digestión ácida de muestras acuosas y extractos “ y 3050b.”Digestión ácida de sedimentos lodos y suelos”. Ver anexo 13

Tabla 5. Concentración de los principales metales encontrados en el lixiviado de “El Carrasco”

METALES	VALOR(p.p.m)	NORMA	EFFECTOS A LA SALUD
Hierro,Fe	3.46	0.3 max	Es el responsable del mal sabor y color del agua produce daño estomacal pasajero
Cromo,Cr	0.52-0.79	-	Particularmente el hexavalente es cancerígeno, mutágeno, produce efectos pulmonares y respiratorios, irritación a los ojos
Cobre, Cu	0.16-0.18	1.0 máx	Las aguas contaminadas con altos niveles de cobre pueden producir malestares gastrointestinales pasajeros
Niquel, Ni	0.52-1.64	-	Probablemente cancerígeno, mutágeno, efectos pulmonares y respiratorios.

Fuente: CEIAM, 2002-2003

d) Parámetros de calidad del agua Consisten en una serie de análisis físicos, químicos y microbiológicos efectuados a las muestra de agua tanto de vertimientos como de agua para consumo humano; que comprenden de una forma amplia las características físicas (sólidos totales, sólidos suspendidos, fracciones volátiles y fijas, color y olor), características químicas como medida del contenido orgánicos (DQO y DBO₅), características inorgánicas (pH, cloruros, alcalinidad, dureza, nitrógeno, fósforo, azufre), y características biológicas (coliformes, mesófilos).

En la tabla 6. se encuentran listados los parámetros de calidad analizados al lixiviado generado en “El Carrasco” durante los años 2.002 y 2.003, por el CEIAM a partir de muestras compuestas o representativas que se toman en un monitoreo.

Tabla 6. Parámetros de calidad del agua realizados al lixiviado que se produce en el sitio de disposición final “El Carrasco”

PARÁMETRO	MONITOREO MONITORERO		*NORMA DE VERTIMIENTO
	2.002	2.003	
pH	8.31	7.6	5-9
Alcalinidad Total (mg/L CaCO ₃)	6210	10900	-
Cloruros (mg/L Cl ⁻)	-	1932	250 máx
Dureza (mg/L CaCO ₃)	2420	920	500 máx
Color (Uni. Pt-Co)	9533	5625	20 máx
Turbiedad (NTU)	416	938	50 máx
DBO ₅ (mg/L O ₂)	7782.4	2670	-
DQO(mg/L O ₂)	14000	3950	-
Nitratos (mg/L NO ₃ ⁻)	-	N.D.	10 máx
Fosfatos	-	14.13	-
Sulfatos	-	N.D.	400 máx
ST sólidos totales (mg/L)	16230	11684	-
STV sólidos totales volátiles (mg/L)	7264	4800	-
SST sólidos suspendidos totales(mg/L)	405	158	-
SSTV sólidos suspendidos totales volátiles (mg/L)	190	97	-

Fuente: CEIAM, 2.002-2003; N.D. No detectado *Resolución 1074 28 OCT 1997

3. METODOLOGÍA

Primero se caracterizó fisicoquímicamente el lixiviado del relleno sanitario “El Carrasco”. Las propiedades que se evaluaron incluyen: Sólidos totales, DQO, metales, pH, color, turbidez, temperatura.

En la segunda etapa se desarrolló el método fisicoquímico que consistió en la oxidación / coagulación-floculación/ neutralización del lixiviado para la remoción total o parcial de los contaminantes presentes.

En la tercera etapa se estudió la posible relación existente entre las variables cuantitativas por medio de técnicas estadísticas de correlación y regresión, para esto se usó el programa Statgraphics encontrando las condiciones “óptimas” (dosis, pH, tiempos y gradientes de floculación)

Con el producto obtenido se realizó una comparación con la resolución 1074 de 1997 del Ministerio de Salud que reglamenta las disposiciones sanitarias sobre aguas.

3.1 MUESTREO PARA LIXIVIADOS

Es elemental conocer los constituyentes que están presentes en los lixiviados para entender la incidencia que tienen los materiales depositados en los rellenos sanitarios como precursores para la formación de estos.

Es muy importante en la toma de muestra asegurar que esta sea representativa y mantener la muestra conservada para asegurar la confiabilidad de los resultados analíticos.

Los parámetros que se analizan en el lixiviado son: sólidos totales y sólidos suspendidos, sólidos sedimentables, temperatura, pH, DQO, color, turbidez y metales.

Se deben recolectar 10L de Lixiviado recién salidos del relleno sanitario sin ningún tratamiento previo en botellas de vidrio ámbar, se debe usar preservante según sea el parámetro a medir, siguiendo las normas del Standard Methods.

Las muestras del lixiviado generadas por los residuos sólidos provienen de una canal que lo conduce por gravedad hacia un punto llamado box-couvert, que luego continua su recorrido y se descarga en la Quebrada La Iglesia.

3.2 PRESERVACIÓN EN LA TOMA DE LA MUESTRA.

Las muestras deben preservarse a 4°C hasta el momento de su análisis en el laboratorio para evitar la volatilización de los compuestos y su degradación química. La preservación de las muestras evita que los cationes metálicos se precipiten como hidróxido o formen complejos, evita que los estados de valencia de los iones cambien por oxidación o reducción, también, evita que la lisis celular aumente la DBO y la DQO, que el contenido de nitrógeno y fósforo permanezca constante. Los diferentes métodos de preservación se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Preservantes utilizados para el análisis de Lixiviado

COMPONENTE	MATERIAL DEL RECIPIENTE	PRESERVACION	VOLUMEN TOTAL (mL)
DQO	Vidrio	H ₂ SO ₄ hasta pH<2 Refrigerar	2000
Sólidos totales, sólidos suspendidos y DBO	Vidrio	Refrigerar	2000
Ba,Cr,Pb,Hg	Plástico	HNO ₃ 1:1 hasta pH<2 Refrigerar	1000
Se,As,Ni,Cu	Plástico	HNO ₃ 1:1 hasta pH<2 Refrigerar	2240
Sólidos sedimentables	Plástico	Refrigerar Agitar	2240

Fuente: Standard Methods for examination the water and wastewater, 1995.

3.3 PARÁMETROS Y TÉCNICAS ANALÍTICAS A UTILIZAR

Para la caracterización fisicoquímica de los lixiviados se toma como base el Standard Methods edición 20.

En la tabla 8 se muestran los parámetros a medir en el laboratorio y las técnicas que van a ser empleadas en el análisis de los lixiviados.

Tabla 8. Parámetros a determinar y técnicas a emplear

Parámetro	Unidades	Métodos de análisis
PH	--	Potenciométrico
Temperatura	°C	---
Sólidos Totales	Mg/l	Gravimétricos
Sólidos Totales Volátiles	Mg/l	Gravimétricos
Color	UPC	Colorimétrico
Turbidez	UTN	Colorimétrico
DQO	Mg/l de O ₂	Bicromato de potasio
Hierro(Fe)	mg/de Fe	Absorción Atómica
Cinc(Zn)	Mg/de Zn	Absorción Atómica
Cobre (Cu)	Mg/de Cu	Absorción Atómica
Níquel(Ni)	mg/de Ni	Absorción Atómica
Plomo (Pb)	Mg/de Pb	Absorción Atómica
Cromo(Cr)	mg/de Cr	Absorción Atómica

Fuente: Autor

3.3.1 Técnicas analíticas

- Medida de pH: La medida de pH se realiza por el método electrométrico, usando un pH. Este método está basado en las normas Standard Methods 4500-H⁺/95
- Demanda Química de Oxígeno (DQO): Método colorimétrico, basado en las normas Standard Methods
- Sólidos Totales (ST): Según la norma Standard Methods 2540B/95
- Sólidos Totales Volátiles (STV): Según la norma Standard Methods 2540 E/95.
- Metales (Fe,Zn,Cu,Ni,Cr,Pb): El método de absorción Atómica, según el Standard Methods 3010/95, 3030/95, 3110/95, 3111/95.

3.4 SEGUNDA ETAPA

En la segunda etapa se somete el lixiviado al método fisicoquímico de tratamiento que comprende los siguientes pasos : regulación de pH/ oxidación / coagulación-floculación/ neutralización, en cada paso se somete al lixiviado a prueba de jarras.

3.4.1 PRUEBAS DE JARRAS

3.4.1.1 Descripción, materiales y reactivos utilizados en el test de jarras. El test de jarras es la simulación de la coagulación que ocurre a nivel de laboratorio, es muy importante esta simulación porque con ellas se estudia el comportamiento del lixiviado, el factor más importante es la selección del protocolo para hacer la evaluación.

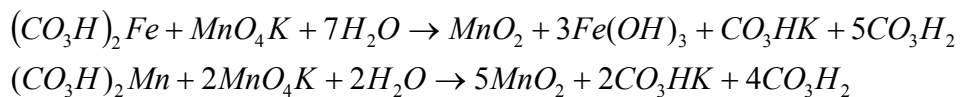
A continuación se describe los equipos y reactivos utilizados para realizar la prueba de jarras durante la experimentación

(a) Elección del coagulante - floculante. La elección del sulfato de aluminio como agente coagulante se hizo en base a:

- Proporciona rendimientos depuradores muy elevado en tratamiento de aguas residuales sin necesidad de utilizar ningún tipo de coadyudante.
- Provoca la formación de floculos de gran tamaño que se traduce en una buena decantación en un tiempo relativamente corto. Esto se ve favorecido por la mayor valencia del catión metálico.
- La presencia de aniones SO_4^{-2} favorece el tratamiento de coagulación, extendiendo el rango de pH óptimo para la formación de flóculos.
- Es muy económico y no tienen los problemas de toxicidad de los polielectrolitos sintéticos.

(b) Elección del agente Oxidante. La elección del permanganato de potasio como agente oxidante se realizó en base a:

- Eliminación de hierro y manganeso fundamentalmente, pero también puede eliminar sulfhídrico, fenoles y otros compuestos. Considerando que el hierro y el manganeso disueltos estén en forma de una sal soluble, como pueden ser los bicarbonatos, las reacciones para la oxidación y eliminación del hierro y manganeso serían:

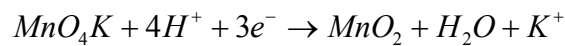


- Eliminación de olores y sabores. Los sabores y olores en las aguas, están asociados en muchas ocasiones a la presencia de algas, concretamente orgánicas generadas en su metabolismo, a veces indeterminado. El permanganato de potasio reduce los olores, por una parte al romper la molécula de las sustancias orgánicas causantes, presentes en el agua y por otra, al quedar las sustancias orgánicas adsorbidas por el propio precipitado de MnO_2 formando en el proceso de oxidación-reducción.
- Se emplea como algicida tanto en las estaciones de tratamiento como en los lagos y embalses, en la prevención del desarrollo de algas.
- No produce trihalometanos, e incluso reduce los precursores de éstos.
- Contribuye a la coagulación, ya que el producto resultante en la reacción de oxidación del permanganato, es el dióxido de manganeso, como sustancia insoluble, forma coágulos o floculos como adsorbentes de diferentes sustancias orgánicas e inorgánicas. La absorción de la materia orgánica

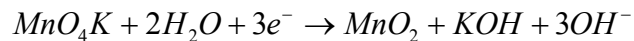
sobre el dióxido de manganeso se ve favorecida por cationes divalente en el agua.

Las dos reacciones de oxidación-reducción principales del permanganato en el tratamiento del agua son:

En medio ácido

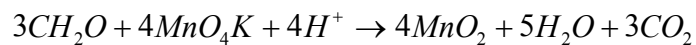


En medio neutro o alcalino



- En aguas con alto contenido en materia orgánica, se ha comprobado la mejora en la coagulación y por tanto en la eliminación, tanto en turbidez, como de DQO
- El permanganato rompe las moléculas mayores de los compuestos tales con el fenol, resocinol, ácidos húmicos, fúlvicos y tánicos y otros compuestos aromáticos y no aromáticos.

La reacción del permanganato potásico ante la materia orgánica de un agua (representada esta materia orgánica por la molécula CH_2O) será:



(c) **Aparato de mezcla.** En el ensayo de jarras se utilizó un Phillips y Bird Stirrier Modelo 7790-400 que es un eje rotor que sirve de agitador múltiple (para 6 vasos de precipitado) de velocidad variable, con un indicador digital de las revoluciones por minuto (r.p.m.) y con luz en la base de cada vaso para observar el proceso de floculación.

(d) **Protocolo de prueba de jarras convencional**

- Llenar los vasos de precipitado con lixiviado hasta un volumen de 1l.
- Llevar el lixiviado al pH de trabajo.
- Preparar las soluciones del oxidante o coagulante .
- Realizar la mezcla rápida durante 2 minuto a 100 r.p.m. e inyectar rápidamente la dosis coagulante utilizando una pipeta o jeringa.
- Reducir las revoluciones a 30 r.p.m. durante 30 minutos.
- Suspender la mezcla una vez cumplido el tiempo, sacar las paletas y deja sedimentar los floculos.
- Transcurrido 20 minutos extraer con la ayuda de una pipeta la cantidad de muestra de líquido clarificado para análisis.

Tabla 9. Parámetros de pruebas de jarras

FASE DE TRATAMIENTO	PARÁMETRO FÍSICO	UNIDADES	VALOR ADOPTADO
Mezcla rápida	Velocidad agitación	r.p.m	100
	Tiempo de agitación	minutos	2
Mezcla lenta	Velocidad agitación	r.p.m	30
	Tiempo de agitación	minutos	30
Sedimentación	Tiempo de Sedimentación	minutos	20

Fuente: Autor

Se escogieron estos parámetros de operación porque se obtiene un floculo espeso que no se rompe y su tiempo de decantación es menor.

En la figura No 1 se observa el proceso de coagulación en el test de jarras mecánico



Figura 1. Prueba de floculación / coagulación en el test de jarras mecánico

3.4.2 Oxidación.

- Se toman seis vasos de precipitado de dos litros (2.0L) y se adicionan 1000 mL de lixiviado previamente caracterizado (DQO,pH, turbidez y color).
- Realizar el proceso de test de jarras descrito anteriormente, se trabaja con los siguientes pH (4.0, 5.0, 5.5, 6.0, y 7,0) y con diferentes dosis de permanganato de potasio de (650,850,1000,1250 mg/l).
- Una vez realizado el protocolo de test de jarras se tomó el liquido sobrenadante y se determino el pH residual, turbiedad, color DQO, sólidos.
- Evaluar el pH de trabajo y la dosis de permanganato donde se obtuvieron los mejores resultados.

3.4.3 Coagulación-floculación:

- Se toman seis vasos de precipitado de dos litros (2.0L) y se adicionan 1000 mL de lixiviado previamente caracterizado (DQO,pH, turbidez y color).
- Realizar el proceso de oxidación con la dosis y el pH de permanganato seleccionada anteriormente.
- Se realiza el proceso de test de jarras descrito anteriormente, se trabajo con los siguientes pH (5.0, 5.5, 6.0) y con diferentes dosis de sulfato de aluminio de (850,1000,1250,1500,1750 mg/l).
- Una vez realizado el protocolo de test de jarras se tomó el liquido sobrenadante y se determino el pH residual, turbiedad, color DQO, sólidos.
- Evaluar el pH de trabajo y la dosis de sulfato de aluminio donde se obtuvieron los mejores resultados.

3.4.4 Neutralización

- Se toman seis vasos de precipitado de dos litros (2.0L) y se adicionan 1000 mL de lixiviado previamente caracterizado (DQO,pH, turbidez y color).
- Realizar el proceso de oxidación y coagulación con la dosis de permanganato y sulfato seleccionada anteriormente.
- Adicionar $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (grado comercial) en solución desde una bureta graduada a cada vaso hasta obtener un pH de 7.0.
- Agitar con una varilla de vidrio por 30 seg en cada prueba.
- Dejar sedimentar por una hora y medir el cambio de DQO, pH, turbidez, color.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 MUESTREO PARA LIXIVIADOS

Las muestras del lixiviado, generadas por los residuos sólidos provienen de un canal que lo conduce por gravedad hacia un punto llamado box-coulvert, que luego continua su recorrido y se descarga en la Quebrada La Iglesia.

