

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA



**METALES PESADOS Y CALIDAD AGRONÓMICA DEL AGUA
RESIDUAL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LA UAAAN**

POR:

JOSÉ PEDRO PÉREZ DÍAZ

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Salttillo, Coahuila, México.
Diciembre de 2011

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA

Metales pesados y calidad agronómica del agua residual de la planta
de tratamiento de la UAAAN

Por:

José Pedro Pérez Díaz

TESIS

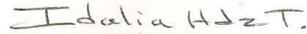
Que somete a consideración del H. jurado examinador como requisito
parcial para obtener el título de:

Ingeniero Agrícola y Ambiental

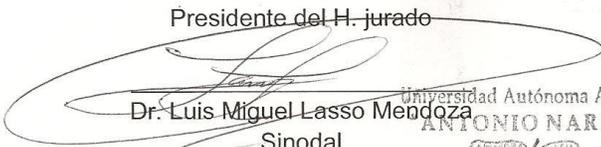
Aprobada por:



Dr. Edmundo Peña Cervantes
Presidente del H. jurado

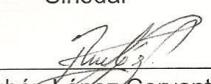


MC. Idalia María Hernández Torres
Sinodal


Dr. Luis Miguel Lasso Mendoza

Sinodal

Universidad Autónoma Agraria
ANTONIO NARRO


Dr. Rubén López Cervantes

Sinodal


MC. Luis Rodríguez Gutiérrez

Coordinador de la División de Ingeniería

Coordinación de
Ingeniería

AGRADECIMIENTO

La universidad nos forma para contribuir en el desarrollo nacional, es por eso que agradezco a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por impartir educación de calidad y cumplir con sus objetivos de docencia e investigación, sin los cuales no sería posible formar profesionistas con alto desempeño y compromiso.

Agradezco a todas aquellas personas que hicieron posible la realización del presente proyecto de investigación, en especial a:

Edmundo Peña Cervantes, Luis Miguel Lasso Mendoza, Idalia María Hernández Torres, Antonio Méndez Aguiñaga, Octavio Carranza Flores, Rubén López Cervantes, Antonio Ilizaliturri Verastegui, Emilio Rascón Alvarado.

No terminaría mencionar a todas las personas de las cuales he recibido apoyo incondicional, agradezco a todos mis familiares y amigos:

Mi madre y mis padrinos; Francisco Javier Díaz Martínez, Rebeca Montejo Gómez, Juan Antonio Pérez Díaz, Yesenia Araujo Montes, Alejandra Pérez Araujo, María Isabel Martínez Díaz, María Guadalupe Martínez Díaz, Ezequiel Sánchez Padierna, Armando Herrera Rodríguez, Sergio Rodrigo Cabrera Romero, Mariano Martínez Hernández, Rubén Ramírez Mosqueda, Karla Adriana Flores Ceja, José Roberto Regalado Arreola, Alejandra Escobar Sánchez, Juan Pablo Romero Cabrera, José Alberto López Nava, y a la familia Martínez Cano.

DEDICATORIA

EN MEMORIA DE MI ABUELA LA SEÑORA MARÍA DE LA LUZ MARTÍNEZ SALAZAR

El presente trabajo de investigación, está dedicado a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, a los profesionistas, estudiantes y demás involucrados en el aprovechamiento del agua residual de los efluentes de plantas de tratamiento, como una alternativa para reducir la explotación de los mantos acuíferos o bien para su reincorporación al ciclo hidrológico en mejores condiciones y de esta forma mitigar la contaminación de aguas superficiales.

INDICE DE CONTENIDO

| | PAGINA |
|---|--------|
| AGRADECIMIENTO | I |
| DEDICATORIA | II |
| ÍNDICE DE CONTENIDO | III |
| ÍNDICE DE CUADROS | V |
| RESUMEN | VI |
| | |
| I. INTRODUCCIÓN | 7 |
| | |
| II. OBJETIVOS | 8 |
| 2.1. GENERAL | 8 |
| 2.1.1. ESPECÍFICO | 8 |
| 2.2. HIPÓTESIS | 8 |
| | |
| III. REVISIÓN DE LITERATURA | 9 |
| 3.1. IMPORTANCIA DEL AGUA | 9 |
| 3.2. PROBLEMÁTICA DEL AGUA EN MÉXICO | 10 |
| 3.3. EL USO DEL AGUA EN LA AGRICULTURA EN MÉXICO | 10 |
| 3.4. LA EFICIENCIA DEL USO DEL AGUA Y SU CONSECUENCIA | 11 |
| 3.5. LA LEGISLACIÓN DEL AGUA EN MÉXICO | 12 |
| 3.6. NORMAS RELACIONADAS CON EL AGUA RESIDUAL | 13 |
| 3.7. DEFINICIÓN DE AGUAS RESIDUALES | 13 |
| 3.8. CONTAMINANTES DEL AGUA RESIDUAL | 13 |
| 3.8.1. CONTAMINANTES FÍSICOS | 14 |
| 3.8.2. CONTAMINANTES QUÍMICOS | 14 |
| 3.8.3. CONTAMINANTES BIOLÓGICOS | 16 |
| 3.9. TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL | 17 |
| 3.9.1. TRATAMIENTO FÍSICO | 17 |
| 3.9.2. TRATAMIENTO QUÍMICO | 19 |
| 3.9.3. TRATAMIENTO BIOLÓGICO | 22 |
| 3.10. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN (GENERALIDADES) | 24 |
| 3.11. USO DE PLANTAS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES | 25 |
| 3.12. CALIDAD DEL AGUA PARA RIEGO AGRÍCOLA | 26 |
| 3.12.1. PARÁMETROS DE CALIDAD | 26 |
| 3.12.2. CLASIFICACIÓN DEL AGUA | 31 |
| 3.13. TRATAMIENTO Y REUSO DE AGUA RESIDUAL EN MÉXICO | 31 |

| | |
|--|-----------|
| IV. MATERIALES Y MÉTODOS | 33 |
| 4.1. UBICACIÓN | 33 |
| 4.2. METODOLOGIA..... | 33 |
| 4.2.1. CALIDAD AGRONÓMICA DEL EFLUENTE | 34 |
| 4.2.2. EFICIENCIA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO..... | 34 |
| 4.2.3. ANALISIS ESTADISTICO | 35 |
| V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 36 |
| 5.1. DISTRIBUCIÓN DE CONTAMINANTES BÁSICOS EN LA PTAR | 36 |
| 5.2. DISTRIBUCIÓN DE METALES PESADOS EN LA PTAR | 40 |
| 5.3. DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD AGRONÓMICA DEL EFLUENTE DE LA PTAR..... | 42 |
| 5.4. DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA PTAR | 44 |
| 5.5. CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES BÁSICOS Y METALES PESADOS EN EL EFLUENTE DE LA PTAR | 46 |
| VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 49 |
| VII. LITERATURA CITADA..... | 51 |
| ANEXO. Análisis de varianza de los parámetros evaluados..... | 54 |

INDICE DE CUADROS

| | PAGINA |
|--|--------|
| Cuadro 1. Distribución del agua en el mundo..... | 9 |
| Cuadro 2. Uso del agua en la agricultura en México..... | 11 |
| Cuadro 3. Normas Oficiales Mexicanas | 13 |
| Cuadro 4. Lineamientos de calidad del agua para uso en riego agrícola..... | 26 |
| Cuadro 5. Clasificación del agua de riego según su conductividad eléctrica | 27 |
| Cuadro 6. Fórmulas para estimar la SE | 28 |
| Cuadro 7. Clasificación del agua según la SE | 28 |
| Cuadro 8. Clasificación del agua de acuerdo a los valores de RAS..... | 30 |
| Cuadro 9. Nomenclatura que describe la calidad del agua | 31 |
| Cuadro 10. Clasificación del agua residual tratada según su reúso..... | 32 |
| Cuadro 11. Parámetros a evaluar y métodos utilizados | 35 |
| Cuadro 12. Resultados del análisis estadístico de los contaminantes básicos en la PTAR..... | 38 |
| Cuadro 13. Resultados del análisis estadístico de los metales pesados en la PTAR. .. | 41 |
| Cuadro 14. Calidad agronómica del efluente de la PTAR | 43 |
| Cuadro 15. Eficiencia del tratamiento..... | 44 |
| Cuadro 16. Eficiencia por etapa de tratamiento | 45 |
| Cuadro 17. Concentración de contaminantes básicos y metales pesados en el efluente de la PTAR | 47 |

RESUMEN

El tratamiento de aguas residuales se realiza de tal manera que esta cumpla con los parámetros de calidad para su reincorporación al ciclo hidrológico mitigando la contaminación del vital líquido en fuentes superficiales, sin embargo, a la vez que las aguas residuales son tratadas, debe evaluarse su calidad y promover su reúso en diversas actividades para reducir la extracción de aguas subterráneas. Por lo tanto, con el objetivo de determinar la concentración de metales pesados en el agua residual que se genera en la UAAAN, así como la evaluación de la calidad del agua tratada para uso en riego agrícola y evaluar la eficiencia del tratamiento, se recolectaron 56 muestras en diferentes puntos de la planta de tratamiento de aguas residuales para realizar el análisis de los elementos Cadmio, Cobre, Cromo, Níquel, Plomo y Zinc. Los resultados muestran que no es significativa la concentración de metales pesados en el agua. Se evaluó la calidad del agua mediante indicadores agronómicos y estos revelan que el agua es de buena calidad en cuanto a RAS, pero con una alta concentración de sales, por lo que su uso es limitado a cultivos tolerantes a salinidad. Se realizó el análisis comparativo del efluente con la NOM-001-SEMARNAT-1996, los resultados indican que el agua residual tratada cumple con los parámetros establecidos para su descarga. La remoción de la DQO y SST determinan la eficiencia del tratamiento de agua residual, los resultados muestran que la eficiencia es baja debido a un flujo de agua residual que no recibe tratamiento en el tanque de sedimentación.

Palabras clave: agua residual, salinidad, sodicidad, metales pesados, irrigación.

I. INTRODUCCIÓN

El agua, elemento fundamental para la vida, es uno de los recursos naturales más preciados, pues a nivel mundial el caudal de agua dulce representa el 2.87 % y solo el 0.02 % del agua está disponible para consumo (Nalco Chemical Company, 1989). En este sentido, Rodríguez, *et al*, (2009) mencionan que el incremento de la población a nivel mundial (más de 6.5 mil millones de habitantes) y particularmente en México (más de 105 millones de habitantes), han demandado altas cantidades de agua potable para satisfacer las crecientes necesidades de la industria, la producción de alimentos y en general, las necesidades de la población y de sus patrones de consumo. Como consecuencia se han generado importantes volúmenes de aguas residuales representando un foco de infección y toxicidad a la salud humana y al medio ambiente (Jiménez, 2001). Atendiendo lo anterior, en México se han construido varias plantas de tratamiento de aguas residuales, sin duda, esto representa un paso importante en el control y prevención de la contaminación ambiental, considerando que por su parte el gobierno federal pretende alcanzar la cobertura de saneamiento de las aguas residuales a nivel nacional en un 60% para el 2012 (Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos, 2007).

Aunado a lo expuesto, debido a que el agua es uno de los factores limitantes para la producción en zonas áridas y semiáridas, se pretende incrementar la productividad del agua en el sector agropecuario mediante la reutilización del agua residual tratada (CONAGUA, 2007^a) ya que la eficiencia del uso del agua en la agricultura es baja, alcanzando en México solo el 46% (Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos, 2007). Por ello es necesario hacer un mejor aprovechamiento del agua en la agricultura.

Una de las alternativas para mitigar el uso irracional del agua es reutilizarla, previo tratamiento, evaluando sus características físicas y químicas para determinar posibles usos, el presente trabajo de investigación aporta información sobre la calidad del agua que se genera en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

II. OBJETIVOS

2.1. GENERAL

Determinar la concentración y distribución de metales pesados en el agua residual en sus diferentes etapas de tratamiento; así como su calidad agronómica en el efluente y la eficiencia de la planta de tratamiento (PTAR).

2.1.1. ESPECÍFICO

- a). Cuantificar la concentración de los metales pesados Cadmio, Cobre, Cromo, Níquel, Plomo y Zinc
- b). Determinar la distribución de estos mismos elementos en las diferentes etapas del tratamiento.
- c). Determinar la calidad agronómica del efluente.
- d). Evaluar la eficiencia de la PTAR.

2.2. HIPÓTESIS

Ho: La concentración de metales pesados disminuye a través de las etapas de tratamiento y el agua residual tratada cumple con los parámetros establecidos para uso en riego agrícola.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. IMPORTANCIA DEL AGUA

El agua es un elemento esencial para la vida en el planeta, debido a su limitada disponibilidad, este preciado líquido se ha convertido en un importante tema de preocupación internacional, ya que el caudal de agua dulce representa 2.87 % del volumen existente (cuadro 1).

Cuadro 1. Distribución del agua en el mundo.

| | |
|-------------------------------|---------|
| Océanos | 97.13 % |
| Casquetes polares y glaciares | 2.24 % |
| Agua subterránea | 0.61 % |
| Ríos, lagos | 0.02 % |

Fuente: Nalco Chemical Company, 1989.

La población está en constante crecimiento, en consecuencia, el consumo de agua aumenta, debido a esto, la cantidad de agua existente para todos los usos está comenzando a escasear acercándonos a una crisis mundial del agua. Por otro lado, la reducción del agua disponible debido a la contaminación, sumado a esto, el efecto del cambio climático sobre los recursos hidráulicos es incierto ya que probablemente la precipitación aumente en algunas regiones, mientras que en otras disminuya. Se prevé que para mediados del presente siglo, al menos dos mil millones de personas en 48 países sufrirán escasez de agua (INEGI, 2009).

En México, el crecimiento poblacional ha ejercido mayor presión sobre los recursos hídricos, al punto que el volumen de agua demandado por la sociedad, en general, es mayor que el volumen suministrado en algunas regiones; entre los factores de mayor incidencia en la disponibilidad del agua a nivel nacional, está el desequilibrio en la disponibilidad natural, el crecimiento de población y su concentración en las principales ciudades del país (CONAGUA, 2006).

3.2. PROBLEMÁTICA DEL AGUA EN MÉXICO

México enfrenta severos problemas en materia de disponibilidad de agua debido a una distribución irregular de este recurso en el territorio, esto nos pone en dos escenarios, uno donde hay poca gente y mucha agua, y otro donde hay escasez del agua y una mayor concentración de la población, este problema se complica debido al crecimiento demográfico, al uso irracional y a la falta de una cultura del cuidado del agua. Si se analiza la disponibilidad de agua por regiones, en el norte, centro y noreste del país, regiones áridas y semiáridas, se genera el 85 % del PIB y vive 77 % de la población total y esta cuenta con 32 % del recurso hidráulico. En contraste en el sur y sureste del país, se localiza 68 % del agua, se asienta 23 % de la población total y se genera solo 15 % del PIB (CONAGUA, 2005).

3.3. EL USO DEL AGUA EN LA AGRICULTURA EN MÉXICO

La superficie dedicada a la agricultura en México es aproximadamente de 21 millones de hectáreas (10.5 % del territorio nacional), de las cuales, 6.5 millones de hectáreas son de riego y 14.5 millones de hectáreas de temporal.

La productividad de las áreas de riego, es en promedio, 3.7 veces mayor que las de temporal, y a pesar de su menor superficie, la agricultura de riego genera más de la mitad de la producción agrícola nacional. De las 6.5 millones de hectáreas de agricultura de riego, 3.5 (54%) corresponden a 85 distritos de riego y 3.0 (46%) a 39,492 unidades de riego. Por lo que se refiere a la superficie de temporal, 2.7 de las 14.5 millones de hectáreas, corresponden a 22 distritos de temporal tecnificado.

El 88% del volumen de agua que se emplea en los distritos de riego proviene de fuentes superficiales que se almacena en presas o se deriva de los ríos, y el 12% restante, corresponde a aguas subterráneas extraídas de los acuíferos a través de pozos profundos. En lo relativo a las unidades de riego, el 57% del agua que se utiliza es subterránea y el 43% superficial. El cuadro 2. Muestra que en general la agricultura de riego consume el 69% del agua de fuentes subterráneas (CONAGUA, 2007^b).

Cuadro 2. Uso del agua en la agricultura en México.

| Tipo de agricultura. | Superficie. Millones de Hectáreas | Fuentes de agua. | % de agua utilizada. |
|----------------------|--------------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Temporal | 14.5 | Agua de lluvia | 100 |
| Riego | 6.5 | Aguas Subterráneas | 69 |

Fuente: CONAGUA, 2007^b.

En lo que se refiere a los usos del agua, el volumen concesionado a diciembre de 2006, sin incluir la generación de energía hidroeléctrica, fue de 77,321 millones de metros cúbicos, de ese volumen, el 77% corresponde a uso agrícola (incluyendo las actividades pecuarias, acuícolas y múltiples), 14% al uso público y 9% al uso industrial. Esta agua es obtenida de ríos y acuíferos (CONAGUA, 2007^a).

3.4. LA EFICIENCIA DEL USO DEL AGUA Y SU CONSECUENCIA

La eficiencia del uso del agua en el sector agrícola oscila entre 33% y 55%. Mientras que en las ciudades la eficiencia fluctúa entre el 50% y 70%. Las bajas eficiencias en el uso del agua, añadidas al incesante crecimiento poblacional y a la poca disponibilidad del agua, han ocasionado que el agua de los ríos y lagos sean insuficientes en algunas zonas, que las fuentes de abastecimiento subterráneas estén sobreexplotadas y que la calidad natural del agua se haya deteriorado.

Lo anterior ha ocasionado una creciente competencia por el agua que se ha traducido en conflictos en diferentes zonas del territorio nacional y empieza a limitar el bienestar social y desarrollo económico (CONAGUA, 2007^a).

3.5. LA LEGISLACIÓN DEL AGUA EN MÉXICO

La legislación se refiere a un conjunto de leyes de un estado sobre una materia o un sector, para el caso de México, en materia de agua, la Ley de Aguas Nacionales y su reglamento establece los principios que sustentan la política hídrica nacional, algunos de estos principios a los que se hace referencia son:

- a). El agua es un bien de dominio público federal, vital, vulnerable y finito, con valor social, económico y ambiental, cuya preservación en cantidad y calidad es tema fundamental del estado y la sociedad, así como prioridad y asunto de seguridad nacional, por lo tanto, la gestión integrada de los recursos hídricos es la base de la política hídrica nacional.
- b). La conservación, preservación, protección y restauración del agua en cantidad y calidad es asunto de seguridad nacional, por lo tanto debe evitarse el aprovechamiento no sustentable y los efectos ecológicos adversos.
- c). El aprovechamiento del agua debe realizarse con eficiencia y debe promoverse su reúso y recirculación. Por lo que la participación informada y responsable de la sociedad es base para la mejor gestión de los recursos hídricos y particularmente para su conservación, así que es esencial la educación ambiental, especialmente en materia del agua.

Así mismo, el Título IV, Capítulo III, de la mencionada Ley, establece las obligaciones que tendrán los asignatarios en materia de uso, explotación o aprovechamiento de agua destinada a los servicios con carácter público urbano o doméstico, los cuales deben garantizar la calidad del agua conforme a los parámetros referidos en las Normas Oficiales Mexicanas. Descargar aguas residuales a los cuerpos receptores previo tratamiento, cumpliendo con las Normas Oficiales Mexicanas, procurar su reúso y asumir los costos económicos y ambientales de la contaminación que provocan sus descargas, así como asumir las responsabilidades por el daño ambiental causado (CONAGUA, 2009^a).

3.6. NORMAS RELACIONADAS CON EL AGUA RESIDUAL

Cuadro 3. Normas Oficiales Mexicanas.

| | |
|---|---|
| NOM-001-SEMARNAT-1996. Publicada en el diario oficial de la federación el 6 de enero de 1997. | Establece los LMP* de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. |
| NOM-002-SEMARNAT-1996. Publicada en el diario oficial de la federación el 3 de junio de 1998. | Establece los LMP* de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. |
| NOM-003-SEMARNAT-1997. Publicada en el diario oficial de la federación el 21 de septiembre de 1998. | Establece los LMP* de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. |

Fuente: CONAGUA, 2007^b.

*Límites Máximos Permisibles

3.7. DEFINICIÓN DE AGUAS RESIDUALES

Aguas residuales son las aguas de composición variada procedentes de las descargas de usos público urbano, domestico, industrial, comercial, de servicios, agrícola, pecuario, de las plantas de tratamiento, y en general de cualquier uso así como la mezcla de ellas (CONAGUA, 2009^a). Que por su composición no pueden ser reutilizadas sin un tratamiento y al ser vertidas sobre cuerpos receptores puede tener efectos negativos.

3.8. CONTAMINANTES DEL AGUA RESIDUAL

Se ha demostrado que la introducción de contaminantes en el agua está relacionada con la lluvia, las actividades de la naturaleza y de la población. Saldaña, *et al*, (2011) mencionan que la degradación de los recursos acuáticos se ha incrementado debido a las descargas antropogénicas y que los diversos agentes contaminantes que deterioran la calidad del agua no son producidos bajo condiciones naturales.

Por su parte, el IMTA (1994) distingue los contaminantes del agua residual y los clasifica en contaminantes físicos, químicos y biológicos.

3.8.1. CONTAMINANTES FÍSICOS

Sólidos suspendidos (SS): La materia en suspensión está compuesta por diversos tipos de sólidos flotantes, sedimentables y coloidales. Además por su composición pueden ser orgánicos e inorgánicos. Un sólido en suspensión es aquel que puede retenerse en un filtro estándar de fibra de vidrio cuyo diámetro sea de 1.2μ . Los sólidos que pasan a través de dicho filtro representan la fracción compuesta por los sólidos coloidales y los sólidos disueltos. El origen de los sólidos es muy amplio dado que casi todos los usos del agua (uso doméstico, agrícola, pecuario, industrial) aportan sólidos suspendidos al agua residual. Los efectos de los SS en los cuerpos de agua están asociados al tamaño y la naturaleza del sólido, entre los efectos más notables esta la interferencia en la penetración de la luz solar (turbiedad) y el azolve de los cuerpos de agua (Arce, *et al.*, 2010).

3.8.2. CONTAMINANTES QUÍMICOS

Materia orgánica: puesto que el material orgánico constituye una parte significativa del suelo, y ya que es utilizado por los organismos acuáticos para construir sus cuerpos y producir alimentos, es inevitable encontrar productos orgánicos solubles provenientes del metabolismo de estos organismos en todas las fuentes de agua (Nalco Chemical Company, 1989). La materia orgánica, es susceptible de ser oxidada y transformada en compuestos más simples como bióxido de carbono y agua por acción de las bacterias. Si hay oxígeno disuelto en el agua las bacterias aerobias lo consumen para llevar a cabo dicha transformación.

Nitrógeno amoniacal: El nitrógeno amoniacal también puede ser oxidado por las bacterias aerobias y se transforma en nitritos y nitratos.

Debido a la dificultad de hacer un análisis estequiométrico de la materia orgánica presente en el agua residual, se han desarrollado métodos analíticos indirectos que miden la cantidad de oxígeno requerida para la transformación y de esta forma se conoce la cantidad de materia orgánica presente, los métodos de mayor uso son la DBO₅ y la DQO. La DBO₅ es una cantidad aproximada de oxígeno que requiere una población microbiana para la oxidación de la materia orgánica y la DQO es una oxidación en medio ácido en presencia de un oxidante fuerte (Dicromato de Potasio) y con aplicación de calor, bajo estas condiciones se oxida toda la materia orgánica presente, incluso aquella que los microorganismos no son capaces de degradar, por ello la DQO es mayor que la DBO₅. (Arce, *et al*, 2010). Ciertos minerales orgánicos presentes en el agua contaminada por las descargas agrícolas (como residuos de pesticidas) o por las descargas industriales en concentraciones muy inferiores a 1 mg l⁻¹ pueden ejercer un efecto muy significativo sobre la vida de la corriente receptora (Nalco Chemical Company, 1989).