4.2 MÉTODO UTILIZADO EN LA TOMA DE MUESTRA

El método utilizado fue de muestras instantáneas

4.2.1 Realización del monitoreo. Los días que se realizaron los monitoreos fueron:

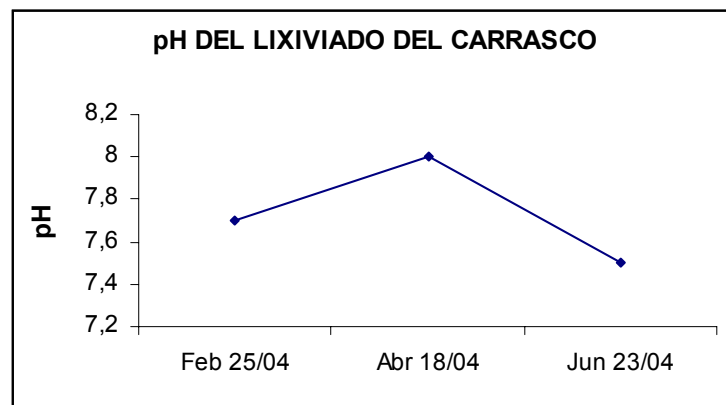
- primer monitoreo: 25 de Febrero
- segundo monitoreo: 18 de Abril
- tercer monitoreo: 23 de Julio

4.2.2 Preservación de las muestras. La preservación de las muestras se realizó teniendo en cuenta la Tabla 4. Los reactivos utilizados en la preservación y conservación de las muestras fueron de calidad analítica.

4.2.3 Características físicas y químicas. Se analizaron el color, olor, pH, SST, temperatura, turbidez, y DQO.

pH: En la figura 2 se encuentran los valores de pH que están dentro de la norma de vertimientos

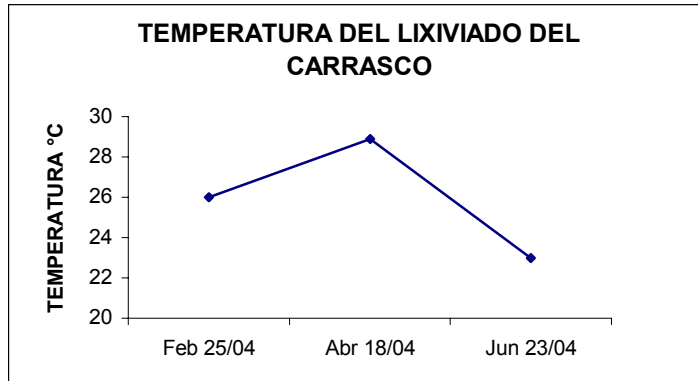
Figura 2. pH del lixiviado proveniente del Carrasco reportados en los tres muestreos realizados.



pH: Se observó un pH básico que es característico del proceso de degradación biológica del lixiviado.

Temperatura: Se observó un aumento de la temperatura de 28.9°C en el mes de Abril que corresponde a época de verano y una temperatura mínima de 23°C en Junio que es época de invierno. La figura 2 muestra las temperaturas del lixiviado durante los meses de muestreo.

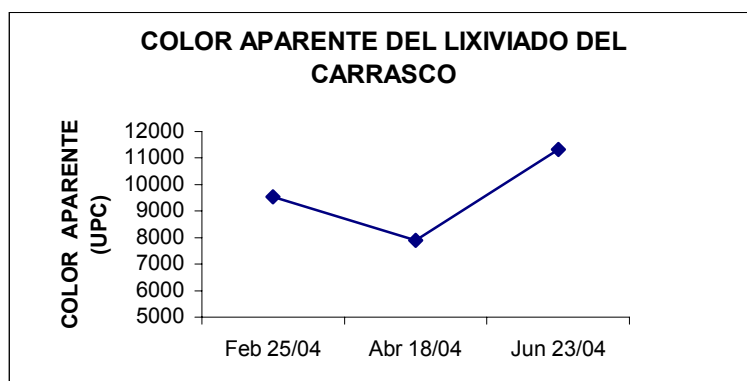
Figura 3. Temperatura del lixiviado reportados en los tres muestreos realizados.



Color: Se observó un color pardo oscuro que es producido por materiales coloreados ya sea disueltos o en suspensión (VILLEGAS,1995)

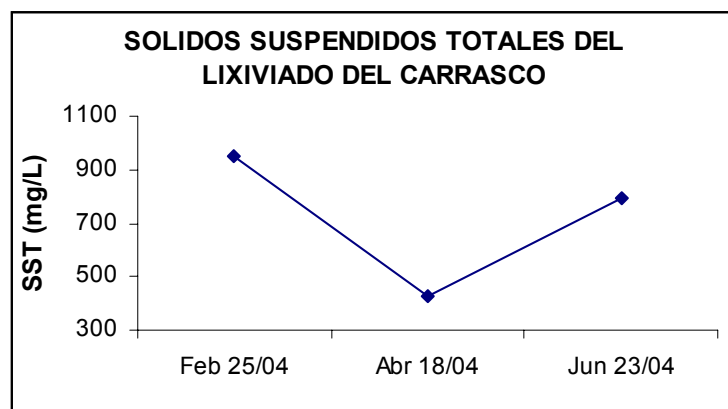
En la figura 4 se observa el color aparente medido en unidades de platino cobalto(UPC), para un máximo de 11328 UPC y un mínimo de 7890 UPC, esto es debido al comportamiento del lixiviado tan variable.

Figura 4. Color aparente del lixiviado proveniente del Carrasco reportados en los tres muestreos realizados.



Sólidos suspendidos totales (SST). El lixiviado sin tratar contiene partículas disueltas, suspendidas y de tamaño coloidal que pueden ser identificadas en el laboratorio. La cantidad de sólidos suspendidos totales estuvo comprendido entre 950.55 y 428.36 mg/L. La figura 5 indica los sólidos suspendidos totales encontrados durante el muestreo.

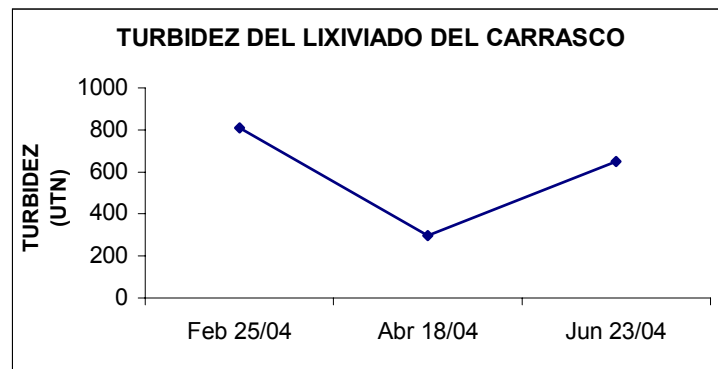
Figura 5. Sólidos Suspendidos Totales del lixiviado proveniente del Carrasco reportados en los tres muestreos realizados.



Turbidez. La turbiedad en el agua es causada por las partículas coloidales y suspendidas. La turbidez se encuentra entre un rango de 298 y 810 UTN (Unidades de turbiedad nefelométrica).

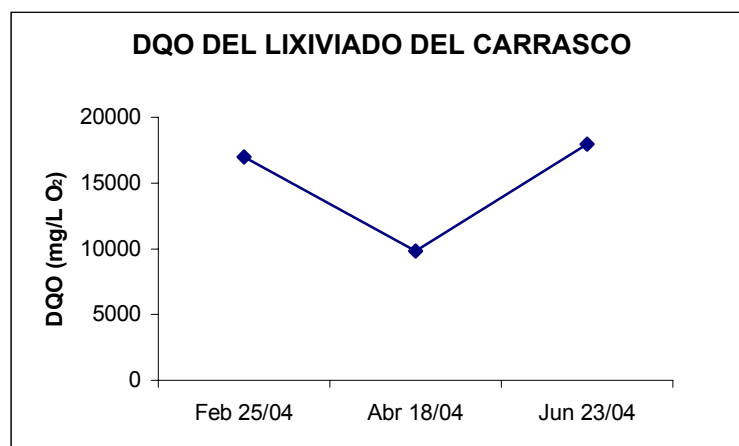
La figura 6 muestra los valores de turbidez del lixiviado para los tres meses de muestreo.

Figura 6. Turbidez del lixiviado proveniente del Carrasco reportados en los tres muestreos realizados.



Demanda Química de oxígeno (DQO). La DQO mide el contenido de materia orgánica en el agua presente en el lixiviado. La DQO tiene un valor máximo de 17958 mg/L y un mínimo de 9850 mg/L. La figura 7 muestra los valores de DQO encontrados en el lixiviado.

Figura 7. DQO del lixiviado proveniente del Carrasco reportados en los tres muestreos realizados.



La tabla 10 muestra los valores de los parámetros encontrados en el lixiviado durante los meses de muestreo.

Tabla 10. Parámetros analizados en el lixiviado proveniente del Carrasco reportados durante los tres meses del muestreo.

Parámetro	Muestras			Promedio	*Norma
	1	2	3		
Fecha	Feb 25	Abr 18	Jun 23		
Temperatura (°C)	26	28.9	23	26	≤40
PH	7.7	8.0	7.5	7.7	5-9
SST (mg/L)	950.55	428.36	795.33	724.75	-
DQO(mg/L O ₂)	16980	9850	17958	14929.33	-
Turbidez (UTN)	810	298	650	586	-
Color Aparente (UPC)	9529	7890	11328	9582.33	-

*Decreto 1074 de 1997 Fuente: Autor

El lixiviado generado en el relleno sanitario “El Carrasco” presenta valores altos de las variables medidas, por lo tanto es necesario hacer un tratamiento fisicoquímico acompañado de un tratamiento biológico para poder remover en mas de un 50% estas variables.

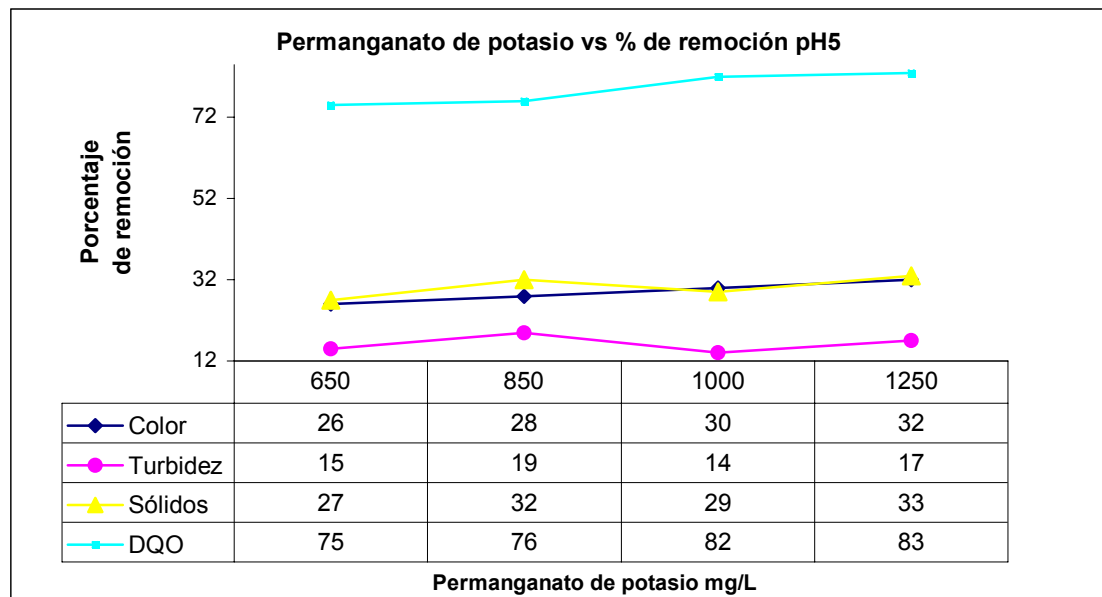
Todas las pruebas reportadas en el tratamiento se hicieron por duplicado y se realizaron en el laboratorio de aguas del CEIAM-Guatemala.

4.2.3 Test de jarras

Los rendimientos conseguidos al someter el efluente (lixiviado) del relleno sanitario al tratamiento de oxidación / coagulación-floculación/ neutralización se representaron por medio de graficas, en las que se representa la eficacia de disminución de la DQO, sólidos en suspensión totales (SST) , turbidez y color representado en % de remoción frente a la dosis del oxidante o coagulante para cada pH de operación. La eficiencia del tratamiento se expresa en % de remoción debido a la gran variabilidad del lixiviado.

4.2.4 Oxidación.

Figura 8. Porcentaje de remoción de color, turbidez, sólidos y DQO vs. Concentración de KMnO_4 a pH 5.



En la figura 8 se observa que con un pH de 5 los mejores porcentajes de remoción se obtuvieron con una concentración de 850mg/L y 1250mg/L de permanganato de potasio; el porcentaje de remoción de turbidez fue del 19%, y de sólidos fue del 32% con 850 mg/l, en el caso de la remoción de color con un 35% y DQO con un 83% se obtuvo con una concentración de 1250 mg/L; las remociones de color, turbidez y sólidos fueron pequeñas ya que el permanganato actúa como un agente oxidante.

En el test de jarras se observó que a 1250mg/L reacciona más rápido que las demás concentraciones ya que a la media hora se puede observar un cambio de color de negro a un marrón y un precipitado, con las otras concentraciones estos cambios se demoraron más de una hora.

En la figura 9 se observa que con un pH 6 los mejores porcentajes de remoción se obtuvieron con una concentración de 850 mg/L de permanganato de potasio, el porcentaje de remoción de color fue de 35%, turbidez 21%, y DQO el 91%, en la remoción de sólidos el mayor porcentaje se obtuvo con una concentración de 1000 mg/L de permanganato de potasio con un 35% de remoción.

Se observó un cambio de color de negro a marrón con un precipitado en un tiempo de una hora.

Figura 9. Porcentaje de remoción de color, turbidez, sólidos y DQO vs. Concentración de KMnO_4 a pH 6.

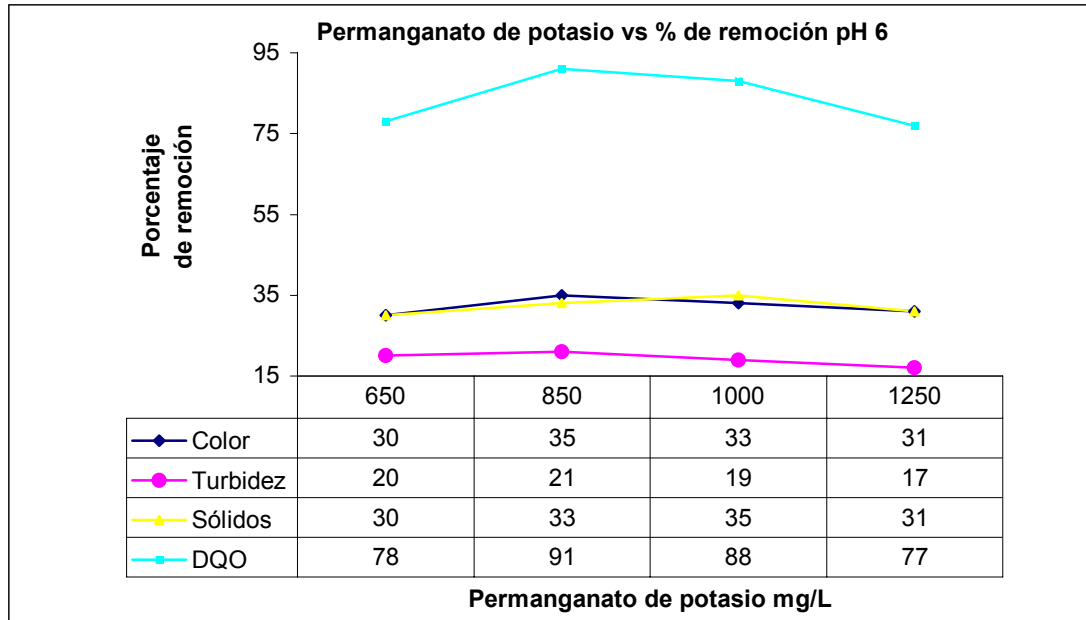
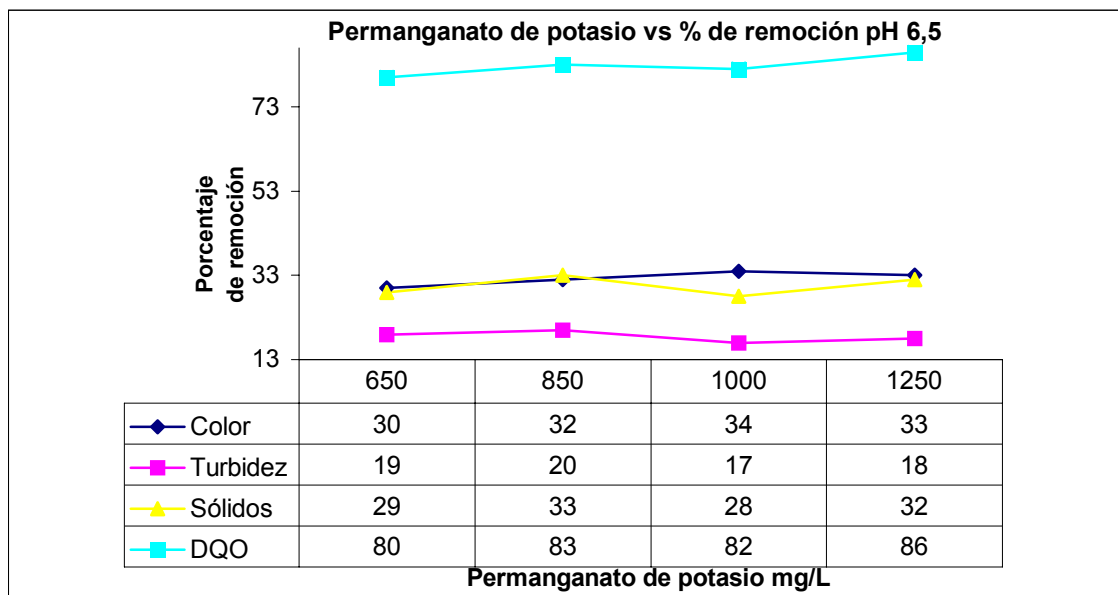