Metales pesados: Ramírez (1999) menciona que los metales son materiales naturales que desde la edad de hierro han sido parte fundamental para el desarrollo de las civilizaciones. Estos pueden encontrarse en mayor concentración en los extractos profundos de los ríos y en menor proporción en la superficie.

Los metales pesados son aquellos cuya densidad es por lo menos cinco veces mayor que la del agua, entre los más conocidos se encuentran el Arsénico, Cadmio, Cobalto, Cromo, Cobre Mercurio, Níquel, Plomo y Zinc. La presencia de estos metales en el organismo del ser humano se da a través de la cadena trófica. La peligrosidad de los metales pesados se debe a que estos no pueden ser biodegradados ni degradados químicamente, una vez emitidos pueden permanecer en el ambiente durante cientos de años. Además, su concentración en los seres vivos aumenta a medida que son ingeridos por otros, por lo que el consumo de animales o plantas contaminadas puede causar síntomas de intoxicación.

Entre los metales, se encuentran algunos que son requeridos en mínimas cantidades por los organismos ya que los utilizan en sus funciones metabólicas, como el hierro que forma parte de la hemoglobina, su ausencia causa anemia, pasando cierto umbral se vuelve tóxico.

El contenido de metales pesados en el agua es únicamente una función de la calidad del agua y de la procedencia de esta, por lo tanto, para el reconocimiento de la contaminación por metales se utilizan términos de referencia establecidos como Normas. En el suelo, pueden quedar retenidos, ya sea disueltos en la solución del suelo o fijados por procesos de adsorción, formando complejos y por precipitación. Pueden ser absorbidos por las plantas y animales incorporándose a las cadenas tróficas; y movilizarse en aguas superficiales y subterráneas.

En general, lo que hace tóxicos a los metales pesados, no es su característica esencial, sino su concentración y la forma química en la que pueden encontrarse. Por otra parte, entre los factores que afectan la acumulación y disponibilidad de los metales pesados está el pH, este es un factor esencial debido a que la mayoría de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido, si el pH es alcalino puede bajar la toxicidad del metal por precipitación como carbonatos e hidróxidos. La adsorción de los metales pesados está condicionada por el pH del suelo.

3.8.3. CONTAMINANTES BIOLÓGICOS

Los microorganismos de interés en la contaminación del agua son los virus, las bacterias, protozoarios y huevos de helminto. Los indicadores de contaminación por heces fecales son los coliformes fecales, si bien estos microorganismos no causan mayores daños a la salud su presencia indica el ingreso de materia fecal en el agua y alerta sobre la presencia potencial de otros organismos como *Salmonella* y *Shigella*. Las descargas domésticas sin tratamiento en cuerpos receptores son la causa principal de contaminación por patógenos en las aguas superficiales y subterráneas.

Estos agentes microbiológicos representan un problema de salud pública, por lo que para controlar la incidencia de enfermedades gastrointestinales se debe reducir su presencia en el agua para riego de vegetales que se consumen crudos (Arce, *et al*, 2010).

3.9. TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

Para el caso del tratamiento de aguas residuales, la Comisión Nacional del Agua (2000) menciona que las tecnologías del tratamiento de aguas pueden ser agrupadas en tres clasificaciones de acuerdo al tipo de tratamiento en tratamiento físico, químico y biológico.

3.9.1. TRATAMIENTO FÍSICO

El tratamiento físico de aguas modifica la estructura del agua residual y de sus contaminantes, o bien, separa el agua de desecho con varios componentes. Este tratamiento sirve para separar los contaminantes peligrosos y no peligrosos de una corriente, para separar una corriente en varios componentes mediante diferentes operaciones, para acondicionar una corriente para tratamiento futuro y para remover partículas sólidas u objetos. Los tratamientos físicos más comunes incluyen cribado, sedimentación, flotación y filtración.

a). Cribado: la primera operación que tiene lugar en el tratamiento de las aguas residuales es el cribado. Una criba o una rejilla es un elemento con aberturas generalmente de tamaño uniforme que se utilizan para retener los sólidos gruesos existentes en el agua residual. Los elementos separadores pueden estar constituidos por barras o varillas paralelas (rejillas), telas metálicas o placas perforadas (tamiz) y las aberturas pueden ser ranuras rectangulares u orificios circulares. Las rejillas se utilizan para proteger bombas, válvulas, conducciones y otros elementos contra posibles daños y obturaciones por la presencia de objetos de gran tamaño.

Los tamices son de disco inclinado o de tambor, mecánicos o automáticos y su campo de aplicación se extiende desde el tratamiento primario hasta la eliminación de los sólidos en suspensión de los efluentes procedentes de los procesos de tratamiento biológico.

b). Sedimentación: la sedimentación, consiste en la separación de las partículas suspendidas por acción de la gravedad cuyo peso específico es mayor que el del agua. La sedimentación es una de las operaciones más utilizadas en el tratamiento de aguas residuales, esta operación se utiliza en la eliminación de arenas, de materia en suspensión proveniente de los procesos de coagulación-floculación, de lodos activados y para la concentración de sólidos en los espesadores de lodo, principalmente. En la mayoría de los casos el objetivo principal de la sedimentación es la obtención de un efluente clarificado y producir un lodo cuya concentración de sólidos permita su fácil tratamiento y manejo.

Las principales variables de diseño del proceso de sedimentación es el tamaño de la partícula y el área del sedimentador, por lo que se establece que las partículas de mayor tamaño sedimentan a mayor velocidad y por otro lado una mayor superficie ofrecerá mayor tiempo para que sedimenten mayor número de partículas, es decir, partículas más pequeñas.

c). Flotación: Este tratamiento es empleado para la separación de partículas sólidas o líquidas de una fase líquida. La separación se consigue introduciendo burbujas finas de gas (normalmente aire) en el líquido. Las burbujas se adhieren a las partículas disminuyendo la densidad por debajo de la densidad del agua, por lo que la combinación de la partícula con la burbuja flota y sube a la superficie. De esta forma es posible hacer ascender partículas cuya densidad es mayor a la del agua además de favorecer el ascenso de las partículas con menor densidad como en el caso de las grasas y aceites.

La principal ventaja del proceso de flotación frente al de sedimentación consiste en que permite eliminar mejor y en menos tiempo las partículas pequeñas o ligeras cuya sedimentación es lenta.

d) Filtración: Es un proceso que separa los sólidos suspendidos y la materia coloidal de la fase líquida por medio de un material poroso.

Durante la filtración a profundidad, el agua llena los poros del filtro y las impurezas son retenidas por adhesión en el empaque.

Una filtración eficiente implica tanto la desestabilización de la partícula como su transporte y retención. La filtración también remueve partículas y materia coloidal no sedimentable después de la floculación biológica o química.

La filtración incrementa la remoción de sólidos suspendidos, turbiedad, fósforo, DBO, DQO, metales pesados, asbestos, bacterias, virus y otras sustancias; mejora la eficiencia y reduce el costo de la desinfección a través de la remoción de materia orgánica suspendida y otras sustancias.

3.9.2. TRATAMIENTO QUÍMICO

Los tratamientos químicos modifican la estructura química de los contaminantes con el fin de poder removerlos más fácilmente del agua residual. El tratamiento químico es relativamente fácil, pero genera lodos o sedimentos que deben ser manejados posteriormente. Los tratamientos químicos más comúnmente usados son: precipitación, coagulación-floculación, oxidación química, desinfección, adsorción.

a) Precipitación: La precipitación química es un proceso que consiste en la adición de reactivos con el propósito de que reaccionen con compuestos solubles específicos para formar compuestos en forma sólida que precipiten. Los contaminantes pueden ser removidos de la masa de agua por precipitación directa cuando sustituyen iones de tamaño similar en cristales ya formados o en formación.

En la remoción de contaminantes, son de importancia particular la formación de carbonatos, fosfatos, sulfuros, hidróxidos y óxidos. La precipitación se produce de acuerdo con leyes químicas de la combinación de los reactivos y sus productos de solubilidad.

Es posible determinar si la especie se encuentra en solución o en forma precipitada comparando el producto de sus concentraciones molares ($a \times b$) con el producto de solubilidad (k): cuando el producto de las concentraciones es mayor que el producto de solubilidad ($a \times b > k$) la solución está sobresaturada y se espera que precipite.

b) Coagulación-floculación: La coagulación es el proceso en el cual se añaden compuestos químicos a un agua residual para reducir las fuerzas de tensión que apartan a los sólidos suspendidos entre sí. Es el tratamiento esencial para la eliminación de sólidos suspendidos. Este tratamiento se aplica en situaciones específicas, por ejemplo, cuando el agua residual contiene gran cantidad de compuestos tóxicos, cuando los componentes del agua no son biodegradables, si se desea garantizar la sedimentación de los sólidos y/o como pre-tratamiento en un tren de tratamiento avanzado con el fin de aumentar la eficiencia de los procesos subsecuentes de remoción por eliminación del material coloidal.

En la coagulación, la desestabilización involucra la compresión de la doble capa eléctrica, la atracción electrostática, la formación de puentes interpartícula y el arrastre de flóculos.

La coagulación-floculación se realiza en dos etapas; en la primera las fuerzas interpartícula responsables de la estabilidad de los coloides son reducidas o anuladas por la adición de reactivos apropiados; en la segunda las colisiones entre partículas favorecen la formación de flóculos de mayor tamaño, estos son eliminados del agua por medios físicos como la sedimentación, flotación o filtración.

Sin embargo algunos floculantes tienen desventajas como el alumbre (Sulfato de Aluminio) que incrementa los sulfatos en el agua y forma flóculos más difíciles de sedimentar y el hierro que aumenta la concentración de cloruros en el agua y causa problemas en pH ácido.

c) Oxidación química: La oxidación química en el tratamiento de agua es un método de modificación selectiva de sustancias orgánicas tóxicas. La oxidación de metales se considera de importancia secundaria ya que los metales son removidos eficientemente por procesos de precipitación o intercambio iónico. El propósito de la oxidación en el tratamiento de aguas es convertir especies químicas no deseables en especies que no sean peligrosas o que no deterioren la calidad del agua. El nivel de oxidación deseado es determinante desde el punto de vista económico tanto por los reactivos oxidantes como por el diseño de unidades con el tamaño adecuado para alcanzar el tiempo de reacción necesario.

La adición de químicos fuertes como el ozono es por lo general costoso, oxidantes baratos como el cloro no pueden ser empleados indiscriminadamente debido a la formación de compuestos organoclorados que pueden llegar a presentar un efecto secundario. En las reacciones de oxidación se deben considerar los factores que intervienen, tales como la concentración de reactivos e impurezas, la temperatura y el pH.

d). Desinfección: es la destrucción de organismos potencialmente dañinos, comúnmente constituye la etapa final del tratamiento de aguas residuales para la remoción de contaminantes tóxicos.

La desinfección en un proceso de tratamiento puede llevarse a cabo mediante cloración, incremento de la temperatura, radiación ultravioleta u ozono, para destruir toda clase y cantidad de organismos patógenos.

Según el tipo de agente desinfectante, en todos los casos, se ha observado que su eficiencia está en función de su concentración, así también, la eficiencia en la desinfección estará en función del tipo de microorganismos presentes.

e). Adsorción: es el proceso químico en el cual una sustancia se acumula en la superficie del adsorbente donde el factor más importante para que se lleve a cabo la adsorción es la superficie disponible, para la adsorción de especies iónicas el mecanismo más importante es la atracción electrostática la cual depende del pH y la fuerza iónica.

La estructura molecular del contaminante define el grado de adsorción así que las moléculas de baja polaridad y solubilidad tienden a ser perfectamente adsorbidas. El carbón activado es el más utilizado comúnmente en los sistemas de tratamiento.

3.9.3. TRATAMIENTO BIOLÓGICO

Las técnicas del tratamiento biológico degradan compuestos orgánicos del agua residual por la actividad de microorganismos. Estos compuestos orgánicos se pueden descomponer en agua y metano, en compuestos orgánicos menos tóxicos, o en masa bacteriana. Los químicos tóxicos pueden inhibir el tratamiento biológico al matar a los microorganismos. Altas concentraciones de compuestos inorgánicos, o altas temperaturas, pueden inhibir también el tratamiento biológico. Para que este tratamiento se pueda llevar a cabo, se necesita la presencia de fósforo y nitrógeno, que generalmente no se encuentran presentes en el agua residual de muchas industrias.

Existe una amplia gama de sistemas biológicos de tratamiento en los que una población mixta de microorganismos descompone la materia orgánica para utilizarla como fuente de nutrientes. Los procesos biológicos son, en general, las técnicas económicamente más eficientes para el tratamiento de desechos líquidos que contienen compuestos orgánicos.

Los procesos biológicos pueden ser de tipo aerobio y anaerobio. En términos generales, los procesos anaerobios se utilizan para efectuar el tratamiento de aguas residuales con un elevado contenido de materia orgánica (DBO) como los lodos provenientes de los tratamientos aerobios. En muchas industrias este tipo de tratamiento se utiliza como una etapa de pre tratamiento.

Para aplicar un tratamiento biológico es necesario que el agua residual no contenga sustancias tóxicas que inhiban el proceso biológico, un pH adecuado para el desarrollo de microorganismos o plantas y una relación adecuada entre el contenido de carbono, nitrógeno y fósforo.

Para determinar la biodegradabilidad de un agua residual, normalmente se emplea un reactor de alimentación por lotes (Batch) y se evalúa la eficiencia del proceso. Si el desecho no es biodegradable, debe emplearse un tratamiento alternativo, en cambio, si es biodegradable pero muestra umbral tóxico, debe evaluarse la reducción de la toxicidad mediante un tratamiento biológico con microorganismos adaptados o la reducción de los contaminantes tóxicos en la fuente.

a). Procesos aerobios convencionales

Entre los procesos aerobios se encuentran los lodos activados, lagunas de oxidación, y filtros percoladores. Los procesos completamente mezclados (como los dos primeros) son más tolerantes a sustancias tóxicas, ya que el impacto se reduce por dilución y se distribuye entre una mayor cantidad de biomasa. Las sustancias no biodegradables pueden ser adsorbidas en los lodos biológicos.

Un problema adicional relacionado con los sistemas aireados es la dispersión de compuestos volátiles. Si bien es un mecanismo de remoción de contaminantes prioritarios, se pueden presentar problemas en la salud de los trabajadores debido al aire contaminado.

b). Procesos anaerobios

Los procesos anaerobios más conocidos son los reactores, filtros y lagunas anaerobias. Estos sistemas presentan algunas ventajas sobre los sistemas aerobios ya que se reduce la producción de lodos y el metano que se produce se puede usar como combustible, además, se reduce la emisión de compuestos volátiles a la atmósfera.

En cuanto a la operación y mantenimiento, las lagunas anaerobias no presentan problemas y tienen un bajo costo de operación y mantenimiento; en cambio los filtros anaerobios y reactores presentan problemas de operación mayores a los de un sistema de lodos activados.

3.10. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN (GENERALIDADES)

El tratamiento de aguas residuales mediante lagunas de estabilización es recomendable para tratar aguas preferentemente de comunidades pequeñas hasta ciudades de 200,000 habitantes. En este sistema de tratamiento con relación a otros sistemas convencionales, no es necesario adicionar cloro al efluente para su desinfección puesto que las lagunas de estabilización son diseñadas para tratar agua por medio de la interacción de la biomasa (algas, bacterias), la materia orgánica del desecho y otros procesos naturales. En las lagunas de oxidación se implica la oxidación de la materia orgánica con el oxígeno producido por las algas a través de la fotosíntesis, las bacterias aerobias usan este oxígeno para transformar los desechos orgánicos existentes en el agua residual. Como resultado del proceso fotosintético, existe una variación en la concentración de oxígeno disuelto, lo que influye en la actividad de las algas, donde los iones carbonato y bicarbonato reaccionan para proveer más dióxido de carbono a las algas produciendo una variación en la alcalinidad. Además la actividad de las algas se ve afectada por los cambios en la intensidad de la luz originando grandes fluctuaciones en la calidad del efluente y dando un color verde oscuro al agua. La finalidad del tratamiento es obtener un efluente con características definidas de acuerdo a su reúso o para descarga en cuerpos receptores (IMTA, 1994).

Debido a la actividad biológica en las lagunas de estabilización existe una variación en parámetros como oxígeno disuelto, sólidos suspendidos, turbidez, entre otros (Nalco Chemical Company, 1989).

3.11. USO DE PLANTAS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Un humedal artificial es un sistema de tratamiento de agua residual (estanque o cauce) poco profundo, no más de 0.60 mts, construido por el hombre, en el que se han sembrado plantas acuáticas, y contado con los procesos naturales para tratar el agua residual. Los humedales artificiales o wetland construidos, tienen ventajas respecto de los sistemas de tratamiento convencionales; debido a que son de bajo costo de operación y mantenimiento, puede ser una alternativa efectiva para el saneamiento de aguas.

Los sistemas de tratamiento mediante plantas acuáticas, están en los estanques poco profundos con plantas flotantes o sumergidas. Los sistemas más completamente estudiados son aquellos que usan la lenteja de agua. Estos sistemas incluyen dos clases, basados en tipos de plantas dominantes. El primer sistema usa plantas flotantes y se distingue por la habilidad de estas plantas para derivar el dióxido carbono y las necesidades de oxígeno de la atmósfera directamente y las plantas reciben sus nutrientes desde el agua. El segundo tipo de sistema consiste en plantas sumergidas, este se distingue por la capacidad de estas plantas para absorber oxígeno, dióxido de carbono y minerales de la columna de agua, y mediante diversos procesos como la fitoextracción (que consiste en la concentración de contaminantes en las partes de la planta) se absorben metales como Cadmio, Cobalto, Cromo, Níquel, Mercurio, Plomo, Selenio y Zinc acumulándose principalmente en la raíz, tallo y hojas (Frers, 2007).

3.12. CALIDAD DEL AGUA PARA RIEGO AGRÍCOLA

La agenda del agua 2030, refiere que el concepto de calidad del agua, solo adquiere sentido práctico cuando es susceptible de ser medido y cuando el agua se asocia a un uso determinado, a partir de ello, se establecen parámetros y valores que se deben cumplir (CONAGUA, 2011).

3.12.1. PARÁMETROS DE CALIDAD

La ley federal de derechos establece los lineamientos de calidad del agua para riego agrícola los cuales se muestran en el cuadro 4. Para cultivos sensibles establece valores de RAS < 4 meq l⁻¹, y para forrajes valores de RAS entre 8 y 18 meq l⁻¹, cuando las descargas sean directamente a suelos con uso agrícola.

Cuadro 4. Lineamientos de calidad del agua para uso en riego agrícola.

| pH | Cl ⁻ meq l ⁻¹ | SDT | SST | As | Cd | Cu | Cr | Fe | Mn | Ni | Pb | Mat. Flot. |
|-----|--|-----|-----|-----|------|------|-----|----|-----|-----|-----|------------|
| 6-9 | 4.23 | 500 | 50 | 0.1 | 0.01 | 0.20 | 0.1 | 5 | 0.2 | 0.2 | 0.5 | Ausente |

Fuente: CONAGUA, 2009^b.

Los criterios de calidad del agua para su uso en riego agrícola son físicos y químicos, considerando los parámetros pH, C.E RAS, para los efluentes de lagunas de estabilización que tratan aguas residuales domesticas (IMTA, 1994).

Para determinar la calidad del agua para riego, se toman en cuenta indicadores como pH, C.E, aniones y cationes, mediante los cuales se estiman los limitantes para su uso en diversos cultivos, como el contenido de sales, y peligro por sodificación principalmente.

CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN

Alcantar, *et al*, (1992) mencionan con respecto a la evaluación de la calidad del agua con fines de riego, que esta se puede medir basándose en los siguientes criterios.

- a). El contenido de sales solubles en el agua.
- b). El efecto probable del sodio sobre algunas propiedades físicas del suelo.
- c). El contenido de elementos tóxicos para las plantas.

CONTENIDO DE SALES SOLUBLES

El contenido de sales solubles se debe analizar según lo mencionan Palacios y Aceves (1970), debido a que producen presiones osmóticas en la solución del suelo que está en contacto con las raíces de las plantas. Sin embargo, nos advierte que no hay que confundir la conductividad eléctrica aceptable en el agua de riego con la conductividad eléctrica que tolera un cultivo, la C.E del agua en el extracto de saturación del suelo generalmente es mayor que la del agua de riego.

Cuadro 5. Clasificación del agua de riego según su conductividad eléctrica.

| Clasificación | Criterio | C.E mS cm ⁻¹ |
|---------------|------------------|-------------------------|
| C1 | Salinidad baja | 0-0.250 |
| C2 | Salinidad media | 0.250-0.750 |
| C3 | Salinidad alta | 0.750-2.250 |
| C4 | altamente salina | > 2.250 |

SALINIDAD EFECTIVA

La salinidad efectiva (SE) es la estimación más real del peligro que representan las sales solubles del agua de riego al pasar a formar parte de la solución del suelo, para determinar la SE hay varias opciones expresando los iones en meq l⁻¹ mediante las fórmulas que se presentan en el cuadro 6, y en el cuadro 7 se muestra la clasificación del agua de acuerdo a este indicador

Cuadro 6. Fórmulas para estimar la SE.

- | |
|--|
| a). si $Ca > CO_3 + HCO_3 + SO_4$ $SE = (\sum \text{Cationes}) - (CO_3 + HCO_3 + SO_4)$ |
| b). si $Ca < CO_3 + HCO_3 + SO_4$ y $Ca > CO_3 + HCO_3$ $SE = (\sum \text{Cationes}) - (Ca)$ |
| c). si $Ca < CO_3 + HCO_3$ y $Ca + Mg > CO_3 + HCO_3$ $SE = (\sum \text{Cationes}) - (CO_3 + HCO_3)$ |
| d). si $Ca + Mg < CO_3 + HCO_3$ $SE = (\sum \text{Cationes}) - (Ca + Mg)$ |

Si la suma de cationes es menor que la suma de aniones, deberá emplearse en las fórmulas la suma de aniones en lugar de la suma de cationes.

Cuadro 7. Clasificación del agua según la SE.

| Clase | SE. meq l ⁻¹ |
|-----------------|-------------------------|
| Buena | < 3.0 |
| Condicionada | 3 – 15 |
| No recomendable | > 15 |

SALINIDAD POTENCIAL

La salinidad potencial (SP) es un indicador para estimar el peligro de las sales que quedan en solución a bajos niveles de humedad, este es uno de los mejores indicadores del efecto de las sales sobre los cultivos. La SP se mide en meq l⁻¹ y se determina mediante la fórmula siguiente.

—

Cuando las aguas de riego contienen cantidades considerables de sodio en solución, este se acumula paulatinamente en el suelo y como consecuencia el suelo se deflocula y pierde su estructura. Debido a esto, la permeabilidad del suelo disminuye, se favorece la formación de costras, por lo que se afecta el desarrollo normal de los cultivos.

RELACIÓN DE ADSORCIÓN DE SODIO

La relación de adsorción de sodio (RAS) indica si la proporción de sodio es alta, ya que esta aumenta a medida que crece el valor de RAS, mientras que, si predomina el Ca y Mg el peligro será menor. Para determinar el valor de RAS se utiliza la siguiente ecuación y una vez obtenido se puede clasificar el agua (cuadro 8).