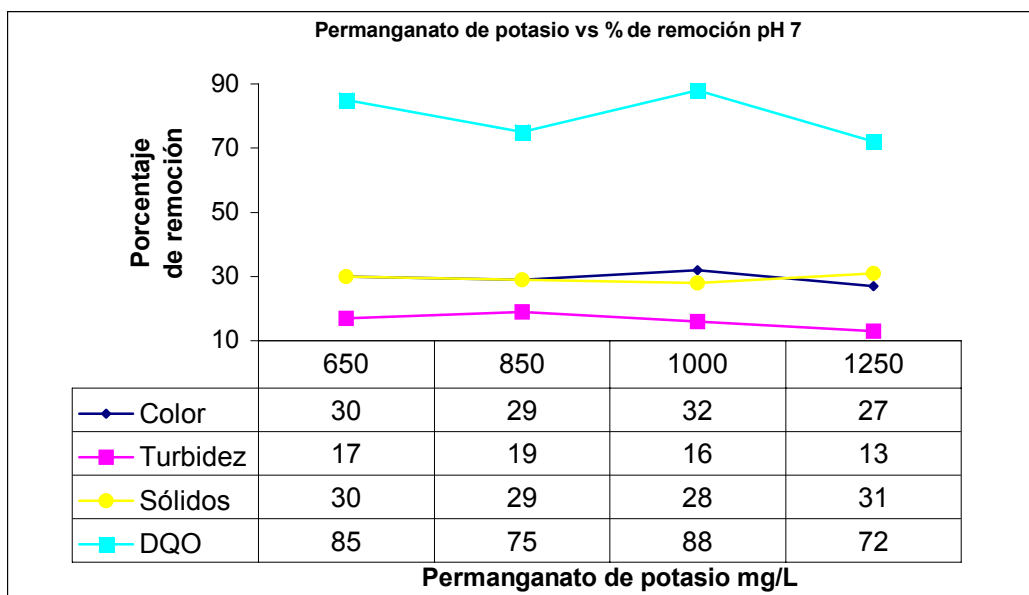
Figura 10. Porcentaje de remoción de color, turbidez, sólidos y DQO vs. Concentración de KMnO_4 a pH 6.5.



En la figura 10 se observa que con un pH 6,5 los mejores porcentajes de remoción fueron: color 34% con 1000 mg/l, turbidez 20% y sólidos 33% con 850 mg/l y DQO 86% con 1250 mg/l.

Se observó un cambio de color de negro a marrón con un precipitado en un tiempo de media hora.

Figura 11. Porcentaje de remoción de color, turbidez, sólidos y DQO vs. Concentración de KMnO_4 a pH 7.



En la figura 11 se observa que con un pH 7 los mejores porcentajes de remoción fueron: color 32%, DQO 88% con 1000 mg/l, Turbidez 19% con 850 mg/l y sólidos 31% con 1250 mg/l.

Se observó un cambio de color de negro a marrón con un precipitado en un tiempo de una hora y media.

De las graficas anteriores se observa que con una concentración de 850mg/l de permanganato de potasio a un pH de 6.0, se consiguen los mejores porcentajes de remoción, para el color fue del 35%, Turbidez 21%, sólidos 33% y DQO el 91%, se consiguió una eficiente remoción de la carga orgánica que es lo principal en esta etapa, las remociones de las otras variables fue poca debido a que el permanganato actúa como agente oxidante.

El pH de trabajo del permanganato es amplio ya que se consigue buenos resultados en el intervalo de 5-7, la adición del ácido sulfúrico ayuda a la remoción de la turbidez y el color debido a la disolución de las partículas suspendidas.

Las variables estudiadas muestran dependencia con la dosis del permanganato.

Durante el procedimiento del test de jarras se observa una decoloración del lixiviado de negro a un color marrón claro (ver figura 12), con un floculo no muy denso que se demoró en decantar casi una hora. El olor del lixiviado cambio de penetrante a suave.

Se decidió trabajar con un pH de 6 y una dosis de 850 mg/l de permanganato de potasio porque a estas condiciones de trabajó se consigue la mejor remoción de la materia orgánica.

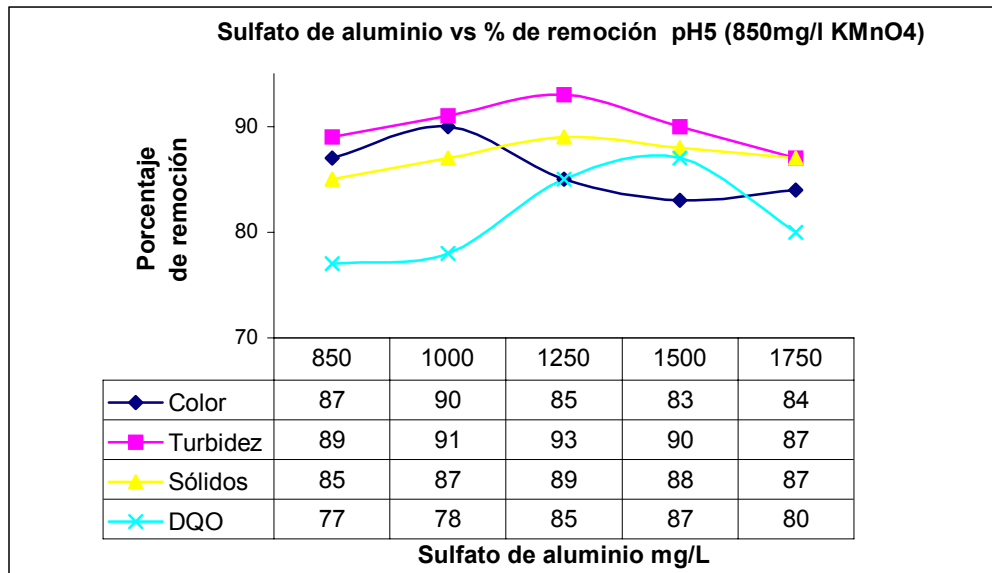
Figura 12. Oxidación con permanganato de potasio a pH 5.5



4.2.6 COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN

En la figura 13 se observa que con un pH 5 los mayores porcentajes de remoción fueron: color 90% con 1000 mg/l de sulfato de aluminio, turbidez 93% y sólidos 89% con 1250 mg/l, DQO 87% con 1500 mg/l. Se observó un cambio de color de marrón a un amarillo transparente con la formación del floculo que era de apariencia no muy denso, con un tiempo de decantación de 45 minutos. La aparición de este floculo es casi inmediata a la adición del sulfato de aluminio.

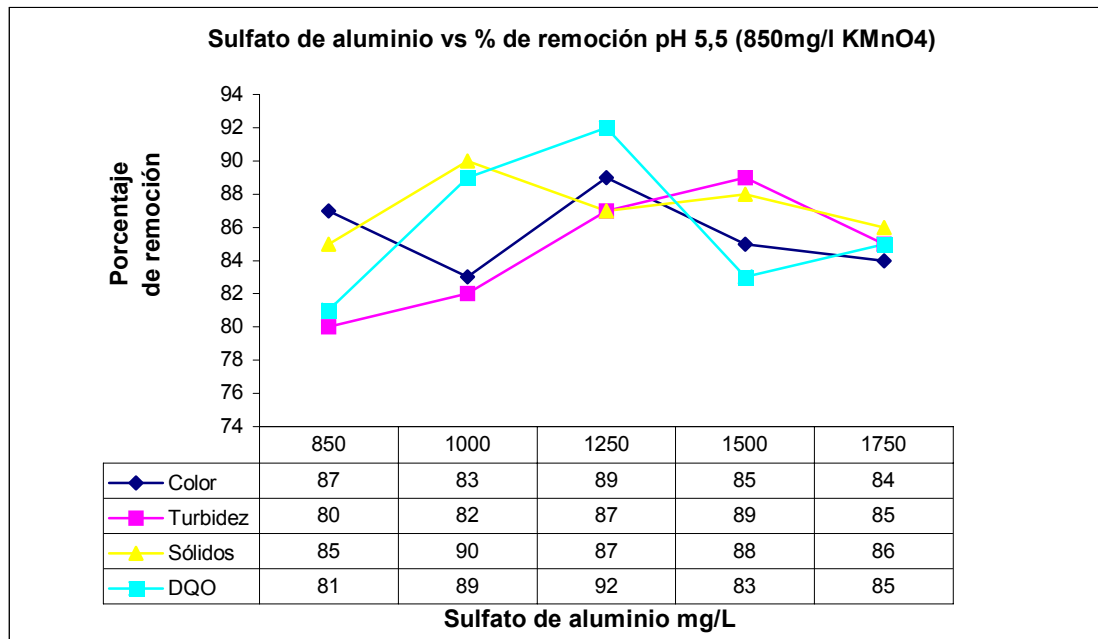
Figura 13. Porcentaje de remoción de color, turbidez, sólidos y DQO vs. Concentración de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ a pH 5 y 850 mg/l KmnO_4 .



En la figura 14 se observa que con un pH 5,5 que los mayores porcentajes de remoción fueron: color 89 % y DQO 92 con 1250 mg/l de sulfato de aluminio, turbidez 89% con 1500 mg/l, sólidos 90% con 1000 mg/l.

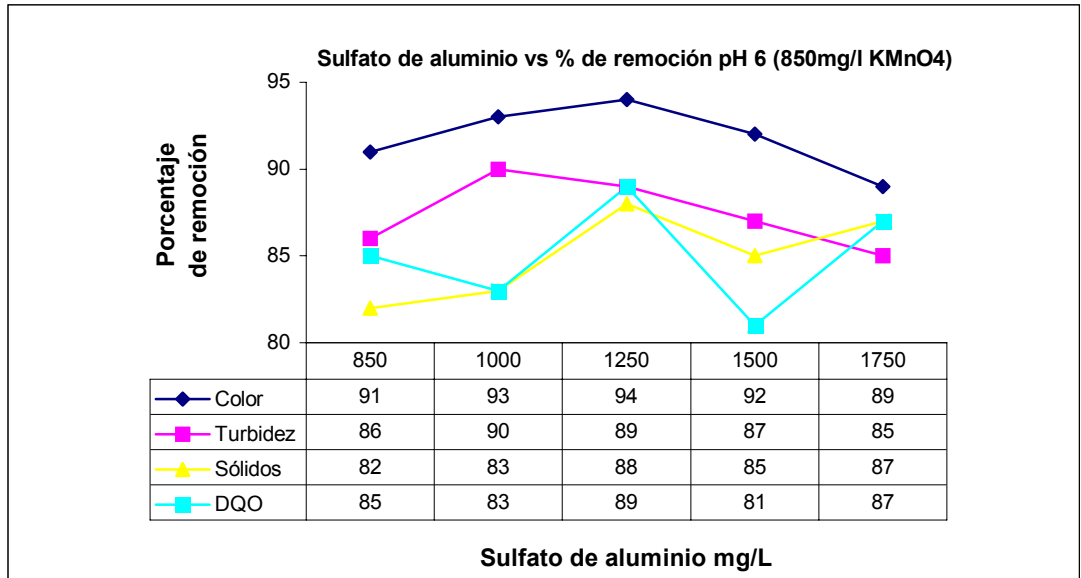
Se observó un cambio de color de marrón a un amarillo transparente con un precipitado en un tiempo casi inmediato a la adición del sulfato de aluminio. El floculo formado era espeso y su tiempo de decantación fue de 20 minutos. El olor característico del lixiviado que es penetrante cambio a un olor suave.

Figura 14. Porcentaje de remoción de color, turbidez, sólidos y DQO vs. Concentración de $Al_2(SO_4)_3$ a pH 5.5



En la figura 15 se observa que con un pH 6.0 que los mayores porcentajes se consiguen con una concentración de 1250 mg/l de Sulfato de aluminio el porcentaje de remoción de color fue del 94%, sólidos 88% DQO 89% y turbidez 90% con 1000 mg/l de sulfato de aluminio.

Figura 15. Porcentaje de remoción de color, turbidez, sólidos y DQO vs. Concentración de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ a pH 6.



Se observó un cambio de color de marrón a un amarillo transparente con un precipitado en un tiempo casi inmediato a la adición del sulfato de aluminio. El floculo formado era espeso y su tiempo de decantación fue de 35 minutos. El olor característico del lixiviado que es penetrante cambio a un olor suave.

De las graficas anteriores se observa que el mejor porcentaje de remoción de color 94% se obtiene con un pH 6 y 1250 mg/l de sulfato de aluminio, Turbidez 93% con un pH de 5 y 1250 mg/l de sulfato de aluminio, sólidos 90% con un pH de 5.5 y 1000 mg/l de sulfato de aluminio, DQO 92% con un pH de 5.5 y 1250 mg/l de sulfato de aluminio, debido a la variabilidad del lixiviado no se tiene una dosis y un pH que tenga el mejor porcentaje de remoción de las variables estudiadas, en este caso lo que se tiene en cuenta es la remoción de la materia orgánica que es nuestro principal objetivo, por eso se decidió trabajar con un pH de 5.5 y una dosis de 1250 mg/l de sulfato de aluminio.

El lixiviado presenta características de suspensión coloidal, por su diferente composición, se observa el fenómeno de desestabilización y reestabilización de coloides en el proceso de coagulación-floculación .

Para poder estudiar el efecto que tiene la dosis del coagulante y el pH en el rendimiento del proceso de coagulación es necesario plantear un experimento factorial para conseguir el óptimo de respuesta, dificultad que presenta el ensayo de jarras normal que cambia una variable dejando la otra fija, no variando las dos simultáneamente. Los resultados analizados serán aparentes que se traducen en rendimientos aproximados.

La turbiedad muestra el fenómeno de reestabilización de los coloides (característica propia de una dispersión coloidal), el color y la concentración de DQO presentan coagulación por adsorción-neutralización que exhibe dependencia con la dosis del coagulante.

La adsorción de las especies hidrolizadas del coagulante se da en la superficie del coloide, siendo éstas las responsables de la reducción de carga de la partícula coloidal [10].

Durante el procedimiento del test de jarras se observa que en el proceso de ajuste del pH del lixiviado, la adición de ácido no representa una disminución considerable en la carga orgánica presente en el lixiviado expresada en DQO (es importante resaltar la formación de espuma con un aumento en la temperatura), el único fenómeno que ocurre en esta etapa es una disolución de las partículas suspendidas responsables de la turbiedad, también se observa la decoloración del lixiviado de negro a un color amarillo casi transparente, con un floculo denso que se demoró en decantar casi 25 minutos en promedio. Se emiten gases que son tóxicos por la reacción de ácido sulfúrico con el lixiviado

Figura 16 Floculación-coagulación con sulfato de aluminio a pH 5.5



4.2.7 NEUTRALIZACIÓN

En esta etapa se sometió el lixiviado al proceso de oxidación con un pH de 6.0 y una concentración de 850 mg/l de permanganato de potasio; el proceso de floculación se realizó con un pH de 5.5 con una concentración de 1250 mg/l de Sulfato de aluminio. Una vez realizado todo el procedimiento se neutralizo con hidróxido de calcio tipo comercial $\text{Ca}(\text{OH})_2$, para esto se le adiciono el hidróxido de calcio como una titulación con agitación constante hasta neutralización midiendo el volumen utilizado.

Este procedimiento se realizo por duplicado necesitando 2250ml y 2253ml de Cal. No se observo cambio de color, se aprecia un precipitado blanco.

4.3. ANÁLISIS DE LOS DATOS PARA LA OXIDACIÓN Y COAGULACIÓN/FLOCULACIÓN

Para poder aproximar el proceso de oxidación y coagulación a un modelo teórico es necesario tener en cuenta diferentes factores que son controlables y no controlables, tales como: la dosis de coagulante, pH, concentración de sustancias orgánicas en el agua (DQO y color), concentración de los coloides en el agua (turbiedad), alcalinidad presente en el agua, intensidad de la mezcla rápida y gradiente de velocidad de la mezcla lenta, temperatura. Es importante saber como los efectos de estas variables afectan la respuesta del sistema. Es por eso necesario suminístrale al programa la mayor cantidad de variables controlables cuantificables para que por medio de un análisis de varianza se evalúe el nivel de significancia o influencia en la repuesta

Las observaciones anteriores se pueden describir con un modelo estadístico de regresión lineal múltiple como el siguiente

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \beta_k \cdot X_k$$

Se utiliza el término lineal por que la ecuación es una función lineal de los parámetros desconocidos $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$. Frecuentemente estos modelos de regresión se emplean como funciones de aproximación donde se desconoce la verdadera relación funcional entre los factores pero en ciertos rangos de las variables independientes el modelo de regresión lineal múltiple constituye una aproximación adecuada (Ramos, J 2003).

También puede existir una interacción entre los factores que intervienen en el proceso. Estas interacciones se pueden analizar con los métodos de regresión

lineal múltiple, donde sería un modelo de segundo grado con interacción de variables (Ramos, J 2003)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \beta_3 \cdot X_1^2 + \beta_4 \cdot X_2^2$$

Los resultados generados por Statgraphics son los siguientes:

Utilizando un modelo cuadrático inicialmente se ingresaron todas las variables candidatas independientes controlables y no controlables cuantificables

4.3.1 Resultados y discusiones. El software utilizado para el manejo estadístico fue Statgraphics Plus 5.1 para el tratamiento de los datos por análisis de regresión múltiple.

El programa Statgraphics Plus 5.1 calcula dos valores que son importantes para la interpretación de los datos; estos valores son: P, R².

El valor de P (componente del análisis de varianza que sirve para desarrollar su significancia), cuando el valor de P es menor que 0.05 muestra una relación estadística significativa entre las variables en el nivel de la confianza del 95.0%,

El valor de R² explica que el modelo se encuentra relacionado en un porcentaje con la variabilidad de la variable dependiente

Oxidación: Permanganato de potasio

En el anexo 2 se relacionan los datos empleados para el análisis con el STATGRAPHICS.

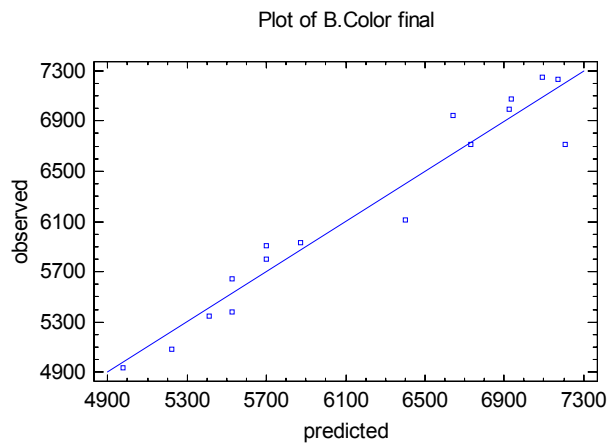
- **Regresión múltiple Color**

Variable dependiente: B.Color final

Variables independientes: B.Color inicial, B.pH, Permanganato de potasio, Permanganato de potasio*B.pH

$$\text{B.Color final} = 3234,43 + 0,709923*\text{B.Color inicial} - 522,078*\text{B.pH} - 3,35323*\text{Permanganato de potasio} + 0,514271*\text{Permanganato de potasio*B.pH}$$

Figura 17. Valores observados vs. valores predichos por la variable B. Color final



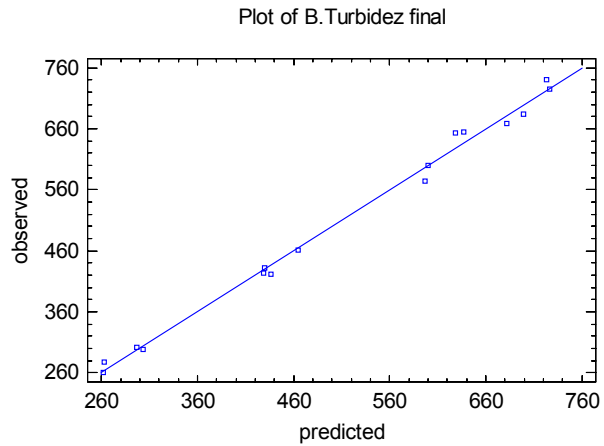
- **Regresión múltiple Turbiedad**

Variable dependiente: B.Turbidez final

Variables Independientes: B.Turbidez inicial, B.pH, Permanganato de potasio, Permanganato de potasio*B.pH

$$\text{B.Turbidez final} = 88,9243 + 0,836053*\text{B.Turbidez inicial} - 20,939*\text{B.pH} - 0,105676*\text{Permanganato de potasio} + 0,0228748*\text{Permanganato de potasio*B.pH}$$

Figura 18. Valores observados vs. valores predichos por la variable B. Turbidez final



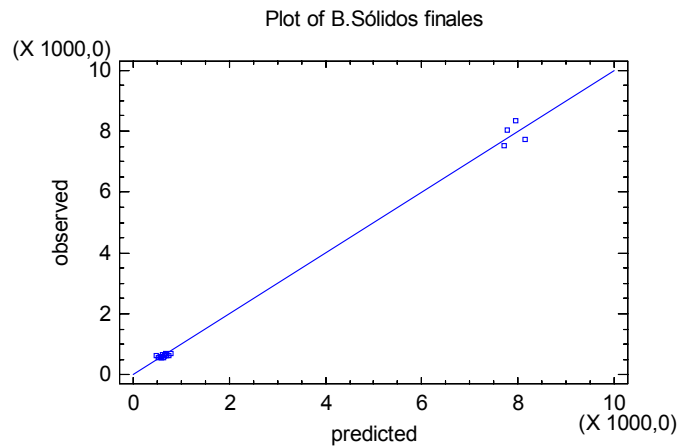
- **Regresión múltiple sólidos**

Variable dependiente: B.Sólidos finales

Variables Independientes: B.Sólidos iniciales, B.pH, Permanganato de potasio, Permanganato de potasio*B.pH

$$\text{B.Sólidos finales} = 2903,54 + 0,684839*\text{B.Sólidos iniciales} - 441,324*\text{B.pH} - 2,94809*\text{Permanganato de potasio} + 0,451028*\text{Permanganato de potasio*B.pH}$$

Figura 19. Valores observados vs. valores predichos por la variable B. sólidos finales

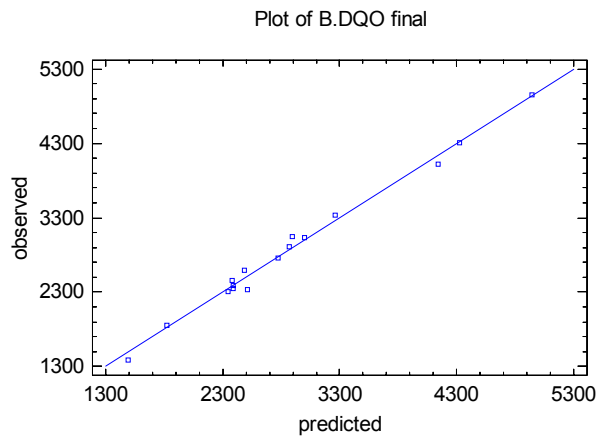


- **Regresión múltiple DQO final**

Variable dependiente: B.DQO final

Variables independientes: B.DQO inicial, B.Color inicial, B.Sólidos iniciales, B.Turbidez inicial, B.pH, Permanganato de potasio, Permanganato de potasio*B.pH, Permanganato de potasio*B.DQO final, Permanganato de potasio^2 y Permanganato de potasio*B.Color inicial.

Figura 20. Valores observados vs. Valores predichos por la variable B. DQO final



$$\begin{aligned} \text{B.DQO final} = & 13208,8 + 0,115747*\text{B.DQO inicial} - 1,05223*\text{B.Color inicial} - \\ & 0,0154476*\text{B.Sólidos iniciales} + 2,52011*\text{B.Turbidez inicial} - 451,133*\text{B.pH} - \\ & 14,923*\text{Permanganato de potasio} + 0,408383*\text{Permanganato de potasio*B.pH} + \\ & 0,000948893*\text{Permanganato de potasio*B.DQO final} + 0,0011071*\text{Permanganato} \\ & \text{de potasio}^2 + 0,000790724*\text{Permanganato de potasio*B.Color inicial} \end{aligned}$$

Tabla11. Valores de P y R² calculados por el Statgraphics en la etapa de la oxidación

VARIABLE DEPENDIENTE	VARIABLE INDEPENDIENTE	P	R ²
Color final	KMnO ₄ , pH, color inicial ,KMnO ₄ *pH	<0.05	91.53
turbidez final	KMnO ₄ , pH, turbidez inicial ,KMnO ₄ *pH	<0.05	99.14
Sólidos finales	KMnO ₄ , pH, sólidos iniciales ,KMnO ₄ *pH	<0.05	99.58
DQO final	10 variables	<0.05	97.32

Se obtuvo las diferentes ecuaciones de regresión lineal múltiple para las diferentes variables dependientes, el valor de R² es mayor del 97% en todos los casos lo que nos indica que los diferentes modelos se encuentran relacionados y hay una relación estadística significativa con un 95% de nivel de confianza.

El programa nos da información sobre las variables que son estadísticamente significantes o no, en este caso la variable permanganato de potasio no es estadísticamente significativa en el proceso de la remoción de color, turbidez y sólidos ya que esta variable no influye notoriamente porque actúa como agente oxidante en esta etapa del proceso, sin embargo se obtuvo apreciables porcentajes de remoción de color, turbidez y sólidos debido a que el dióxido de manganeso (insoluble a los pH en que se trabajó), producto de la oxidación del permanganato forma floculos absorbentes de diferentes sustancias orgánicas e inorgánicas. La absorción de la materia orgánica sobre el dióxido de manganeso se ve favorecida por cationes divalentes en el agua.

La adición del ácido sulfúrico hace que ocurra una disolución de las partículas suspendidas responsables de la turbiedad y el color.

FLOCULACION. SULFATO DE ALUMINIO

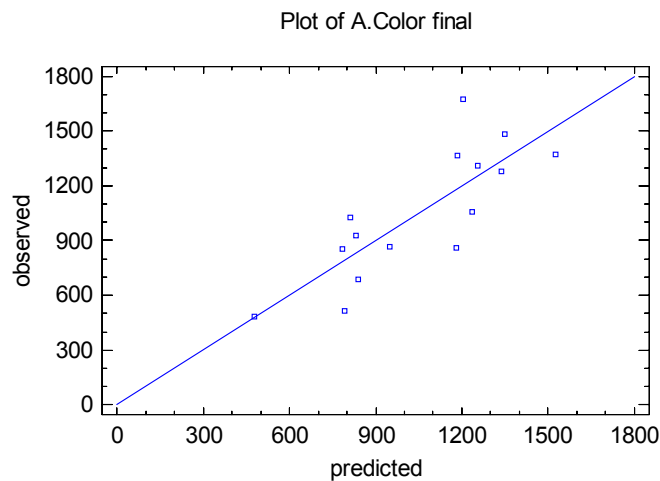
- **Regresión múltiple color**

Variable dependiente: A.Color final

Variables independientes: A.Color inicial, A.pH, Sulfato de aluminio, Sulfato de aluminio*A.pH.

Color final = $-502,185 + 0,177474 \cdot \text{A.Color inicial} - 59,9945 \cdot \text{A.pH} + 2,19164 \cdot \text{Sulfato de aluminio} - 0,346249 \cdot \text{Sulfato de aluminio} \cdot \text{A.pH}$

Figura 21. Valores observados vs. valores predichos por la variable A. color final



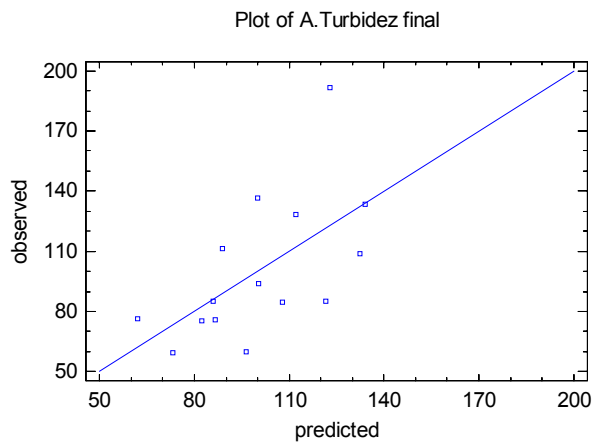
- **Regresión múltiple turbidez**

Variable dependiente: A.Turbidez final

Variables independientes: A.Turbidez inicial, A.pH, Sulfato de aluminio, Sulfato de aluminio*A.pH

$$\text{A.Turbidez final} = -100,77 + 0,105439 \cdot \text{A.Turbidez inicial} + 24,2435 \cdot \text{A.pH} - 0,00528377 \cdot \text{Sulfato de aluminio} - 0,00130874 \cdot \text{Sulfato de aluminio} \cdot \text{A.pH}$$

Figura 22. Valores observados vs. valores predichos por la variable A. Turbidez final



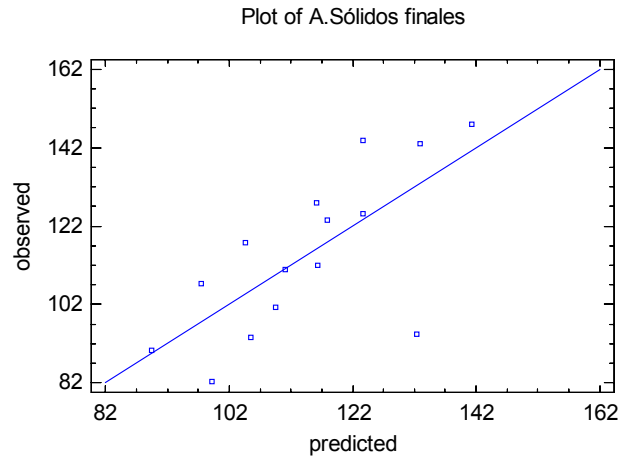
- **Regresión múltiple sólidos**

Variable dependiente: A.Sólidos finales

Variables independientes: A.Sólidos iniciales, A.pH, Sulfato de aluminio, Sulfato de aluminio*A.pH

A.Sólidos finales = $-236,327 + 0,150133 \cdot \text{A.Sólidos iniciales} + 44,1443 \cdot \text{A.pH} + 0,0979264 \cdot \text{Sulfato de aluminio} - 0,0206471 \cdot \text{Sulfato de aluminio} \cdot \text{A.pH}$

Figura 23. Valores observados vs. valores predichos por la variable A. Sólidos finales

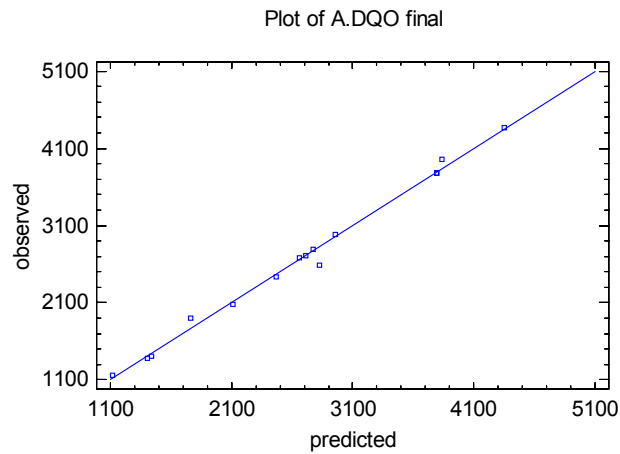


- **Regresión múltiple DQO final**

Variable dependiente: A.DQO final

Variables independientes: A.DQO inicial, A.Color inicial, A.Sólidos iniciales, A.Turbidez inicial, A.Ph, Sulfato de aluminio, A.pH*Sulfato de aluminio, A.DQO inicial*Sulfato de aluminio, Sulfato de aluminio², A.Color inicial*Sulfato de aluminio, A.Turbidez inicial*Sulfato de aluminio, A.Sólidos iniciales*Sulfato de aluminio