$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{(Ca + Mg)}/2}$$

Cuadro 8. Clasificación del agua de acuerdo a los valores de RAS.

| Clasificación | Criterio | RAS meq l ⁻¹ |
|---------------|------------------------|-------------------------|
| S1 | Agua baja en sodio | < 10 |
| S2 | Agua media en sodio | 10-18 |
| S3 | Agua alta en sodio | 18-25 |
| S4 | Agua muy alta en sodio | > 25 |

CARBONATO DE SODIO RESIDUAL

El índice de carbonato residual (CSR) indica el peligro de sodificación una vez precipitados los Carbonatos y Bicarbonatos de Calcio y de Magnesio. El riesgo se reduce eliminando los Carbonatos y Bicarbonatos con tratamiento ácido, su eliminación es indispensable en sistemas de fertirrigación debido a que producen taponamiento en los emisores. El CSR se calcula mediante la fórmula:

$$CSR = [CO_3 + HCO_3] - [Ca + Mg]$$

PORCENTAJE DE SODIO POSIBLE

El porcentaje de sodio posible (PSP) representa el peligro de desplazamiento de Ca y Mg por el sodio, en el complejo de intercambio empieza cuando el contenido de sodio en solución presenta más de la mitad de cationes disueltos. El porcentaje de sodio en el agua de riego no es suficientemente representativo de este peligro debido a que las sales menos solubles (CaCO₃, MgCO₃, CaSO₄) precipitan y por lo tanto el porcentaje de sodio en solución incrementa relativamente, por esta razón el PSP está referido a la S.E. Para cualquier condición de suelo el PSP < 50% indica que el agua es buena para riego. El PSP se calcula con la fórmula siguiente.

$$PSP = \left[\frac{Na}{SE} \right] [100]$$

3.12.2. CLASIFICACIÓN DEL AGUA

La clasificación del agua podrá efectuarse en función de la conductividad eléctrica (C.E) contra la relación de adsorción de sodio (RAS) de acuerdo a la nomenclatura que se muestra en el cuadro 9. Las clasificaciones se basan en las propuestas por el laboratorio de salinidad del departamento de agricultura de los Estados Unidos en su manual 60 (Alcantar, *et al*, 1992).

Cuadro 9. Nomenclatura que describe la calidad del agua.

| | | | |
|----|-------------------------|----|----------------------------|
| S1 | Agua baja en sodio. | C1 | Agua de baja salinidad. |
| S2 | Agua media en sodio. | C2 | Agua de salinidad media. |
| S3 | Agua alta en sodio. | C3 | Agua altamente salina. |
| S4 | Agua muy alta en sodio. | C4 | Agua muy altamente salina. |

3.13. TRATAMIENTO Y REUSO DE AGUA RESIDUAL EN MÉXICO

Según los datos que reporta la Comisión Nacional del Agua (2007^b), en México, para el año 2006, 36 % del agua residual generada recibió tratamiento, los principales procesos de tratamiento son en primer lugar, lodos activados y lagunas de estabilización.

Actualmente, la calidad del efluente debe reunir los requerimientos para riego agrícola, especialmente en nuestro país, donde muchas de las aguas residuales se utilizan para riego (IMTA, 1994), sin embargo el reúso en la industria, servicios municipales, usos secundarios y recarga de acuíferos, se practica en proporciones muy pequeñas, dichos usos se clasifican según su destino (cuadro 10).

Cuadro 10. Clasificación del agua residual tratada según su reúso.

| | |
|--|---|
| Agrícola | Riego de áreas de cultivo de caña de azúcar, arboles, forrajes, pastizales. |
| Servicios al público con contacto directo | Llenado de lagos y canales artificiales recreativos, fuentes, riego de parques y jardines. |
| Servicios al público con contacto indirecto u ocasional. | Riego de jardines y camellones de autopista, en avenidas, lagos artificiales, riego de áreas verdes en panteones. |
| Industrial. | Para enfriamiento, lavado de equipo, riego de áreas verdes y servicios sanitarios. |

Fuente: CONAGUA, 2007^a.

Se estima que en México se reutilizaron 4,722 millones de metros cúbicos de aguas residuales ($150 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) en 2007. La agricultura ocupa el primer lugar en el reúso de aguas municipales; la industria el segundo sitio y las hidroeléctricas en tercer lugar. En el reúso de agua de origen industrial (no municipal) destacan las aguas residuales de los ingenios azucareros en el cultivo de la caña, principalmente en el estado de Veracruz (INEGI, 2009).

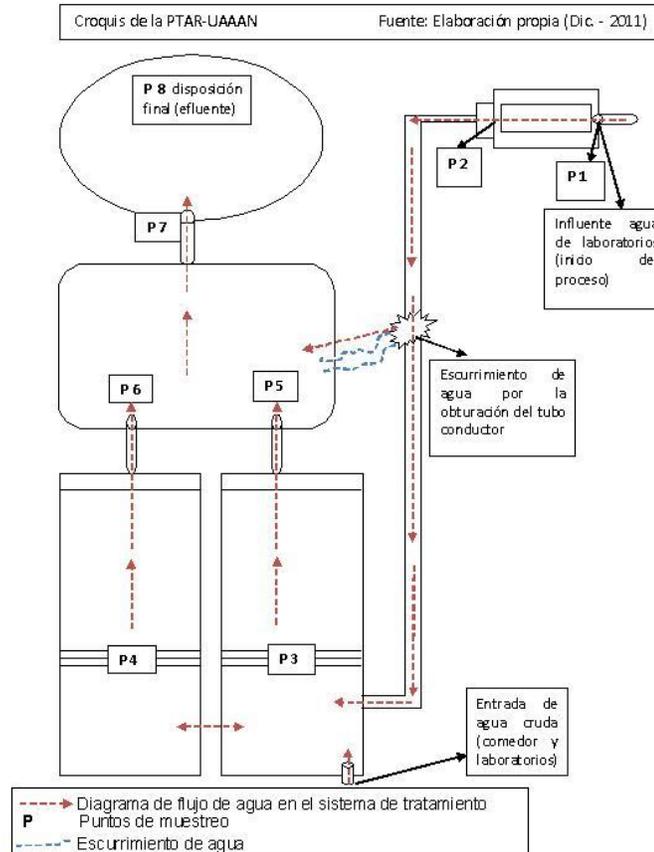
IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. UBICACIÓN

El presente trabajo de investigación se realizó en la planta de tratamiento de aguas residuales que se encuentra en el campus de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en la Ciudad de Saltillo, Coahuila. Ubicada a los 25°21'14" Latitud Norte y 101°2'2" Longitud Oeste. La PTAR colinda al norte con el jardín botánico, al sur con el jardín hidráulico, al este con el Departamento de Fitomejoramiento y al oeste con el Departamento de Horticultura.

4.2. METODOLOGIA

Para la realización del presente trabajo, se recolectaron un total de 56 muestras de agua residual en ocho diferentes puntos de la PTAR, el periodo de muestreo fue de enero a junio del 2011 y se llevó a cabo de acuerdo a la NMX-AA-003-1980. Las muestras se tomaron a la salida de cada etapa de tratamiento ubicándose cada punto como se muestra en el croquis de la planta de tratamiento de agua residual.



- Punto 1: Influyente, entrada de agua cruda al tanque Imhoff
- Punto 2: Salida del tanque Imhoff (sedimentación)
- Punto 3: Salida del primer tanque igualador de gasto
- Punto 4: Salida del segundo tanque igualador de gasto
- Punto 5: Salida del primer filtro plantado con carrizo (*Gynerium sagita*)
- Punto 6: Salida del segundo filtro plantado con carrizo (*Gynerium sagita*)
- Punto 7: Salida del pantano artificial plantado con lirio acuático (*Eichhornia crassipes*)
- Punto 8: Laguna de oxidación, efluente de agua tratada

En la toma de muestras se utilizaron recipientes de vidrio con capacidad de 1 litro previamente lavados, y enjuagados en tres ocasiones con la misma agua a recolectar.

Para el análisis de agua, las muestras se llevaron al laboratorio de química de suelos del departamento de ciencias del suelo, donde se analizaron tomando en cuenta los parámetros siguientes: pH, C.E, SS, SST, ST, DQO, aniones, cationes, Cadmio, Cobre, Cromo, Níquel, Plomo y Zinc. Mediante estos parámetros se determinó la calidad del agua de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996 (cuadro 11).

4.2.1. CALIDAD AGRONÓMICA DEL EFLUENTE

La calidad agronómica del agua se determinó mediante los siguientes parámetros: pH, C.E, aniones y cationes, Los cuales se analizaron mediante el método del laboratorio de salinidad del departamento de agricultura de los Estados Unidos citado por Alcantar, *et al*, (1992) y el método de Palacios y Aceves (1970).

4.2.2. EFICIENCIA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO

La eficiencia de la planta de tratamiento se determinó mediante el porcentaje de remoción de la DQO y SST con la fórmula siguiente:

Dónde:

E: es el porcentaje de eficiencia

Ci: es la concentración inicial del contaminante

Cf: es la concentración final del contaminante.

Esta fórmula se aplicó para cada etapa de tratamiento para determinar su eficiencia; con la misma fórmula se determinó la eficiencia del proceso solo con los resultados de DQO y SST en el influente contra los resultados obtenidos del efluente.

Cuadro 11. Parámetros a evaluar y métodos utilizados

| Parámetros evaluados | Método |
|---|--|
| pH (unidades) | NMX-AA-008-SCFI-2000 |
| Conductividad eléctrica (C.E mS cm ⁻¹) | Conductivímetro |
| Sólidos sedimentables (SS ml l ⁻¹) | NMX AA 004 SCFI 2000 Volumétrico. |
| Sólidos totales (ST mg l ⁻¹) | Gravimétrico |
| Sólidos suspendidos totales (SST mg l ⁻¹) | NMX AA 034 SCFI 2001. Método Gravimétrico. |
| Demanda Química de Oxígeno (DQO mg l ⁻¹) | NMX-AA-030-SCFI-2001; método de titulación |
| Metales pesados: (Cadmio, Cobre, Cromo, Níquel, Plomo y Zinc mg l ⁻¹) | Espectrofotometría de Absorción atómica. |
| Cationes (meq l ⁻¹) | Espectrofotometría de Absorción atómica. |
| Aniones (meq l ⁻¹) | Método Volumétrico: titulación |

4.2.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

De los resultados obtenidos del análisis de agua, se obtuvieron los parámetros estadísticos descriptivos para cada indicador (media aritmética, desviación estándar, varianza y coeficiente de variación). Para determinar si existen diferencias significativas entre las etapas de tratamiento, se realizó el análisis de varianza (ANVA) mediante un diseño completamente al azar (DCA) para ocho tratamientos con diferente número de repeticiones por tratamiento, con el paquete de diseños experimentales versión 2.5 de la facultad de agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León (1994).

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. DISTRIBUCIÓN DE CONTAMINANTES BÁSICOS EN LA PTAR

Los resultados del análisis estadístico de los parámetros pH, C.E SS, SST, ST y DQO se muestran en el cuadro 12.

En este cuadro, se observa que el pH se encuentra entre valores de 6.8-7.4. A diferencia del punto 1, los puntos 3 y 4 muestran un pH ligeramente ácido, este comportamiento es debido a las actividades en laboratorios que generan las descargas de agua cruda las cuales son ligeramente ácidas. Sin embargo, en el efluente (Pto. 8) el pH es ligeramente alcalino debido a una mayor concentración de CO₂, al respecto el IMTA (1994) menciona que como resultado del proceso fotosintético en las lagunas de oxidación, existe una variación en la concentración de oxígeno disuelto, lo que influye en la actividad de las algas, donde los iones carbonato y bicarbonato reaccionan para proveer más dióxido de carbono a las algas produciendo una variación en el pH, lo que explica la alcalinidad del efluente de la PTAR. Los resultados obtenidos del análisis de varianza (ANVA) indican que para el pH existe diferencia significativa entre las etapas de tratamiento con un 95% de seguridad; en este caso, las etapas de tratamiento que muestran valores más cercanos a la neutralidad serán consideradas como las mejores, en este caso el punto 6 se considera la mejor etapa de tratamiento puesto que el valor de pH es de 7.

La conductividad eléctrica (C.E) oscila entre 2,200 y 2,400 $\mu\text{S cm}^{-1}$ presentándose los valores más bajos en el Punto 1, estos se incrementan desde el Punto 2 hasta el Punto 5, de 2,280 a 2,398.57 $\mu\text{S cm}^{-1}$ respectivamente, lo que indica que hay presencia de descargas con compuestos iónicos, la C.E disminuye en los puntos 6 y 8, el ANVA sugiere que no existe diferencia significativa entre las etapas de tratamiento, sin embargo los resultados encontrados muestran índices de salinidad altos ya que el agua se considera altamente salina cuando presenta una C.E mayor a 2,250 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (Alcantar, *et al*, 1992) estos resultados coinciden con los que encuentran Rodríguez, *et al*, (2009) para efluentes de plantas de tratamiento.