Figura 24. Valores observados vs. Valores predichos por la variable A. DQO final



$$\begin{aligned} \text{A.DQO final} = & 34000,3 - 0,032657 \cdot \text{A.DQO inicial} - 2,57736 \cdot \text{A.Color inicial} - \\ & 24,1901 \cdot \text{A.Sólidos iniciales} + 47,2569 \cdot \text{A.Turbidez inicial} - 6631,17 \cdot \text{A.pH} - \\ & 20,6767 \cdot \text{Sulfato de aluminio} + 4,71948 \cdot \text{A.pH} \cdot \text{Sulfato de aluminio} - \\ & 0,0000711435 \cdot \text{A.DQO inicial} \cdot \text{Sulfato de aluminio} - 0,00587559 \cdot \text{Sulfato de} \\ & \text{aluminio}^2 + 0,00209077 \cdot \text{A.Color inicial} \cdot \text{Sulfato de aluminio} - \\ & 0,0327866 \cdot \text{A.Turbidez inicial} \cdot \text{Sulfato de aluminio} + 0,0232316 \cdot \text{A.Sólidos} \\ & \text{iniciales} \cdot \text{Sulfato de aluminio} \end{aligned}$$

Tabla 12. Valores de P y R² calculados por el Statgraphics en la etapa de la coagulación-floculación

VARIABLE DEPENDIENTE	VARIABLE INDEPENDIENTE	P	R ²
Color final	Al ₂ (SO ₄) ₃ , pH, color inicial, Al ₂ (SO ₄) ₃ *pH	<0.05	52.14
turbidez final	Al ₂ (SO ₄) ₃ , pH, turbidez inicial, Al ₂ (SO ₄) ₃ *pH	>0.05	33.36
Sólidos finales	Al ₂ (SO ₄) ₃ , pH, sólidos iniciales, Al ₂ (SO ₄) ₃ *pH	>0.05	29.63
DQO final	12 variables	<0.05	94.93

Se obtuvo las diferentes ecuaciones de regresión lineal múltiple para las diferentes variables dependientes, los valores de R^2 y P muestran que estas variables no siguen una linealidad ya que estas presentan dependencia con el pH y la dosis de sulfato de aluminio, para poder conseguir una relación estadística en el análisis de varianza se debe hacer experimentos factoriales que muestren el efecto que tienen en esta etapa del proceso, en el experimento planteado inicialmente no se trabajó de esta forma, ya que en el test de jarras se deja una variable fija y se cambia la otra.

El pH es uno de los factores de mayor importancia y efecto sobre el proceso, pues afecta la solubilidad de los compuestos formados, así como la carga sobre las partículas coloidales y el tiempo requerido para la formación del floc, ya que existe una zona de pH donde se produce una buena floculación en corto plazo y con una dosis dada de coagulante.

Para cada valor de pH existe una concentración máxima de partículas coloidales que permite la predominancia del mecanismo de adsorción-neutralización para su desestabilización, en el cual las especies formadas como resultado de la adición del coagulante y sus reacciones de hidrólisis en medio acuoso son las responsables de la desestabilización de los coloides. La adsorción de las especies hidrolizadas del coagulante se da en la superficie del coloide, siendo éstas las responsables de la reducción de carga de la partícula coloidal.

4.4. EFICIENCIA DEL TRATAMIENTO FISICOQUÍMICO

Se realizó un monitoreo para comprobar la eficiencia del tratamiento propuesto; para esto se realizó la caracterización del lixiviado antes y después del tratamiento fisicoquímico.

4.4.1 Determinación de metales

Absorción atómica comparativa. Para la cuantificación de los metales se usó un espectrofotómetro atómica Perkin Elmer modelo 372 del laboratorio del CEIAM de Guatiguara, se utilizó 5 patrones para cada metal, dentro del rango óptimo establecido en la tabla 13 para la elaboración de las curvas de calibración

Tabla 13. Condiciones de trabajo para Espectrofotometría de Absorción atómica (Laboratorio del CEIAM Guatiguara)

Metal	λ (nm)	Slit (nm)	Sensibilidad ($\mu\text{g/ml}$)	Rango óptimo ($\mu\text{g/ml}$)	Límite de detección($\mu\text{g/ml}$)	Fuente de radiación
Cr	358.2	0.7	0.1	0.5-5.0	0.003	Cátodo hueco
Cu	324.8	0.7	0.09	0.5-5.0	0.002	Cátodo hueco
Fe	248.45	0.2	0.12	0.5-5.0	0.005	Cátodo hueco
Mg	285.4	0.7	0.007	0.1-0.5	0.0001	Cátodo hueco
Ni	231.4	0.2	0.15	0.5-5.0	0.005	Cátodo hueco
Pb	283.5	0.7	0.5	1.0-20.0	0.01	Cátodo hueco
Na	589.6	0.2	0.015	0.1-1.0	0.0002	Cátodo hueco
K	766.5	0.7	0.04	0.1-2.0	0.001	Cátodo hueco

Fuente: Autor

La lectura de magnesio fue la última en realizarse debido a la interferencia química que presenta, fue necesario agregar 1 ml de óxido de lantano al 5% a las muestras y patrones.

En la tabla No 14 se puede observar los resultados obtenidos en el análisis de metales para el lixiviado en cada etapa del proceso fisicoquímico

Tabla 14. Metales encontrados en la parte líquida + sólido en el tratamiento físico-químico propuesto

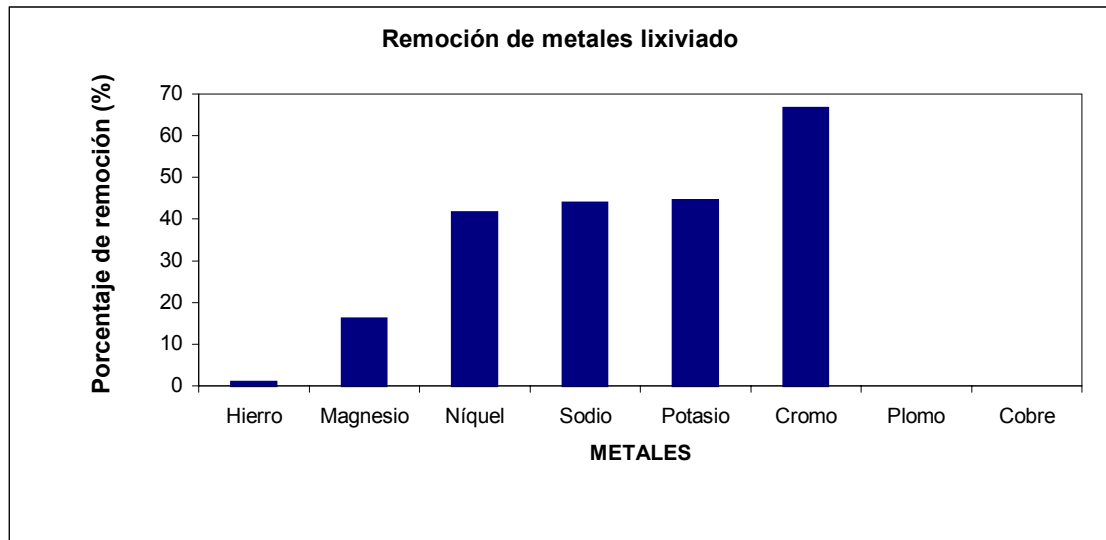
METAL	Líquido lixiviado sin tratar	Oxidación	Floculación	% remoción	Norma de vertimiento
Hierro(ppm)	4.23	4.20	4.19	0.94	---
Cromo(ppm)	0.54	0.24	0.18	66.66	0.5 mg/l
Sodio(ppm)	129.45	88.96	85.47	43.98	---
Potasio(ppm)	193.25	115.25	107.25	44.50	---
Cobre(ppm)	0.12	0.12	0.12	0	3.0 mg/l
Níquel(ppm)	0.60	0.42	0.35	41.66	2.0 mg/l
Magnesio(ppm)	19.18	16.99	16.09	16.11	---
Plomo(ppm)	N.D.	N.D.	N.D.	----	0.5 mg/l

N.D. No Detectable

Fuente: Autor

Los metales son absorbidos en ambas etapas, quedando estos retenidos en la parte del lodo.

Figura 25. Remoción de metales presentes en el lixiviado después del tratamiento fisicoquímico



De la grafica se puede concluir que hay una buena remoción de los metales analizados, la mayor remoción corresponde al cromo 66.66%, le sigue el potasio con 44.5%, Sodio 43.98%, Níquel 41.66%, Magnesio 16.11%, y Hierro 0.94%; no se obtuvo remoción con el cobre, y no se pudo detectar la concentración del plomo por la sensibilidad del equipo.

La concentración reportada después del tratamiento cumple con la norma de vertimiento establecida en la resolución 1074 de 1997.

No se le hizo ningún análisis a los lodos obtenidos después del tratamiento, estos deben ser estabilizados para su posterior reutilización (abonos) o disposición final.

4.4.2 Determinación de porcentaje de remoción

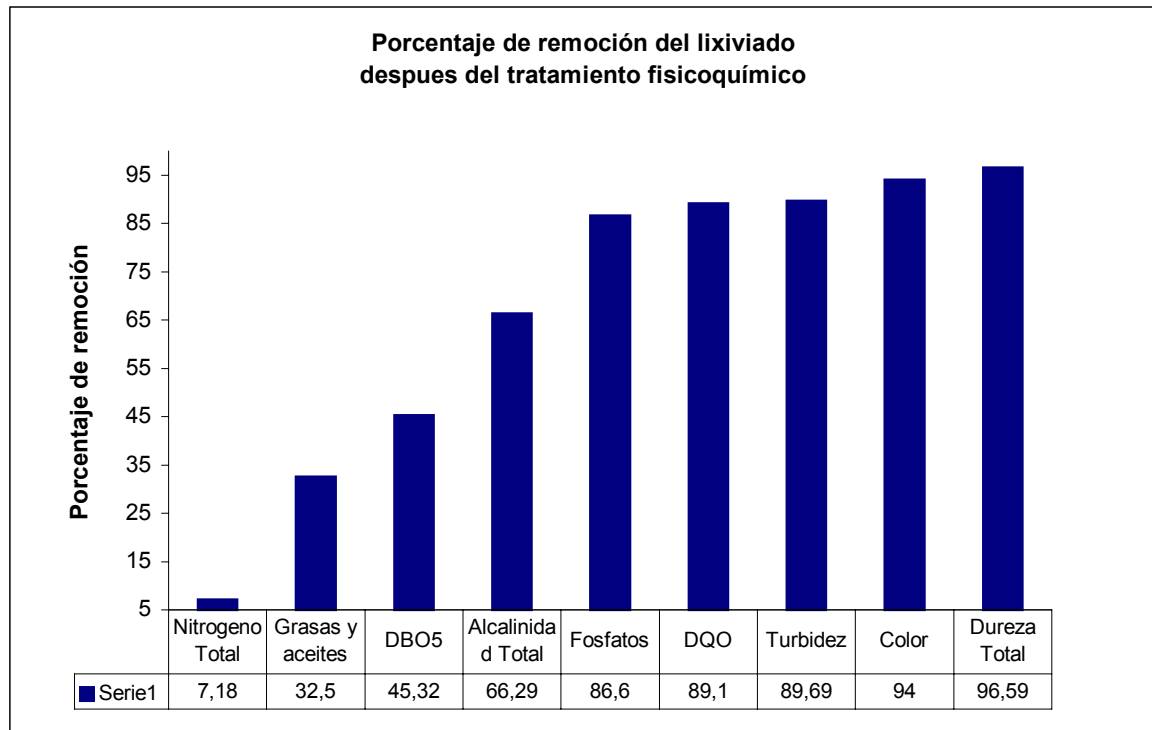
Se realizó el tratamiento fisicoquímico propuesto (oxidación / coagulación-floculación y neutralización) al lixiviado; y se comparo el resultado con la norma de vertimientos.

Tabla 15. Parámetros que se compararon según la norma después del tratamiento fisicoquímico propuesto.

PARAMETRO	LIXIVADO INICIAL	LIXIVIADO FINAL	% REMOCION	NORMA DE VERTIMIENTO
PH	8.35	7.00	----	5 – 9 unidades
Temperatura	23	24	----	≤ 30°C
Alcalinidad Total	32589mg/LCaCO ₃	10985mg/LCaCO ₃	66.29	----
Dureza Total	2589 mg/LCaCO ₃	88.19 mg/LCaCO ₃	96.59	----
Color	11328 UPC	679 UPC	94.00	----
Turbidez	650 UTN	67 UTN	89.69	----
Grasas y aceites	10.89 mg/L	7.35 mg/l	32.50	100
Nitrógeno Total	1389.45 mg/L	1289.65 mg/L	7.18	---
DBO ₅	7893.5 mg/Lde O ₂	4315.8 mg/l de O ₂	45.32	1000
DQO	17958 mg/l O ₂	1956 mg/l O ₂	89.10	2000
Fosfatos	69.93mg/l de P	9.37 mg/l de P	86.60	----
ST	15968 mg/l	8598 mg/l	46.15	----
SD	12986 mg/l	6589 mg/l	49.26	----
STV	7264 mg/l	3755 mg/l	48.30	----
SST	795 mg/l	425 mg/l	46.54	800
SSTV	196 mg/l	145 mg/l	26.02	----

Fuente: Autor

Figura 23. Remoción de algunos parámetros en el lixiviado después del tratamiento fisicoquímico propuesto.



En la grafica se puede observar que las remociones fueron mayores del 50 % en los siguientes parámetros: alcalinidad total, fosfatos, DQO, turbidez, color y dureza total.

El contenido de las altas cargas de nutrientes como nitrógeno y fósforo produce la eutroficación de las aguas superficiales que produce problemas ecológicos.

La remoción del nitrógeno es baja por lo tanto, se requiere un tratamiento biológico de nitrificación–desnitrificación posterior para retirar los contaminantes inorgánicos y orgánicos no biodegradables.

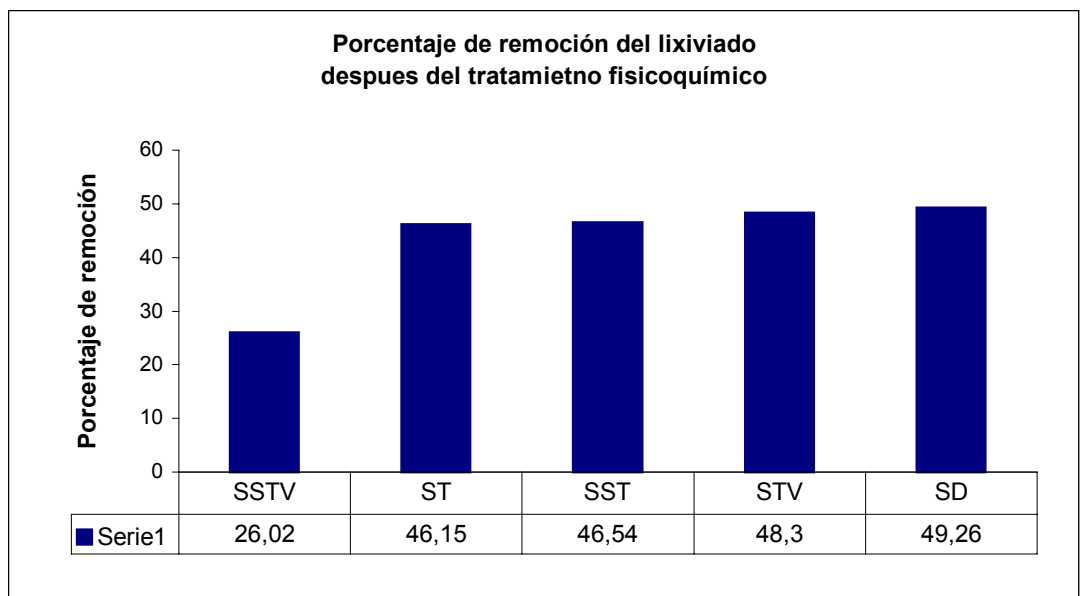
La concentración de DBO₅ mide la cantidad de materia orgánica biodegradable, mediante el consumo de oxígeno, por los microorganismos presente en el agua.

Las aguas con alto contenido de materia orgánica biodegradable (valores altos de DBO) consumen oxígeno disuelto en su biodegradación y así interfieren con la sobre vivencia de otros organismos (como los peces) que requieren el OD para su respiración, la remoción de este fue del 45%.

Un alto contenido de fósforo produce un desarrollo desorbitado de algas, el cual es causa de condiciones inadecuadas para ciertos usos benéficos del agua, la remoción de fósforo medido como fosfato fue del 86.6%

El contenido de grasas y aceites presentes en el agua dificulta el proceso de descomposición biológica, ya que el oxigeno disponible se gasta en su descomposición, el porcentaje de remoción fue del 32.5%

Figura 24. Remoción de sólidos del lixiviado después del tratamiento fisicoquímico propuesto



Se obtuvieron muy buenas remociones de los sólidos presentes en el lixiviado, los sólidos suspendidos totales están relacionados con la turbidez presente en el agua se obtuvo una remoción del 46.54%; los sólidos totales volátiles nos da información del contenido de la materia orgánica removible el porcentaje de remoción fue del 48.3% y los sólidos sedimentables y totales nos indica la cantidad de sólidos que se generan después del proceso de la floculación.

5. COMPARACIÓN DEL TRATAMIENTO PROPUESTO CON OTROS A NIVEL DE LABORATORIO

En estudios anteriores realizados por el CEIAM, Oscar Guarín y Sandra Gómez, propusieron un tratamiento con peróxido de hidrógeno como agente oxidante y cloruro férrico como agente floculante, donde primero se realizaban la etapa de floculación seguida de la etapa de oxidación. Los porcentajes de remoción conseguidos son similares con los del tratamiento propuesto usando permanganato de potasio como agente oxidante y sulfato de aluminio como agente floculante, en este tratamiento propuesto primero se realiza el proceso de oxidación y luego el tratamiento de coagulación.

En la tabla 16 se muestra las ventajas y desventajas de los métodos propuestos.

En la tabla 17 podemos apreciar que el tratamiento propuesto a escala de laboratorio posee remociones similares a las reportadas a escala industrial por algunos países. Sin embargo los reactivos y métodos utilizados en el tratamiento fisicoquímico propuestos en este trabajo son de menor costo.

Tabla 16. Ventajas y desventajas de los métodos propuestos.

Coagulante-oxidante	Ventajas	Desventajas
FeCl ₃	Reduce parte del color del lixiviado, forma floculos pequeños que precipitan rápido. Proporciona rendimientos depuradores altos sin necesidad de utilizar ningún tipo de coadydante. Costos de operación altos.	Producción de lodos no estabilizados y muy corrosivos
Al ₂ (SO ₄) ₃	Formación de flóculos de mayor tamaño, y buenos rendimientos en porcentaje de remoción. Costos de operación bajos	Producción de lodos no estabilizados
Peroxido de Hidrógeno	Se consigue rendimientos superiores del 90% de remoción en DQO	necesita concentración elevada y cuidado con su manipulación. Costos de operación altos
Permanganato de potasio	Se consigue rendimientos superiores del 90% de remoción de DQO. Tiempo de reacción inmediato	Una vez preparada la solución debe ser utilizada. Manipulación cuidadosa. Costos de operación altos

Tabla 17. Comparación del tratamiento fisicoquímico realizado con otros

PAIS	TRATAMIENTO FISICOQUIMICO REALIZADO	REACTIVOS UTILIZADOS	REMOCIÓN		
			DQO	Color	Turbidez
Argentina (Buenos Aires)	Neutralización	Ca(OH) ₂	70-80	80-90	70-80
	Precipitación	----			
	Floculación	Al ₂ (SO ₄) ₃			
	Sedimentación	---			
	Oxidación/Reducción	Luz U.V.			
	Adsorción	Carbón activado			
	Cloración	HClO			
Chile (Santiago de Chile)	Neutralización	NaOH	60-70	80-90	60-70
	Floculación	Al ₂ (SO ₄) ₃			
	Oxidación/Reducción	Ozono			
Tratamiento propuesto por autores	Acidificación	H ₂ SO ₄	60-70	90-95	70-90
	Coagulación/floculación	Al ₂ (SO ₄) ₃			
	Oxidación	KmnO ₄			
	Neutralización	Ca(OH) ₂			

CONCLUSIONES

1. Los lixiviados producidos en el Relleno Sanitario “El Carrasco” son difíciles de tratar debido a características tales como: composición físico-química y microbiológica, contenido de materia orgánica, caudal, condiciones medioambientales del entorno, tipo de residuo sólido depositado, etc; por lo tanto es necesario la implementación de un tratamiento fisicoquímico seguido de un tratamiento biológico con el fin de obtener mejores resultados
2. El método fisicoquímico propuesto consiste en la acidificación con ácido sulfúrico, la oxidación con permanganato de potasio, la coagulación con sulfato de aluminio y la neutralización con hidróxido de calcio
3. El rango de trabajo para el permanganato de potasio es de 850 a 1250 mg/l con un pH de 5.0 a 6.0 donde se consigue buenos porcentajes de remoción de materia orgánica en la fase de oxidación. En esta etapa se obtiene un lodo no muy espeso.
4. En la etapa de floculación-coagulación la concentración de trabajo es de 850-1500 mg/l con un pH de 5.0 a 6.0 donde se obtiene buenas remociones de color, turbidez, y sólidos que es el objetivo en este proceso. En esta etapa se obtiene un lodo de mejor consistencia y que demoran aproximadamente 30 minutos en la sedimentación

5. Los mecanismos que predominan en la etapa de coagulación-floculación usando sulfato de aluminio son de adsorción-neutralización y barrido, los cuales están en función de la dosis, pH de coagulación y características del lixiviado como turbiedad inicial, alcalinidad, color, etc.
6. Se consiguió una buena remoción de los metales analizados, la mayor remoción corresponde al cromo 66.66%, le sigue el potasio con 44.5%, Sodio 43.98%, Níquel 41.66%, Magnesio 16.11%, y Hierro 0.94%; no se obtuvo remoción con el cobre, y no se pudo detectar la concentración del plomo por la sensibilidad del equipo, éstos cumple con la norma de vertimientos.
7. Dependiendo del pH; la dosis aplicada de permanganato de potasio y sulfato de aluminio y las condiciones del lixiviado el tratamiento propuesto remueve entre 15 a 32% de Grasas y aceites, 20 a 45% de la Demanda Biológica de Oxígeno-DBO₅, 40 a 66% de la Alcalinidad total, 60 a 86% de fosfatos, 70 a 89% de la Demanda Química de Oxígeno-DQO, 70 a 89% de Turbidez, 80 a 94% de Color, y 60 a 90% de Dureza.
8. La remoción de los sólidos suspendidos totales volátiles fue del 26.02%, sólidos totales 46.15%, sólidos suspendidos totales 46.54%, sólidos totales volátiles 48.3%, sólidos disueltos 49.26%. Los sólidos suspendidos y la materia coloidal que son eliminados en el tratamiento, generan lodos, que requieren un tratamiento y disposición final adecuados.
9. La producción de lodo es una variable de diseño clave de las etapas de espesamiento, deshidratación y disposición final.

10. Se logró aproximar el proceso de oxidación y coagulación del lixiviado generado en “El Carrasco” a un modelo teórico mediante análisis estadístico de regresión múltiple simple de los diferentes parámetros analizados, estos resultados son puntuales del experimento debido a la complejidad del lixiviado y de los factores no controlables en el proceso (variabilidad en el tiempo)

RECOMENDACIONES

1. Realizar pruebas a escala de planta piloto para comprobar la eficiencia del tratamiento, ya que se trabajo con 1 litro de lixiviado.
2. Evaluar y tratar adecuadamente los lodos producidos en el tratamiento fisicoquímico propuesto.
3. La espuma generada en la etapa de acidificación es un problema inherente al sistema debido a la naturaleza del lixiviado, debido a esto se debe hacer una agitación suave, y hacer control de los gases producidos por que son muy tóxicos y peligrosos.
4. Se debe acompañar este tratamiento fisicoquímico con un tratamiento biológico para una mejor remoción de la materia orgánica biodegradable presente en el lixiviado.
5. Debido a la complejidad del lixiviado se debe hacer un estudio factorial para obtener mayor cantidad de datos con significancia en las variables a determinar.

BIBLIOGRAFÍA

1. ADIN, A.; SOFFER, Y.; BEN AIM, R. Effluent pretreatment by iron coagulation applying various dose- pH combinations for optimum particle separation. Water Science and technology. Jerusalem. Vol 38, No 6; (1998); p 27-34.
2. AMIRTHARAJAH, A.; DENNETT, K.E.; STUDSTILL, A. Ferric chloride coagulation for removal of dissolved organic matter and trihalometane precursor. Water Science and Technology. Usa. Vol 27, No 11; (1993); p. 113-121.
3. ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Teoría y practica de la purificación del agua ACODAL. Colombia, Mc Graw Hill, 1.992. capt 1-10
4. BARBER, C. Behavior of wastes in landfills, review of processes of decomposition of solid wastes with particle references to microbiological changes and gas production. Water Research Center, 1979.
5. BRIAN, E,R; MATSUMOTO, M.R. Physicochemical Processes. Water Environment Research. Usa. Vol 70; (1998); p. 449-460
6. CEIAM. Evaluación, gestión y seguimiento al sistema de tratamiento de lixiviados generados en el relleno sanitario "El Carrasco", 2001
7. CHACIN LUGO, Franklin. Análisis de regression y superficie de respuesta- Universidad Central de Venezuela. Venezuela, UCV Agronomía. 1.998. capt. 1-7.

8. CANOURA, José María. El Relleno Sanitario. Revista Noticias CEAMSE. No. 12 Octubre-Noviembre. Buenos Aires. Argentina. Pp.4-12. 1997.
9. CHIAN, E.S.K Y De WALLE, F. Criteria of selection of methods for leachate treatment. EN: 7th International conference. On water pollution research. Paris. (1975); p. 776-781
10. CLESARI S. LENORE, GREENBERG E. ARNOLD, EATON D. ANDREW. Standard Methods for Examination of water y wastewater. 20th edition. Apha awwa wef, pp 3-85, 3-75, 3-79, 3-85, 1998.
11. COGAN MEZA, Ana y RODRIGEZ SAAVEDRA, Isabe. Diagnostico, análisis y planteamiento de alternativas ambientales para minimizar la contaminación originada por los residuos tóxicos y peligrosos del vertedero municipal "El Carrasco". Bucaramanga, 2000, Trabajo de grado (Ingeniería Química). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas.
12. EPA. Analysis of Selected Enhancements for Soil Vapor Extraction, EPA OSWER, EPA/542/r-97/007.1997.
13. E. S. K. Chian and F. B. De Walle. Criteria of selection of methods for leachate treatment. Biological Impact of sanitary landfill. University of Illinois. pp. 776-785. 2000.
14. FERHAN Cecen and ÖZGÜR Aktas. Effect of PAC addition in combined treatment of landfill leachate and domestic wastewater in semicontinuously fed batch and continuous-flow reactors Bogazici University, Institute of Environmental Sciences, 80815, Bebek, Istanbul, Turkey. Water S.A. Vol. 27. No.2. April pp. 177-183. 2001.

15. FUNGAROLI, A.A., and STEINER, R.R. Investigation of sanitary landfill behavior, Vol. 1. EPA-600/2/79-053a, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH. 1979.
16. GALLO, Roberto. El desafío es Salvaguardar el Planeta. Revista Noticias CEAMSE. No 11 Febrero-Marzo. Buenos Aires. Argentina. Pp. 26-29. 1997.
17. GARCIA, Rosa. Análisis químicos y bacteriológicos en el control de aguas. UIS. 1983.
18. GUALDRON. Nelson. Tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario. UIS. 1995.
19. GUARIN V., Oscar Darío; GOMEZ P., Sandra Milena. Caracterización e implementación de un método fisicoquímico para el tratamiento del lixiviado proveniente del relleno sanitario "El Carrasco". Trabajo de grado. Escuela de Química. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, pp. 6-7, 12-15, 49-55, 2002.
20. HILLEBOE M., Herman. Manual de tratamiento de aguas negras. Editorial Limusa-Wiley S.A. México, D.F. pp. 67-69. 1964.
21. _____ Ministerio de Salud. Leyes, decretos, etc. (1997). Resolución Número 02309 del 24 de febrero de 1986.
22. RAMOS, Jhon. Estudio de un sistema de tratamiento fisicoquímico a escala piloto para la remoción de carga orgánica del lixiviado proveniente del sitio de disposición final de residuos sólidos "El Carrasco". Tesis de grado. Bucaramanga, 2003.

23. RAMIREZ MONJE Ignacio. Y Otros. Tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios en México. Casos de estudio. Instituto de ingeniería, Coordinación de ingeniería ambiental. UNAM. 2000.
24. ROMERO R. Jairo Alberto. Acuíquímica. Editorial Presencia, Presencia, Primera Edición. Febrero de 1996. Escuela de Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander.
25. TCHOBANOGLOUS, G. Ingeniería Sanitaria, Tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales. Barcelona. Metcalf y Eddy Inc, Editorial Labor, 1.979. capt. 1-8
26. VERGARA B ., Deyby Maria. Estudio y evaluación del aporte contaminante en carga orgánica y metales del lixiviado proveniente del relleno sanitario “El Carrasco” a la quebrada la iglesia. Escuela de Química. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, pp. 18-30. 2002.
27. VILLEGAS P. Francisco Evaluación y control de la contaminación . Editorial Universidad Nacional, pp. 47-71, 1995.
28. WINKLER, Michael. Tratamiento Biológico de aguas residuales de vertederos. pp. 33-80. 1993.

URLS Disponibles en Internet:

URL 1:<http://www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/test/under.htm>.

URL 2:<http://www.awwa.com>

URL 2:<http://www.dnecolombia.gov.co/doc/publicaciones/estrategica.pdf>

URL 3:<http://www.ObservatoriosAmbientalesUrbanos.htm>

URL 4:<http://www.Periódico15.htm>

URL 5:[http://www.Articulo-Estruc.plan.On Line.htm](http://www.Articulo-Estruc.plan.OnLine.htm)

URL 6:<http://www.foe.org/ptp/chater2.html>

ANEXOS
ANEXOS

Anexo 2. Resultados de oxidación del lixiviado proveniente del relleno sanitario el “Carrasco”

pH inicial	pH final	KMnO ₄ mg/l	Color inicial	Color final	% remoción	Turbidez inicial	Turbidez final	% remoción	Sólidos inicial	Sólidos final	% remoción	DQO inicial	DQO final	% remoción
5	4,78	650	7623	5641	26	326	277	15	11000	8030	27	19823	4956	75
5	4,85	850	9825	7074	28	825	668	19	905	615	32	10825	2598	76
5	4	1000	10326	7228	30	760	608	20	820	582	29	15326	2759	82
5	4,86	1250	8528	5799	32	520	437	16	950	637	33	17850	3035	83
6	5,8	650	9586	6710	30	856	685	20	985	690	30	10598	2332	78
6	5,5	850	10326	6712	35	726	574	21	856	574	33	15369	1383	91
6	5,89	1000	7589	5085	33	369	299	19	11879	7721	35	19536	2344	88
6	5,7	1250	8597	5932	31	510	423	17	953	658	31	17459	4016	77
6,5	6,5	650	9985	6990	30	741	600	19	812	577	29	15236	3047	80
6,5	6,2	850	7859	5344	32	326	261	20	11236	7528	33	19587	3330	83
6,5	6,3	1000	9256	6109	34	874	725	17	958	690	28	10258	1846	82
6,5	6,4	1250	8025	5377	33	514	421	18	931	633	32	17531	2454	86
7	6,8	650	10358	7251	30	789	655	17	823	576	30	15896	2384	85
7	6,9	850	8321	5908	29	569	461	19	956	679	29	17258	4315	75
7	6,6	1000	7258	4935	32	359	302	16	11589	8344	28	19245	2309	88
7	6,7	1250	9510	6942	27	852	741	13	913	630	31	10369	2903	72