Los sólidos sedimentables (SS) se caracterizan por su deposición por acción de la gravedad en el fondo de los tanques de sedimentación y de etapas subsecuentes. En el presente estudio se muestra un incremento de SS en los puntos 3 y 4 respecto de los demás puntos (1, 2, 5, 6, 7, 8) donde los valores se mantienen inferiores a 0.5 ml l^{-1} . Según los resultados del ANVA existen diferencias altamente significativas entre las etapas de tratamiento con un 95% de seguridad, la comparación de medias indica que las etapas 3 y 4 no difieren estadísticamente, sin embargo no son las mejores, en este caso la mejor etapa de tratamiento es el punto 8 ya que es la que presenta el valor menor de SS. La variación que se observa en los puntos 3 y 4 se debe a que existe una descarga de agua cruda al sistema de tratamiento en la segunda etapa y estos valores pueden afectar la eficiencia del tratamiento.

Los sólidos suspendidos totales (SST), incluyen toda materia que se encuentra en suspensión en las aguas residuales, Arce, *et al*, (2010) mencionan que entre los efectos más notables que se tienen por una alta concentración de SST está la interferencia en la penetración de la luz solar (turbiedad) y el azolve de los cuerpos de agua. Dado que en el comportamiento de los SST, se observa que hay disminución del Pto 1 al Pto 2; incrementándose en los puntos 3 y 4, esta variación indica la descarga de agua cruda en la segunda etapa de tratamiento. Los valores de SST disminuyen en los puntos 5, 6 y 7. Sin embargo la concentración incrementa en el punto 8, esto se debe a la actividad y presencia de algas en la laguna de oxidación, lo cual coincide con lo que encuentra el IMTA (1994) en su estudio. Los resultados del ANVA muestran que existen diferencias significativas entre las etapas de tratamiento y en la comparación de medias se observa que los puntos 3 y 4 son estadísticamente iguales, lo cual se debe, al igual que en el caso anterior, por la entrada de agua cruda en la segunda etapa de tratamiento, por lo tanto, la mejor etapa de tratamiento, en este caso es el punto 7 con el menor valor de SST.

Cuadro 12. Resultados del análisis estadístico de los contaminantes básicos en la PTAR.

| | pH | CE | SS | SST | ST | DQO |
|-------|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| | unidades | $\mu\text{S cm}^{-1}$ | ml l^{-1} | mg l^{-1} | mg l^{-1} | mg l^{-1} |
| Pto 1 | 7.4 A (± 0.19) | 2218.57 A (± 490.49) | 0.2667 B (± 0.19) | 62.50 BC (± 44.22) | 1189.28 BC (± 341.14) | 48.67 B (± 44.33) |
| Pto 2 | 7.2 AB (± 0.25) | 2280.00 A (± 187.23) | 0.2000 B (± 0.10) | 41.66 C (± 28.40) | 1067.50 CD (± 168.03) | 29.67 B (± 27.12) |
| Pto 3 | 6.8 C (± 0.35) | 2332.50 A (± 116.71) | 3.4500 A (± 2.11) | 112.87 A (± 48.69) | 1428.00 A (± 265.38) | 78.65 A (± 28.53) |
| Pto 4 | 6.8 C (± 0.24) | 2344.28 A (± 136.48) | 2.5714 A (± 1.74) | 112.71 AB (± 87.88) | 1310.28 AB (± 212.41) | 50.64 AB (± 23.38) |
| Pto 5 | 6.8 C (± 0.23) | 2398.57 A (± 181.69) | 0.1571 B (± 0.11) | 42.85 C (± 34.86) | 962.28 CD (± 143.51) | 27.93 B (± 13.04) |
| Pto 6 | 7.0 BC (± 0.36) | 2337.14 A (± 184.81) | 0.1571 B (± 0.07) | 35.00 C (± 25.49) | 1124.57 BCD (± 192.24) | 29.54 B (± 13.66) |
| Pto 7 | 7.1 ABC (± 0.32) | 2395.00 A (± 213.15) | 0.2000 B (± 0.14) | 20.00 C (± 0.00) | 865.00 D (± 76.82) | 26.26 B (± 17.41) |
| Pto 8 | 7.4 A (± 0.34) | 2340.00 A (± 174.68) | 0.1250 B (± 0.04) | 38.57 C (± 16.65) | 1137.00 BCD (± 254.37) | 33.76 B (± 26.06) |
| CV % | 4.17 | 10.1 | 108.17 | 72.51 | 19.68 | 63.82 |

Nota: las letras iguales indican qué etapas de tratamiento son estadísticamente iguales

Los sólidos totales (ST) incluyen a los sólidos sedimentables y sólidos en suspensión, en este estudio, se aprecia el comportamiento de los sólidos ST observándose su disminución en los puntos 1 y 2, el valor incrementa en el punto 3 por la entrada de agua cruda en este punto específicamente.

En los puntos 4 y 5 disminuye la concentración de ST y se incrementa nuevamente en el punto 6, este comportamiento se explica debido a la concentración de ST y arrastre de partículas que lleva el agua en dicho punto por la obturación en el tubo que conduce el agua del tanque de sedimentación a los tanques de amortiguamiento.

La concentración de ST disminuye en el punto 7 y aumenta en el punto 8 por la misma razón de lo ya mencionado para SST. El ANVA en este caso sugiere una diferencia entre las etapas de tratamiento; la comparación de medias nos muestra (al igual que en el caso anterior) que los puntos 3 y 4 son estadísticamente iguales, lo mismo para las etapas 1, 2, 5, 6, 7 y 8 no hay diferencia entre estas, sin embargo la mejor etapa de tratamiento es el punto 7 considerando que tiene la menor concentración de ST.

La demanda química de oxígeno (DQO) es un término de referencia que se utiliza para expresar la cantidad de materia oxidable presente en el agua, cualquiera que sea su origen orgánico o mineral. Bajo las condiciones en que se determina la DQO se oxida toda la materia orgánica presente, incluso aquella que los microorganismos no son capaces de degradar (Arce, *et al*, 2010). El comportamiento de la DQO se presenta en el cuadro 12, en este se observa que la DQO disminuye del punto 1 al punto 2 lo cual indica la remoción de materia orgánica e inorgánica. Los valores de DQO se incrementan en el punto 3 por un flujo de agua cruda, disminuyen en los puntos 4, 5, 6 y 7 lo cual se debe a la remoción de la materia orgánica e inorgánica en estas etapas de tratamiento. La DQO aumenta ligeramente en el punto 8 y se debe a la presencia de algas en la laguna de oxidación. En el ANVA se observó la diferencia entre las etapas de tratamiento y en la comparación de medias los resultados indican que los puntos 3 y 4 son iguales estadísticamente debido al flujo de agua cruda en la segunda etapa de tratamiento. Sin embargo, en dicha comparación, la DQO en el punto 4 no difiere estadísticamente de los demás puntos, este comportamiento es similar para los sólidos, donde se puede observar que en los valores más altos de sólidos se tiene también un valor alto de DQO, esto es normal si se considera la concentración de contaminantes en el punto 3 que es donde se recibe agua cruda.

Los valores disminuyen en los puntos 4, 5, 6 y 7 dado que hay remoción de contaminantes (DQO y sólidos) teniendo en cuenta que el tratamiento de aguas en la PTAR se lleva a cabo mediante diferentes etapas, por lo tanto, se puede deducir que las etapas 3 y 4 son estadísticamente iguales, pero por la concentración de la DQO no son las mejores, a su vez, la etapa 4 es igual que la 1, 2, 5, 6, 7 y 8.

Considerando lo anterior, para el presente estudio se busca que en la calidad de agua se tenga la menor concentración de contaminantes, así que el efluente que presente el menor valor de DQO será más recomendable, en este caso se tiene en el efluente del punto 7 la concentración más baja de DQO y se asume que es la mejor etapa de tratamiento.

5.2. DISTRIBUCIÓN DE METALES PESADOS EN LA PTAR

Los resultados del análisis estadístico de metales pesados en la planta de tratamiento, se muestran en el cuadro 13, donde se puede observar que no se detecta presencia de Cadmio y Níquel, esto indica que no hay lixiviados con este tipo de elementos, resultados similares son reportados por Neri, *et al*, (2007). Diferente a lo que menciona Lenntech (2011) quien encontró Cd y Ni en lixiviados de baterías usadas y en aguas residuales de la fabricación de acero.

Elementos como el Cromo, Plomo y Zinc, son los de mayor presencia en las aguas residuales, el Cromo se presenta por las actividades de laboratorio que utilizan reactivos como Dicromato de Potasio en la determinación de materia orgánica y demanda química de oxígeno; con respecto a metales pesados Ramírez (1999) en su investigación menciona que el pH es un factor determinante para la disponibilidad de metales, por lo que se asume en este estudio que los metales presentes (Cromo, Plomo y Zinc) en el efluente (P8), son precipitados debido a la alcalinidad que presenta el agua.

Cuadro 13. Resultados del análisis estadístico de los metales pesados en la PTAR.

| mg l ⁻¹ | Cadmio | Cobre | Cromo | Níquel | Plomo | Zinc |
|--------------------|--------|-------|------------------|--------|-----------------|-----------------|
| Pto 1 | ND | 0.10 | 0.04 (±0.00) | ND | 1.03 (±1.61) | 0.18 (±0.13) |
| Pto 2 | ND | ND | 0.04 (±0.009) | ND | 0.10 (±0.00) | 0.10 (±0.00) |
| Pto 3 | ND | ND | 0.05 (±0.01) | ND | 0.10 (±0.00) | 0.10 (±0.00) |
| Pto 4 | ND | ND | 0.04 (±0.03) | ND | 0.10 (±0.00) | 0.16 (±0.13) |
| Pto 5 | ND | ND | 0.03 (±0.01) | ND | 0.10 (±0.00) | 0.10 (±0.00) |
| Pto 6 | ND | 0.10 | 0.03 (±0.02) | ND | 0.13 (±0.05) | 0.10 (±0.00) |
| Pto 7 | ND | ND | 0.04 (±0.01) | ND | 0.40 (±0.42) | 0.10 (±0.00) |
| Pto 8 | ND | ND | 0.06 (±0.02) | ND | 0.10 (±0.00) | 0.10 (±0.00) |
| CV% | 0.00 | 0.00 | 125.25 | 0.00 | 233.74 | 61.91 |

ND: no detectable

El análisis estadístico indica que no existen diferencias significativas entre las etapas de tratamiento con un nivel de significancia de 0.05 para los metales pesados analizados.

Siebe (1994) menciona en su trabajo que la importancia y estudio de estos metales se debe a que son bioacumulables y no pueden ser biodegradados a la vez que pueden ser retenidos y acumulados en la capa arable del suelo que es regado con agua residual, en su estudio encontró que los metales adicionados al suelo a través del riego con este tipo de aguas, se acumularon en el horizonte Ap de todos los suelos analizados, en los primeros 30 cm. De profundidad.

5.3. DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD AGRONÓMICA DEL EFLUENTE DE LA PTAR

Los resultados que se obtuvieron de acuerdo a los parámetros analizados para la determinación de la calidad del agua para su uso en riego agrícola, se muestran en el cuadro 14 y corresponden al punto 8. Estos resultados indican que la clasificación del agua es altamente salina, la cual se clasifica como C4 según la metodología del laboratorio de salinidad del USDA, esta es similar a la que encuentran Rodríguez, *et al*, (2009) para algunos efluentes de plantas de tratamiento.

Para tener una estimación más real del peligro que representan las sales solubles en el agua de riego, se realizó la determinación de la salinidad efectiva (SE) mediante el método de Palacios y Aceves (1970) esta muestra un valor entre 3 y 15 meq l⁻¹, por lo tanto, el agua se clasifica como condicionada para irrigación, los resultados obtenidos coinciden con los que reportan Rodríguez, *et al*, (2009) dado que en su estudio realizado sobre la calidad agronómica de aguas residuales tratadas en la Ciudad de San Luis Potosí, encontraron valores similares, por lo cual, el agua se clasifica como condicionada para riego.

Como indicadores de peligro por sodio, se determinó la relación de adsorción de sodio (RAS) y el índice de carbonato de sodio residual (CSR), los resultados obtenidos del RAS sugieren que el agua es baja en sodio ya que la clasificación según la metodología del laboratorio de salinidad del USDA, clasifica como aguas bajas en sodio (S1) aquellas cuyo valor sea inferior a 10 meq l⁻¹ estos resultados son similares a los que obtienen Rodríguez, *et al*, (2009), en su investigación, de acuerdo a los valores de RAS algunos efluentes de plantas de tratamiento son clasificados como S1.

De acuerdo a los valores obtenidos para el índice de CSR, el agua se clasifica como condicionada, lo que indica que no se tiene riesgo potencial de alcanzar niveles considerables de acumulación de sodio por la aplicación de estas aguas en riego agrícola.

Cuadro 14. Calidad agronómica del efluente de la PTAR

| Parámetros | Resultado | Criterio | Clasificación |
|-------------------------|-----------|------------------|---------------|
| C.E mS cm ⁻¹ | 2.34 | Altamente salina | C 4 |
| SE meq l ⁻¹ | 12.45 | Condicionada | |
| RAS meq l ⁻¹ | 4.89 | Baja en sodio | S 1 |
| CSR meq l ⁻¹ | 1.95 | Condicionada | |

Estos resultados concuerdan con los que reporta Rodríguez, *et al*, (2009), quienes en su estudio encontraron que el peligro por sodio en las propiedades del suelo y la producción agrícola, no muestra un serio problema si se toman en cuenta las opciones técnicas preventivas, por su parte, Castellanos, *et al*, (2000) en su trabajo indican que el CSR no es un parámetro de grave riesgo, ya que el riesgo se reduce eliminando los carbonatos y bicarbonatos con el uso de ácidos, estos sustituyen los CO₃⁼ y HCO₃⁻ por el ion acompañante del ácido que se utilice, tal como sulfato, nitrato o fosfato si se utiliza ácido sulfúrico, ácido nítrico o ácido fosfórico respectivamente. La eliminación de carbonatos y bicarbonatos es indispensable en sistemas de fertirrigación debido a que producen taponamiento en los emisores.

5.4. DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA PTAR

En el cuadro 15. Se observa la eficiencia de la planta de tratamiento, en cuanto a remoción de materia orgánica e inorgánica expresada como DQO, tomando en cuenta este parámetro se tiene una eficiencia de remoción de 30.62 %, en el caso de SST una eficiencia de 38.28 %, estos resultados indican que la eficiencia global de la PTAR es baja dado que las lagunas de estabilización tienen eficiencias de remoción de materia orgánica e inorgánica superiores a 68 % de acuerdo a los estudios realizados por el IMTA (1994) para el tratamiento de aguas mediante lagunas de estabilización, respecto a los SST los efluentes lagunares muestran una variación debido a la presencia de algas. Lo cual coincide con los resultados que encuentra el IMTA (1994) donde la variación en los SST en lagunas de estabilización se debe principalmente a las algas.

La eficiencia en remoción de sólidos sedimentables (SS) es buena (53.13 %) dado que los SS se depositan en el fondo por acción de la gravedad conforme avanza el proceso de tratamiento.

Los resultados que muestran que la eficiencia global del sistema de tratamiento en cuanto a remoción de la DQO y SST es baja, se explican debido a la variación que existe a través de las etapas de tratamiento, en este caso, dicha variación se debe a que existe una descarga de agua cruda en la segunda etapa de tratamiento y estos valores afectan la eficiencia de la PTAR.

Cuadro 15. Eficiencia del tratamiento de la PTAR.

| Parámetros | Influyente | Efluyente | Eficiencia |
|------------------------|------------|-----------|------------|
| DQO mg l ⁻¹ | 48.67 | 33.76 | 30.62 % |
| SST mg l ⁻¹ | 62.50 | 38.57 | 38.28 % |
| SS mg l ⁻¹ | 0.266 | 0.125 | 53.13 % |

Para verificar la remoción de DQO, SST y SS durante el proceso, se determina la eficiencia para cada etapa del tratamiento debido a que los efluentes lagunares muestran variaciones en la calidad del agua por la presencia de algas (IMTA, 1994).

En el cuadro 16 se indica la eficiencia por cada etapa de tratamiento, los resultados muestran que la remoción de contaminantes es mayor en los pantanos artificiales, estos resultados son similares a los que encuentran Gutiérrez y Peña (2011), en su investigación, para el tratamiento de aguas residuales en un humedal artificial reportan eficiencias de remoción de DQO que alcanzan porcentajes de 53.6 % hasta 69.8 %.

La eficiencia en la remoción de la DQO en el tanque Imhoff es baja porque está diseñado para la precipitación de sólidos sedimentables y así obtener un efluente clarificado. En la laguna de oxidación se muestran eficiencias de 28 % lo que indica que hay presencia de materia orgánica e inorgánica susceptible de ser degradada.

Cuadro 16. Eficiencia por etapa de tratamiento.

| | Tanque de sedimentación | Pantano artificial 1 | Pantano artificial 2 | Laguna de oxidación |
|------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| DQO mg l ⁻¹ | 39.03 % | 64.48 % | 41.66 % | 28.55 % |
| SST mg l ⁻¹ | 33.33 % | 62.03 % | 68.94 % | -92.85 % |
| SS mg l ⁻¹ | 17.64 % | 95.44 % | 93.88 % | 37.50% |

Respecto a los sólidos suspendidos totales (SST) se tiene el mayor porcentaje de remoción en los pantanos artificiales, nótese una eficiencia negativa (-92.85 %) en la laguna de oxidación, en este sentido, la eficiencia se determina comparando los valores de de SST en el punto 7 contra los del punto 8. La concentración de SST es menor en el punto 7 (efluente del pantano artificial plantado con lirio acuático 20 mg l⁻¹) y puesto que se compara con el punto 8, en este la concentración de SST es mayor debido a la presencia de algas (laguna de oxidación 38.57 mg l⁻¹) por lo tanto, es de esperarse que estos valores reporten una eficiencia negativa.

Los sólidos sedimentables (SS) han sido depositados en el fondo del tanque de sedimentación, este muestra una eficiencia de 17 % lo que indica que no recibe agua cruda con altas concentraciones de SS (influyente 0.26 ml l^{-1}).

Los pantanos artificiales 1 y 2 tienen eficiencias de 95 % y 93 % respectivamente, considerando que dichos pantanos reciben agua previamente decantada; sin embargo, esta agua que proviene del tanque Imhoff (efluente clarificado) se mezcla con aguas crudas y se conducen hacia los tanques de igualación de gasto (punto 3), estas son las que reciben los pantanos artificiales lo cual explica que la eficiencia del tanque de sedimentación sea menor que la eficiencia en los pantanos artificiales.

5.5. CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES BÁSICOS Y METALES PESADOS

EN EL EFLUENTE DE LA PTAR

Según los resultados obtenidos de los parámetros evaluados en el efluente, que se muestran en el cuadro 17, se observa que el pH en el mes de enero tiene un comportamiento ligeramente ácido, el promedio mensual para el pH en los meses de febrero a junio es alcalino alcanzando valores entre 7.3 y 7.8 unidades lo cual indica que en general las descargas del efluente son de pH alcalino.

Para el caso de la conductividad eléctrica (C.E), muestra valores entre 2,000 y $2,480 \mu\text{S cm}^{-1}$ estos valores indican altos índices de salinidad, los cuales coinciden con los que obtienen Rodríguez, *et al*, (2009) para efluentes de agua tratada en la Cd. De San Luis Potosí.

Respecto al comportamiento de los sólidos sedimentables (SS) se observa una concentración inferior a 0.2 ml l^{-1} ; en tanto que los sólidos suspendidos totales (SST) varían con el tiempo concentrándose mayormente en los meses de febrero y junio, por otro lado, los sólidos totales (ST) se tienen en una concentración entre 824 y $1,448 \text{ mg l}^{-1}$ teniendo los valores inferiores en los meses de febrero, marzo y abril.

En la demanda química de oxígeno (DQO) los resultados muestran que sus valores son bajos en los meses de febrero, marzo y abril, sin embargo aumenta para los meses de mayo y junio de 45 a 60 mg l⁻¹ respectivamente, esto se debe a la actividad de las algas en la laguna de oxidación por el proceso fotosintético.

Cuadro 17. Concentración de contaminantes básicos y metales pesados en el efluente de la PTAR.

| Promedio mensual reportado en mg l ⁻¹ excepto cuando se indique. | | | | | | | |
|---|-------|---------|-------|-------|-------|-------|---------|
| | Enero | Febrero | Marzo | Abril | Mayo | Junio | NOM-001 |
| pH (unidades) | 6.7 | 7.6 | 7.3 | 7.6 | 7.6 | 7.8 | NA |
| C.E μS cm ⁻¹ | 2000 | 2400 | 2480 | 2450 | 2200 | 2260 | NA |
| SS ml l ⁻¹ | 0.2 | 0.2 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 1 |
| S.S.T. | 22 | 55 | 37.5 | 29 | ND | 60 | 75 |
| S.T. | 1360 | 824 | 950 | 1112 | 1448 | 1340 | NA |
| DQO | | 18.18 | 33.99 | 10.28 | 45.76 | 83.89 | NA |
| Cadmio | ND | ND | ND | ND | ND | ND | 0.1 |
| Cobre | ND | ND | ND | ND | ND | ND | 4 |
| Cromo | 0.07 | 0.1 | 0.045 | 0.1 | ND | ND | 0.5 |
| Níquel | ND | ND | ND | ND | ND | ND | 2 |
| Plomo | 0.1 | 0.1 | 0.1 | ND | ND | ND | 0.2 |
| Zinc | ND | ND | ND | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 10 |

De acuerdo a la concentración de metales pesados no se detecta la presencia de Cadmio, Cobre y Níquel, sin embargo se tiene presente el Cromo en concentraciones inferiores a 0.1 mg l⁻¹ de enero hasta abril, y sin detectarse en los meses de mayo y junio, por lo que se deduce que se debe a las actividades en los laboratorios que utilizan como reactivo el Dicromato de Potasio. Por otro lado se detecta la presencia de Plomo en concentraciones de 0.1 mg l⁻¹ de enero a marzo, al igual que el Zinc en los meses de abril a junio. Estos Resultados coinciden con los que reporta Rascón (2006), en su trabajo encontró niveles muy bajos de Cromo, lo cual atribuye a que se va depositando este elemento en las diferentes etapas de tratamiento, en los lodos y en los tejidos de las plantas de carrizo (*Gynerium sagita*) y lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) que se encuentran en los humedales por donde fluye el agua.

Sin embargo, la presencia de estos metales en el agua no representa peligro ya que bajan su disponibilidad en presencia de pH alcalino. Resultados similares fueron encontrados por Ramírez (1999) quien indica que teniendo un pH alcalino en el agua, los metales no están disponibles y puede bajar su toxicidad por precipitación como carbonatos e hidróxidos.

Según los resultados obtenidos en cuanto a la concentración de contaminantes básicos y metales pesados (cuadro 17), haciendo el comparativo de acuerdo a los parámetros establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996, se encuentran en una concentración promedio mensual inferior a la establecida.

La variación que se observa en los parámetros evaluados se explica debido a que en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) se tiene un flujo de agua cruda en la segunda etapa de tratamiento, además, se tienen descargas intermitentes con diferentes niveles de concentración de contaminantes; dado que el flujo de agua en la PTAR está en función de la población, en la UAAAN, esta varía estacionalmente según los periodos vacacionales, por lo tanto se acepta la variación espacial y temporal en la calidad del agua.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos bajo las condiciones de la presente investigación, se concluye que la calidad agronómica del efluente es buena en cuanto a indicadores de pH y sodio, con base a estos indicadores, el agua se puede utilizar en riego con muy poco riesgo de que el suelo eleve su porcentaje de sodio intercambiable.

En cuanto a sales, su uso es limitado por el riesgo de salinidad, ya que el agua es clasificada como condicionada para riego agrícola, sin embargo el agua podría aplicarse en riego utilizando técnicas a nivel agronómico como lavado de suelos, aplicación en exceso de agua para lograr un buen lavado y reducir el riesgo de salinidad en suelos, además de seleccionar cultivos altamente tolerantes a salinidad.