Anexo 3. Resultados de la coagulación del lixiviado proveniente del relleno sanitario el “Carrasco”

pH inicial	PH final	(Al ₂ SO ₄) mg/l	Color inicial	Color final	% remoción	Turbidez inicial	Turbidez final	% remoción	Sólidos inicial	Sólidos final	% Sólidos	DQO inicial	DQO final	% remoción
5	4,8	850	9863	1282	87	852	94	89	958	144	85	10589	2435	77
5	4,5	1000	8569	857	90	941	85	91	963	125	87	19857	4369	78
5	4,7	1250	5698	855	85	859	60	93	851	94	89	18652	2798	85
5	4,8	1500	7698	1309	83	756	76	90	753	90	88	10589	1377	87
5	4,5	1750	8591	1375	84	589	77	87	951	124	87	19784	3957	80
5,5	5,4	800	7896	1026	87	958	192	80	987	148	85	19875	3776	81
5,5	5,3	1000	9847	1674	83	758	136	82	943	94	90	10529	1158	89
5,5	5,3	1250	9631	1059	89	653	85	87	862	112	87	17583	1407	92
5,5	5,2	1500	9874	1481	85	689	76	89	843	101	88	17583	2989	83
5,5	5,3	1750	8526	1364	84	741	111	85	913	128	86	17212	2582	85
6	5,9	850	9657	869	91	954	134	86	654	118	82	17856	2678	85
6	5,6	1000	6897	483	93	853	85	90	632	107	83	15897	2702	83
6	5,7	1250	8521	511	94	987	109	89	687	82	88	18953	2085	89
6	5,6	1500	8621	690	92	456	59	87	954	143	85	19875	3776	81
6	5,8	1750	8413	925	89	856	128	85	852	111	87	14589	1897	87

Anexo 4. Regresión múltiple A. Color final

Multiple Regression - A.Color final

Dependent variable: A.Color final

Independent variables:

A.Color inicial

A.pH

Sulfato de aluminio

Sulfato de aluminio*A.pH

		<i>Standard</i>	<i>T</i>	
<i>Parameter</i>	<i>Estimate</i>	<i>Error</i>	<i>Statistic</i>	<i>P-Value</i>
CONSTANT	-502,185	3546,86	-0,141586	0,8902
A.Color inicial	0,177474	0,0566958	3,13029	0,0107
A.pH	-59,9945	627,269	-0,095644	0,9257
Sulfato de aluminio	2,19164	2,65155	0,826548	0,4278
Sulfato de aluminio*A.pH	-0,346249	0,480317	-0,720876	0,4875

Analysis of Variance

<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
Model	1,16249E6	4	290623,	4,81	0,0200
Residual	603666,	10	60366,6		
Total (Corr.)	1,76616E6	14			

R-squared = **65,8204** percent

R-squared (adjusted for d.f.) = **52,1485** percent

Standard Error of Est. = **245,696**

Mean absolute error = **162,73**

Durbin-Watson statistic = 2,02157 (P=**0,2128**)

Lag 1 residual autocorrelation = -0,0209503

The StatAdvisor

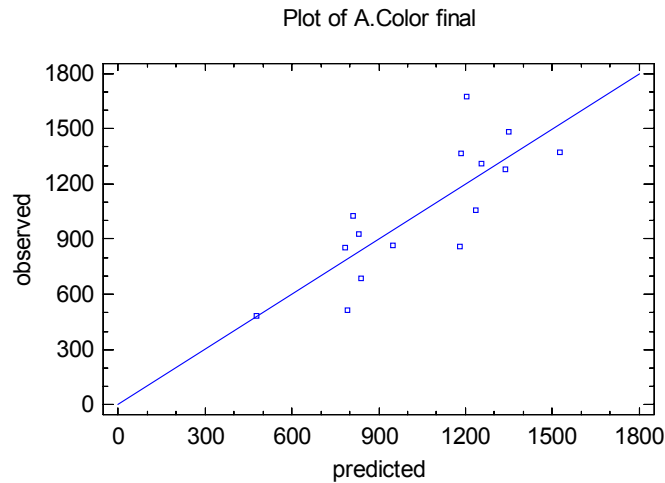
The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between A.Color final and 4 independent variables. The equation of the fitted model is

$$\text{A.Color final} = -502,185 + 0,177474 \cdot \text{A.Color inicial} - 59,9945 \cdot \text{A.pH} + 2,19164 \cdot \text{Sulfato de aluminio} - 0,346249 \cdot \text{Sulfato de aluminio} \cdot \text{A.pH}$$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0,05, there is a statistically significant relationship between the variables at the 95,0% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 65,8204% of the variability in A.Color final. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 52,1485%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 245,696. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 162,73 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the P-value is greater than 0,05, there is no indication of serial autocorrelation in the residuals at the 95,0% confidence level.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the independent variables is 0,9257, belonging to A.pH. Since the P-value is greater or equal to 0,05, that term is not statistically significant at the 95,0% or higher confidence level. Consequently, you should consider removing A.pH from the model.



Anexo 5. Regresión múltiple A. Turbidez final

Multiple Regression - A.Turbidez final

Dependent variable: A.Turbidez final

Independent variables:

A.Turbidez inicial

A.pH

Sulfato de aluminio

Sulfato de aluminio*A.pH

		<i>Standard</i>	<i>T</i>	
<i>Parameter</i>	<i>Estimate</i>	<i>Error</i>	<i>Statistic</i>	<i>P-Value</i>
CONSTANT	-100,77	479,874	-0,209993	0,8379
A.Turbidez inicial	0,105439	0,0728702	1,44694	0,1785
A.pH	24,2435	84,886	0,285601	0,7810
Sulfato de aluminio	-0,00528377	0,359509	-0,0146972	0,9886
Sulfato de aluminio*A.pH	-0,00130874	0,0648286	-0,0201878	0,9843

Analysis of Variance

<i>Source</i>	<i>Sum Squares</i>	<i>of Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
Model	6413,12	4	1603,28	1,44	0,2907
Residual	11130,2	10	1113,02		
Total (Corr.)	17543,3	14			

R-squared = **36,5559** percent

R-squared (adjusted for d.f.) = **11,1783** percent

Standard Error of Est. = **33,3619**

Mean absolute error = **21,1351**

Durbin-Watson statistic = 1,01075 (P=**0,0028**)

Lag 1 residual autocorrelation = 0,48058

The StatAdvisor

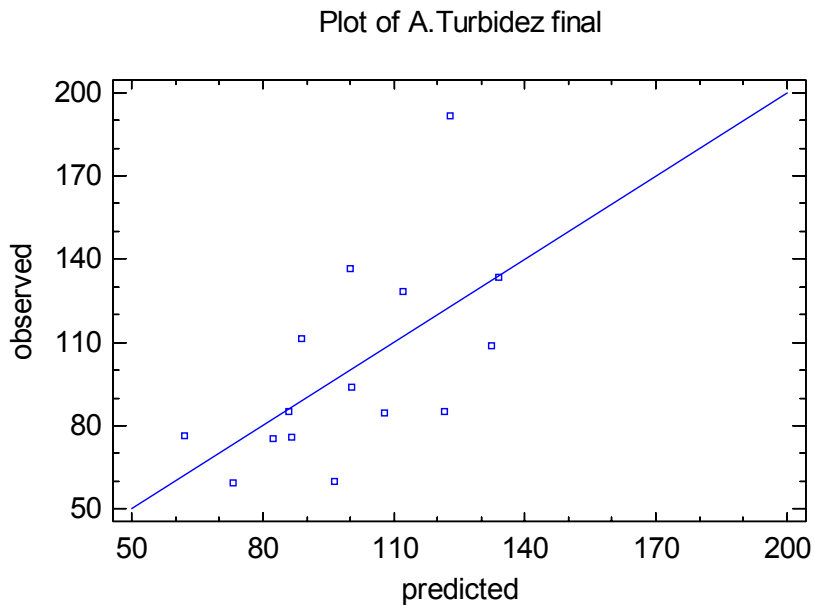
The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between A.Turbidez final and 4 independent variables. The equation of the fitted model is

A.Turbidez final = -100,77 + 0,105439*A.Turbidez inicial + 24,2435*A.pH - 0,00528377*Sulfato de aluminio - 0,00130874*Sulfato de aluminio*A.pH

Since the P-value in the ANOVA table is greater or equal to 0,05, there is not a statistically significant relationship between the variables at the 95,0% or higher confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 36,5559% of the variability in A.Turbidez final. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 11,1783%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 33,3619. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 21,1351 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the P-value is less than 0,05, there is an indication of possible serial correlation at the 95,0% confidence level. Plot the residuals versus row order to see if there is any pattern that can be seen.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the independent variables is 0,9886, belonging to Sulfato de aluminio. Since the P-value is greater or equal to 0,05, that term is not statistically significant at the 95,0% or higher confidence level. Consequently, you should consider removing Sulfato de aluminio from the model.



Anexo 6. Regresión múltiple A. Sólidos finales

Multiple Regression - A.Sólidos finales

Dependent variable: A.Sólidos finales

Independent variables:

A.Sólidos iniciales

A.pH

Sulfato de aluminio

Sulfato de aluminio*A.pH

		<i>Standard</i>	<i>T</i>	
<i>Parameter</i>	<i>Estimate</i>	<i>Error</i>	<i>Statistic</i>	<i>P-Value</i>
CONSTANT	-236,327	338,925	-0,697286	0,5015
A.Sólidos iniciales	0,150133	0,0537091	2,79529	0,0189
A.pH	44,1443	56,298	0,784119	0,4511
Sulfato de aluminio	0,0979264	0,218994	0,447165	0,6643
Sulfato de aluminio*A.pH	-0,0206471	0,0399592	-0,516705	0,6166

Analysis of Variance

<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
Model	2926,42	4	731,605	2,47	0,1118
Residual	2956,98	10	295,698		
Total (Corr.)	5883,4	14			

R-squared = **49,7403** percent

R-squared (adjusted for d.f.) = **29,6364** percent

Standard Error of Est. = **17,1959**

Mean absolute error = **10,6374**

Durbin-Watson statistic = 1,97908 (P=**0,1811**)

Lag 1 residual autocorrelation = -0,0571322

The StatAdvisor

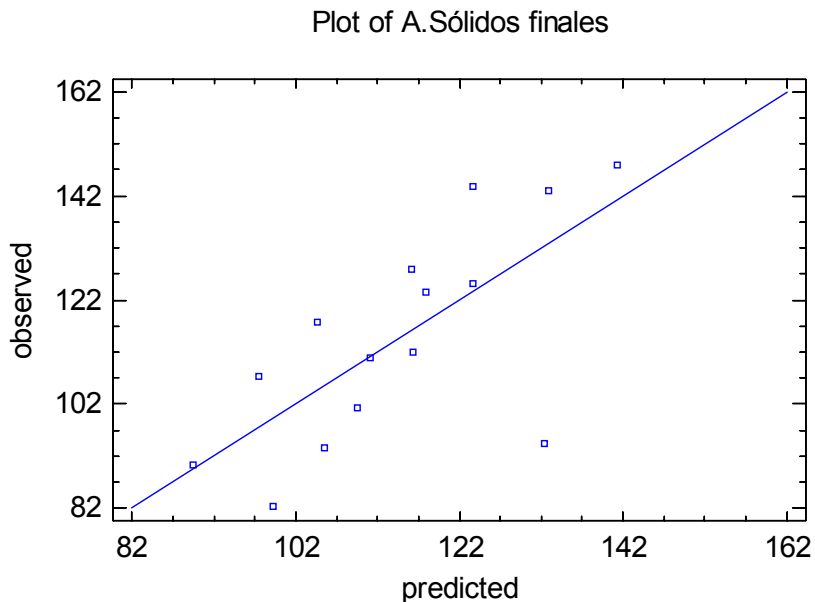
The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between A.Sólidos finales and 4 independent variables. The equation of the fitted model is

A.Sólidos finales = -236,327 + 0,150133*A.Sólidos iniciales + 44,1443*A.pH + 0,0979264*Sulfato de aluminio - 0,0206471*Sulfato de aluminio*A.pH

Since the P-value in the ANOVA table is greater or equal to 0,05, there is not a statistically significant relationship between the variables at the 95,0% or higher confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 49,7403% of the variability in A.Sólidos finales. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 29,6364%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 17,1959. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 10,6374 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the P-value is greater than 0,05, there is no indication of serial autocorrelation in the residuals at the 95,0% confidence level.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the independent variables is 0,6643, belonging to Sulfato de aluminio. Since the P-value is greater or equal to 0,05, that term is not statistically significant at the 95,0% or higher confidence level. Consequently, you should consider removing Sulfato de aluminio from the model.



Anexo 7. Regresión múltiple A. DQO final

Multiple Regression - A.DQO final

Variable dependiente: A.DQO final

Variables independientes:

- A.DQO inicial
- A.Color inicial
- A.Sólidos iniciales
- A.Turbidez inicial
- A.pH
- Sulfato de aluminio
- A.pH*Sulfato de aluminio
- A.DQO inicial*Sulfato de aluminio
- Sulfato de aluminio²
- A.Color inicial*Sulfato de aluminio
- A.Turbidez inicial*Sulfato de aluminio
- A.Sólidos iniciales*Sulfato de aluminio

		<i>Standard</i>	<i>T</i>	
<i>Parameter</i>	<i>Estimate</i>	<i>Error</i>	<i>Statistic</i>	<i>P-Value</i>
CONSTANT	34000,3	10691,2	3,18021	0,0863
A.DQO inicial	-0,032657	0,0988518	-0,330363	0,7725
A.Color inicial	-2,57736	0,484578	-5,31877	0,0336
A.Sólidos iniciales	-24,1901	6,08864	-3,97299	0,0579
A.Turbidez inicial	47,2569	7,30279	6,47108	0,0231
A.Ph	-6631,17	1170,3	-5,66619	0,0298
Sulfato de aluminio	-20,6767	8,12088	-2,54612	0,1258
A.pH*Sulfato de aluminio	4,71948	0,815591	5,78657	0,0286
A.DQO inicial*Sulfato de aluminio	-0,00007114358	0,0000822068	-0,865421	0,4780
Sulfato de aluminio ²	-0,00587559	0,00225177	-2,60932	0,1208
A.Color inicial*Sulfato de aluminio	0,00209077	0,000412219	5,07198	0,0367
A.Turbidez inicial*Sulfato de aluminio	-0,0327866	0,00472735	-6,93552	0,0202
A.Sólidos iniciales*Sulfato de aluminio	0,0232316	0,00615042	3,77724	0,0635

Analysis of Variance

<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
Model	1,35666E7	12	1,13055E6	22,85	0,0427
Residual	98945,5	2	49472,8		
Total (Corr.)	1,36655E7	14			

R-squared = 99,2759 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 94,9316 percent
Standard Error of Est. = 222,425
Mean absolute error = 51,9815
Durbin-Watson statistic = 2,25116 (P=0,3380)
Lag 1 residual autocorrelation = -0,222646

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between A.DQO final and 12 independent variables. The equation of the fitted model is

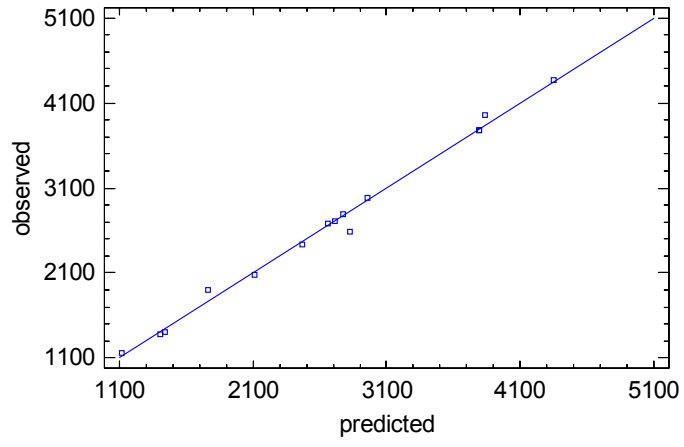
$$\begin{aligned} \text{A.DQO final} = & 34000,3 - 0,032657 \cdot \text{A.DQO inicial} - 2,57736 \cdot \text{A.Color inicial} - \\ & 24,1901 \cdot \text{A.Sólidos iniciales} + 47,2569 \cdot \text{A.Turbidez inicial} - 6631,17 \cdot \text{A.pH} - \\ & 20,6767 \cdot \text{Sulfato de aluminio} + 4,71948 \cdot \text{A.pH} \cdot \text{Sulfato de aluminio} - \\ & 0,0000711435 \cdot \text{A.DQO inicial} \cdot \text{Sulfato de aluminio} - 0,00587559 \cdot \text{Sulfato de} \\ & \text{aluminio}^2 + 0,00209077 \cdot \text{A.Color inicial} \cdot \text{Sulfato de aluminio} - \\ & 0,0327866 \cdot \text{A.Turbidez inicial} \cdot \text{Sulfato de aluminio} + 0,0232316 \cdot \text{A.Sólidos} \\ & \text{iniciales} \cdot \text{Sulfato de aluminio} \end{aligned}$$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0,05, there is a statistically significant relationship between the variables at the 95,0% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 99,2759% of the variability in A.DQO final. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 94,9316%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 222,425. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 51,9815 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the P-value is greater than 0,05, there is no indication of serial autocorrelation in the residuals at the 95,0% confidence level.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the independent variables is 0,7725, belonging to A.DQO inicial. Since the P-value is greater or equal to 0,05, that term is not statistically significant at the 95,0% or higher confidence level. Consequently, you should consider removing A.DQO inicial from the model.

Plot of A.DQO final



Anexo 8. Regresión múltiple B. Color final

Multiple Regression - B.Color final

Dependent variable: B.Color final

Independent variables:

B.Color inicial

B.pH

Permanganato de potasio

Permanganato de potasio*B.pH

		Standard	T	
Parameter	Estimate	Error	Statistic	P-Value
CONSTANT	3234,43	2128,17	1,51982	0,1568
B.Color inicial	0,709923	0,0594696	11,9376	0,0000
B.pH	-522,078	353,251	-1,47793	0,1675
Permanganato de potasio	-3,35323	2,26034	-1,48351	0,1660
Permanganato de potasio*B.pH	0,514271	0,369435	1,39205	0,1914

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	8,92117E6	4	2,23029E6	41,53	0,0000
Residual	590784,	11	53707,6		
Total (Corr.)	9,51195E6	15			

R-squared = **93,789** percent

R-squared (adjusted for d.f.) = **91,5305** percent

Standard Error of Est. = **231,749**

Mean absolute error = **150,675**

Durbin-Watson statistic = 1,32381 (P=**0,0445**)

Lag 1 residual autocorrelation = 0,249645

The StatAdvisor

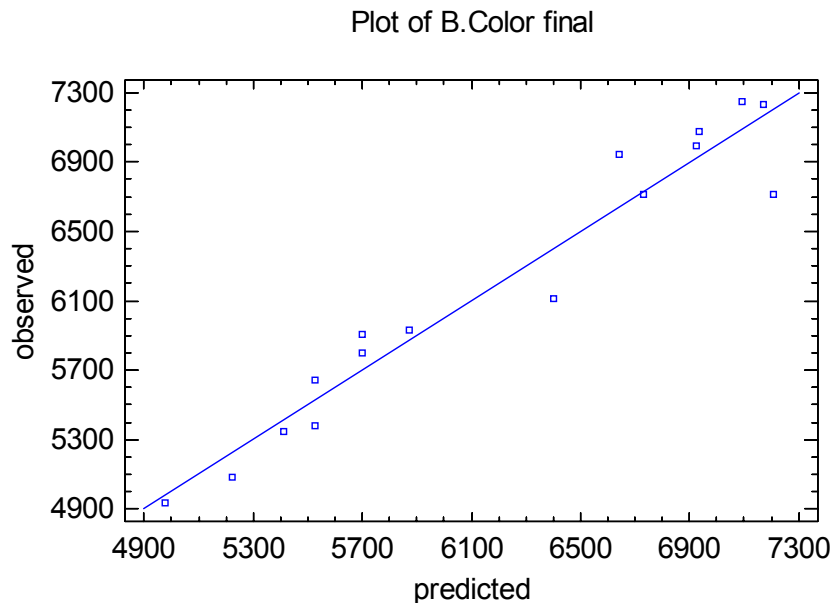
The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between B.Color final and 4 independent variables. The equation of the fitted model is

$$\text{B.Color final} = 3234,43 + 0,709923 \cdot \text{B.Color inicial} - 522,078 \cdot \text{B.pH} - 3,35323 \cdot \text{Permanganato de potasio} + 0,514271 \cdot \text{Permanganato de potasio} \cdot \text{B.pH}$$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0,05, there is a statistically significant relationship between the variables at the 95,0% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 93,789% of the variability in B.Color final. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 91,5305%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 231,749. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 150,675 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the P-value is less than 0,05, there is an indication of possible serial correlation at the 95,0% confidence level. Plot the residuals versus row order to see if there is any pattern that can be seen.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the independent variables is 0,1914, belonging to Permanganato de potasio*B.pH. Since the P-value is greater or equal to 0,05, that term is not statistically significant at the 95,0% or higher confidence level. Consequently, you should consider removing Permanganato de potasio*B.pH from the model.



Anexo 9. Regresión múltiple B. Turbidez final

Multiple Regression - B.Turbidez final

Dependent variable: B.Turbidez final

Independent variables:

B.Turbidez inicial

B.pH

Permanganato de potasio

Permanganato de potasio*B.pH

		<i>Standard</i>	<i>T</i>	
<i>Parameter</i>	<i>Estimate</i>	<i>Error</i>	<i>Statistic</i>	<i>P-Value</i>
CONSTANT	88,9243	145,217	0,612353	0,5528
B.Turbidez inicial	0,836053	0,0202186	41,3507	0,0000
B.pH	-20,939	23,5964	-0,887379	0,3939
Permanganato de potasio	-0,105676	0,15095	-0,700072	0,4984
Permanganato de potasio*B.pH	0,0228748	0,0244912	0,933998	0,3704

Analysis of Variance

<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
Model	434751,	4	108688,	433,54	0,0000
Residual	2757,69	11	250,699		
Total (Corr.)	437509,	15			

R-squared = **99,3697** percent

R-squared (adjusted for d.f.) = **99,1405** percent

Standard Error of Est. = **15,8335**

Mean absolute error = **10,2874**

Durbin-Watson statistic = 1,98605 (P=**0,3493**)

Lag 1 residual autocorrelation = -0,0941467

The StatAdvisor

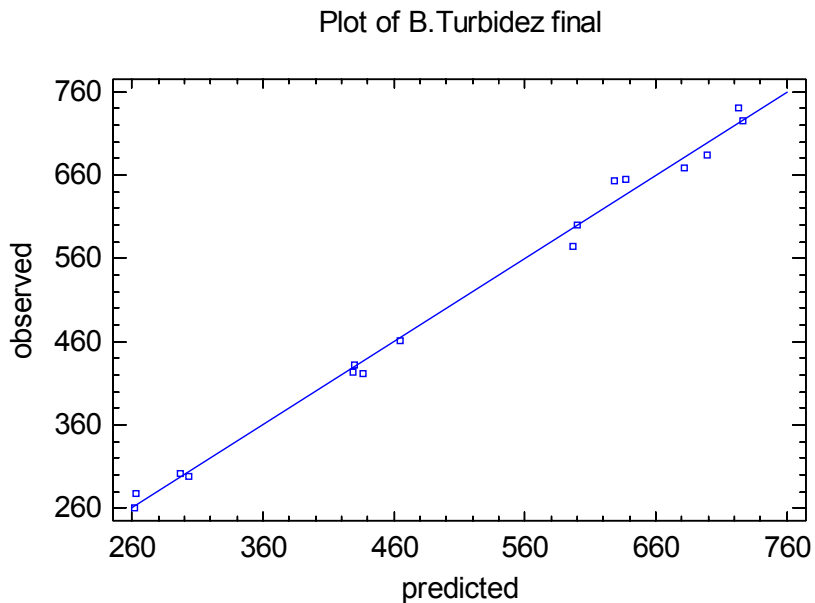
The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between B.Turbidez final and 4 independent variables. The equation of the fitted model is

$$\text{B.Turbidez final} = 88,9243 + 0,836053 \cdot \text{B.Turbidez inicial} - 20,939 \cdot \text{B.pH} - 0,105676 \cdot \text{Permanganato de potasio} + 0,0228748 \cdot \text{Permanganato de potasio} \cdot \text{B.pH}$$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0,05, there is a statistically significant relationship between the variables at the 95,0% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 99,3697% of the variability in B.Turbidez final. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 99,1405%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 15,8335. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 10,2874 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the P-value is greater than 0,05, there is no indication of serial autocorrelation in the residuals at the 95,0% confidence level.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the independent variables is 0,4984, belonging to Permanganato de potasio. Since the P-value is greater or equal to 0,05, that term is not statistically significant at the 95,0% or higher confidence level. Consequently, you should consider removing Permanganato de potasio from the model.



Anexo 10. Regresión múltiple B. Sólidos totales finales

Multiple Regression - B.Sólidos finales

Dependent variable: B.Sólidos finales

Independent variables:

B.Sólidos iniciales

B.pH

Permanganato de potasio

Permanganato de potasio*B.pH

		Standard	T	
Parameter	Estimate	Error	Statistic	P-Value
CONSTANT	2903,54	2040,56	1,42291	0,1825
B.Sólidos iniciales	0,684839	0,0122424	55,9401	0,0000
B.pH	-441,324	327,076	-1,3493	0,2044
Permanganato de potasio	-2,94809	2,11219	-1,39575	0,1903
Permanganato de potasio*B.pH	0,451028	0,340713	1,32378	0,2124

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	1,58809E8	4	3,97023E7	892,64	0,0000
Residual	489253,	11	44477,6		
Total (Corr.)	1,59298E8	15			

R-squared = 99,6929 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 99,5812 percent

Standard Error of Est. = 210,897

Mean absolute error = 120,921

Durbin-Watson statistic = 2,05449 (P=0,4119)

Lag 1 residual autocorrelation = -0,0963972

The StatAdvisor

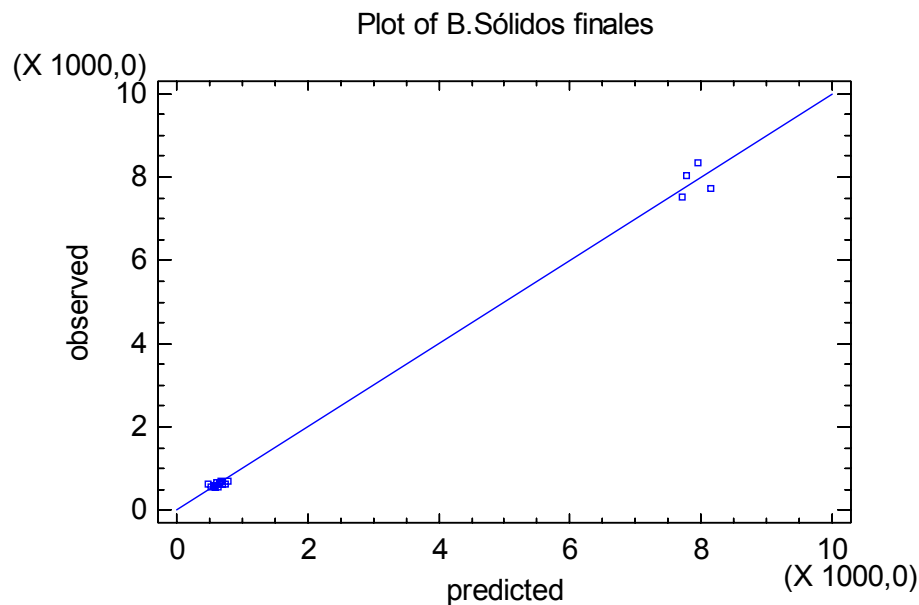
The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between B.Sólidos finales and 4 independent variables. The equation of the fitted model is

$$\text{B.Sólidos finales} = 2903,54 + 0,684839 \cdot \text{B.Sólidos iniciales} - 441,324 \cdot \text{B.pH} - 2,94809 \cdot \text{Permanganato de potasio} + 0,451028 \cdot \text{Permanganato de potasio} \cdot \text{B.pH}$$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0,05, there is a statistically significant relationship between the variables at the 95,0% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 99,6929% of the variability in B.Sólidos finales. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 99,5812%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 210,897. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 120,921 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the P-value is greater than 0,05, there is no indication of serial autocorrelation in the residuals at the 95,0% confidence level.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the independent variables is 0,2124, belonging to Permanganato de potasio*B.pH. Since the P-value is greater or equal to 0,05, that term is not statistically significant at the 95,0% or higher confidence level. Consequently, you should consider removing Permanganato de potasio*B.pH from the model.



Anexo 11. Regresión múltiple B. DQO final

Multiple Regression - B.DQO final

Dependent variable: B.DQO final

Independent variables:

- B.DQO inicial
- B.Color inicial
- B.Sólidos iniciales
- B.Turbidez inicial
- B.pH
- Permanganato de potasio
- Permanganato de potasio*B.pH
- Permanganato de potasio*B.DQO final
- Permanganato de potasio^2
- Permanganato de potasio*B.Color inicial

		<i>Standard</i>	<i>T</i>	
<i>Parameter</i>	<i>Estimate</i>	<i>Error</i>	<i>Statistic</i>	<i>P-Value</i>
CONSTANT	13208,8	3694,4	3,57535	0,0160
B.DQO inicial	0,115747	0,0640643	1,80673	0,1306
B.Color inicial	-1,05223	0,404052	-2,6042	0,0480
B.Sólidos iniciales	-0,0154476	0,0263353	-0,586576	0,5830
B.Turbidez inicial	2,52011	1,85217	1,36063	0,2318
B.pH	-451,133	385,633	-1,16985	0,2948
Permanganato de potasio	-14,923	4,30855	-3,46358	0,0180
Permanganato de potasio*B.pH	0,408383	0,384492	1,06214	0,3368
Permanganato de potasio*B.DQO final	0,000948893	0,0000971471	9,7676	0,0002
Permanganato de potasio^2	0,0011071	0,00123806	0,894224	0,4122
Permanganato de potasio*B.Color inicial	0,000790724	0,000413494	1,9123	0,1140

Analysis of Variance

<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
Model	1,25408E7	10	1,25408E6	55,65	0,0002
Residual	112667,	5	22533,4		
Total (Corr.)	1,26534E7	15			

R-squared = 99,1096 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 97,3288 percent

Standard Error of Est. = 150,111

Mean absolute error = 64,3281

Durbin-Watson statistic = 1,75905 (P=0,3392)

Lag 1 residual autocorrelation = 0,115301

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between B.DQO final and 10 independent variables. The equation of the fitted model is

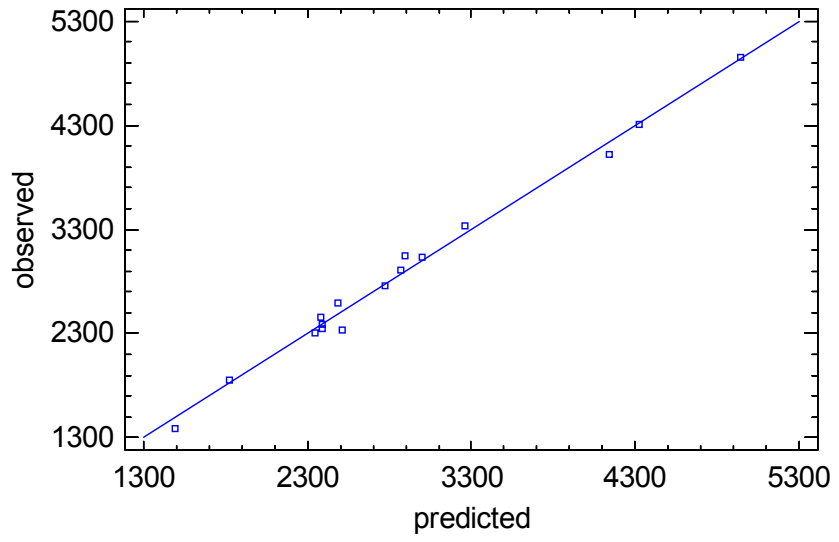
$$\begin{aligned} \text{B.DQO final} = & 13208,8 + 0,115747 * \text{B.DQO inicial} - 1,05223 * \text{B.Color inicial} - \\ & 0,0154476 * \text{B.Sólidos iniciales} + 2,52011 * \text{B.Turbidez inicial} - 451,133 * \text{B.pH} - \\ & 14,923 * \text{Permanganato de potasio} + 0,408383 * \text{Permanganato de potasio} * \text{B.pH} + \\ & 0,000948893 * \text{Permanganato de potasio} * \text{B.DQO final} + 0,0011071 * \text{Permanganato} \\ & \text{de potasio}^2 + 0,000790724 * \text{Permanganato de potasio} * \text{B.Color inicial} \end{aligned}$$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0,05, there is a statistically significant relationship between the variables at the 95,0% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 99,1096% of the variability in B.DQO final. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 97,3288%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 150,111. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 64,3281 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the P-value is greater than 0,05, there is no indication of serial autocorrelation in the residuals at the 95,0% confidence level.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the independent variables is 0,5830, belonging to B.Sólidos iniciales. Since the P-value is greater or equal to 0,05, that term is not statistically significant at the 95,0% or higher confidence level. Consequently, you should consider removing B.Sólidos iniciales from the model.

Plot of B.DQO final



Anexo 12. Digestión ácida para líquido (método 3010^a/SW-846 EPA)