Por otra parte, la calidad del agua se determina en el efluente, en este sentido, se propone realizar estudios de determinación en el punto de uso y producto final que ha tenido contacto con el agua residual tratada.

Con respecto a la concentración y distribución de contaminantes básicos y metales pesados en la PTAR, el efluente cumple con los parámetros establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996, por lo cual, es recomendable para su descarga en cuerpos receptores tipo B para reincorporar el efluente al ciclo hidrológico en mejores condiciones que permiten mitigar la contaminación de aguas superficiales.

A partir de los resultados que se muestran en la presente investigación, se acepta la hipótesis planteada sobre la disminución en la concentración de metales pesados y la buena calidad agronómica del efluente, por lo tanto, se puede recomendar la aplicación del agua tratada en la agricultura, principalmente para forrajes, siempre y cuando se tengan las medidas adecuadas en su manejo, sin embargo no se recomienda ampliamente para riego de vegetales que se consuman crudos puesto que no se realizó ningún tipo de análisis microbiológico.

La eficiencia del tratamiento es baja debido a la entrada de agua cruda al sistema en la segunda etapa de tratamiento y a las malas condiciones en que se encuentra la planta de tratamiento, por lo tanto, se sugiere que el agua cruda que ingresa a la planta reciba tratamiento en el tanque de sedimentación para eliminación de sólidos y de esta manera evitar que el agua previamente decantada se mezcle con aguas crudas. Es recomendable además la operación y mantenimiento de la PTAR mediante acciones de tipo correctivas para el buen funcionamiento del sistema.

VII. LITERATURA CITADA

Alcantar, G. G. Etchevers, B. J. Aguilar, S. A. 1992. Los análisis físicos y químicos, su aplicación en la agronomía. 1ra edición, COLPOS, Montecillo, Edo de México. pp. 62-76.

Arce, V. A. Calderón, M. C. Tomasini, O. A. 2010. Fundamentos técnicos para el muestreo y análisis de aguas residuales, IMTA-CNA, México.

Castellanos, J. Z. Aguilar, S. A. Uvalle, B. J. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas, La calidad del agua para uso agrícola. 2^{da} edición. Ed. INCAPA. pp. 258-166.

Comisión Nacional del Agua. 2000. Guía para el control de descargas a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. 1ra. Edición. CNA. pp. A4 8-17.

Comisión Nacional del Agua. 2005. Estadísticas del agua en México. SEMARNAT. México.

Comisión Nacional del Agua. 2006. Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento. SEMARNAT. México.

Comisión Nacional del Agua. 2007^a. Programa Nacional Hídrico 2007-2012. SEMARNAT. México.

Comisión Nacional del Agua. 2007^b. Estadísticas del agua en México, edición 2007. SEMARNAT. México.

Comisión Nacional del Agua. 2009^a. Ley de aguas nacionales y su reglamento. 2da reimpresión. SEMARNAT. México.

Comisión Nacional del Agua. 2009^b. Ley federal de derechos. Disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales. SEMARNAT. México.

Comisión Nacional del Agua. 2011. Agenda del agua 2030. SEMARNAT. México. pp. 45.

Siebe, C. 1994. Acumulación y disponibilidad de metales pesados en suelos regados con aguas residuales en el distrito de riego 03, Tula, Hidalgo, México. Revista Internacional de contaminación ambiental. Volumen 10, numero 1, pp. 15-21.

Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos. 2007. Presidencia de la República. Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012. México.

Gutiérrez, H. M. Peña, V. R. 2011. Eliminación de nitrógeno en un humedal artificial construido subsuperficial plantado con *Heliconia Psittacorum*. Tecnología y ciencias del agua. Antes ingeniería hidráulica en México. Vol. II, núm. 3, julio-septiembre, pp. 49-60.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 1994. Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento. 1ra edición. IMTA, México. pp. 13-33.

Jiménez, C. B. E. 2001. Contaminación del agua. La contaminación ambiental en México. Ed. Limusa, México, pp. 33-316.

Nalco Chemical Company. 1989. Manual del agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones, Tomo 1, Ed. Mc Graw Hill.

Neri, R. E. Tornero, C. M. Bonilla, F. N. 2007. Evaluación de la concentración de metales pesados en el agua residual del canal chilhuacán, Atlixco, Puebla. Colegio de posgraduados, San Pedro Cholula, Puebla. México.

Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

Norma Mexicana NMX-AA-003-SCFI-1980. Aguas residuales, muestreo.

Norma Mexicana NMX-AA-008-SCFI-2000. Análisis de agua, determinación del pH. Método de prueba.

Norma Mexicana NMX-AA-004-SCFI-2000. Análisis de agua, determinación de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba.

Norma Mexicana NMX-AA-030-SCFI-2001. Análisis de agua, determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba.

Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001. Aguas, determinación de sólidos en agua. Método gravimétrico.

Palacios, V. O. Aceves, N. E. 1970. Instructivo para el muestreo, registro de datos e interpretación de la calidad del agua para riego agrícola. pp. 49.

Rascón, A. E. 2006. Evolución de propiedades físicas y químicas de suelo y absorción de metales pesados en producción agrícola con aguas residuales. Tesis. Doctorado. UAAAN. México.

Ramírez, M. W. 1999. Diseño de un modelo de saneamiento de suelos contaminados con metales pesados derivados de la explotación minera. Tesis profesional, maestría en ingeniería de proyectos. Universidad de Guadalajara, México.

Rodríguez, O. J. C. García, H. J. L. Valdez, C. R. D. Lara, M. J. L. Rodríguez, F. H. Lored, O. C. 2009. Calidad agronómica de efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales. Tropical and subtropical agrosystems, Vol. 10. Núm. 3, septiembre-diciembre. pp. 355-367.

Saldaña, F. M. Díaz, P. E. Gutiérrez, H. A. 2011. Diagnostico de la calidad del agua en un sistema de embalses en cascada, cuenca del rio San Juan, Querétaro, México. Tecnología y ciencias del agua. Antes ingeniería hidráulica en México. Vol. II, núm. 3, julio-septiembre, pp. 115-125.

Consulta electrónica

INEGI, 2009. Estadísticas a propósito del día mundial del agua, datos nacionales. <http://www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/espanol/prensa/default.asp?c=269&e=>

Lenntech, 2011. Metales pesados en el agua.
Disponible en: <http://www.lenntech.es/metales-pesados.htm>

Frers, C. 2007. El uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales. Disponible en <http://www.ecoportal.net>

ANEXO. Análisis de varianza de los parámetros evaluados.

| ANVA pH | | | | | | Comparación de medias 0.05 | | |
|--|------|--------|--------|--------|---------|----------------------------|-------|-----|
| Fuente de variación | Gl | SC | CM | Fc** | Ft 0.05 | ET | Media | |
| Etapas de tratamiento | 7 | 3.2263 | 0.4609 | 5.2498 | 2.249 | 8 | 7.43 | A |
| Error | 48 | 4.2141 | 0.0877 | | | 1 | 7.42 | A |
| Total | 55 | 7.4404 | | | | 2 | 7.25 | AB |
| CV% | 4.17 | | | | | 7 | 7.17 | ABC |
| ** existe diferencia entre etapas de tratamiento | | | | | | 6 | 7.04 | BC |
| | | | | | | 5 | 6.88 | C |
| | | | | | | 3 | 6.86 | C |
| | | | | | | 4 | 6.81 | C |

| ANVA C.E | | | | | | Tabla de medias | | |
|--|------|---------|-------------|-------------|---------|-----------------|-----|-------|
| Fuente de variación | Gl | SC | CM | Fc* | Ft 0.05 | ET | Rep | Media |
| Etapas de tratamiento | 7 | 158720 | 22674.28571 | 0.410875215 | 2.249 | 1 | 7 | 2218 |
| Error | 48 | 2648896 | 55185.33333 | | | 2 | 8 | 2280 |
| Total | 55 | 2807616 | | | | 3 | 8 | 2332 |
| CV% | 10.1 | | | | | 4 | 7 | 2344 |
| * NO existe diferencia entre etapas de tratamiento | | | | | | 5 | 7 | 2398 |
| | | | | | | 6 | 7 | 2337 |
| | | | | | | 7 | 4 | 2395 |
| | | | | | | 8 | 8 | 2340 |

| ANVA SS | | | | | | Comparación de medias 0.05 | | |
|--|--------|---------|---------|---------|---------|----------------------------|-------|---|
| Fuente de variación | Gl | SC | CM | Fc** | Ft 0.05 | ET | Media | |
| Etapas de tratamiento | 7 | 92.8977 | 13.2711 | 12.7096 | 2.249 | 3 | 3.45 | A |
| Error | 48 | 50.1205 | 1.0441 | | | 4 | 2.57 | A |
| Total | 55 | 143.01 | | | | 1 | 0.2 | B |
| CV% | 108.17 | | | | | 2 | 0.2 | B |
| ** existe diferencia entre etapas de tratamiento | | | | | | 7 | 0.2 | B |
| | | | | | | 5 | 0.15 | B |
| | | | | | | 6 | 0.15 | B |
| | | | | | | 8 | 0.12 | B |

| ANVA SST | | | | | | Comparación de medias 0.05 | | |
|--|-------|--------|----------|--------|---------|----------------------------|--------|----|
| Fuente de variación | GI | SC | CM | Fc** | Ft 0.05 | ET | Media | |
| Etapas de tratamiento | 7 | 52417 | 7488.149 | 3.3182 | 2.249 | 3 | 112.87 | A |
| Error | 40 | 90265 | 2256.642 | | | 4 | 112.71 | AB |
| Total | 47 | 142682 | | | | 1 | 62.5 | BC |
| CV% | 72.51 | | | | | 5 | 42.85 | C |
| ** existe diferencia entre etapas de tratamiento | | | | | | 2 | 41.66 | C |
| | | | | | | 8 | 38.57 | C |
| | | | | | | 6 | 35 | C |
| | | | | | | 7 | 20 | C |

| ANVA ST | | | | | | Comparación de medias 0.05 | | |
|--|-------|--------|------------|--------|---------|----------------------------|-------|-----|
| Fuente de variación | GI | SC | CM | Fc** | Ft 0.05 | ET | Media | |
| Etapas de tratamiento | 7 | 143989 | 205699.428 | 3.9883 | 2.249 | 3 | 1428 | A |
| Error | 48 | 247560 | 51575 | | | 4 | 1310 | AB |
| Total | 55 | 391549 | | | | 1 | 1189 | BC |
| CV% | 19.68 | | | | | 8 | 1137 | BCD |
| ** existe diferencia entre etapas de tratamiento | | | | | | 6 | 1124 | BCD |
| | | | | | | 2 | 1067 | CD |
| | | | | | | 5 | 962 | CD |
| | | | | | | 7 | 865 | D |

| ANVA DQO | | | | | | Comparación de medias 0.05 | | |
|--|-------|-----------|----------|--------|---------|----------------------------|-------|----|
| fuentes de variación | GI | SC | CM | Fc** | Ft 0.05 | ET | Media | |
| Etapas de tratamiento | 7 | 15222.382 | 2174.626 | 3.1064 | 2.249 | 3 | 78.65 | A |
| Error | 45 | 31501.609 | 700.0357 | | | 4 | 50.64 | AB |
| Total | 52 | 46723.992 | | | | 1 | 48.67 | B |
| CV% | 63.82 | | | | | 8 | 33.76 | B |
| ** existe diferencia entre etapas de tratamiento | | | | | | 2 | 29.67 | B |
| | | | | | | 6 | 29.54 | B |
| | | | | | | 5 | 27.93 | B |
| | | | | | | 7 | 26.26 | B |

| ANVA Cromo | | | | | | Tabla de medias 0.05 | | |
|--|--------|---------|---------|----------|---------|----------------------|-----|-------|
| fuelle de variación | GI | SC | CM | Fc* | Ft 0.05 | ET | Rep | Media |
| Etapas de tratamiento | 7 | 0.02939 | 0.00419 | 0.809753 | 2.249 | 1 | 3 | 0.04 |
| Error | 20 | 0.1037 | 0.00518 | | | 2 | 4 | 0.04 |
| Total | 27 | 0.1331 | | | | 3 | 4 | 0.05 |
| CV% | 125.25 | | | | | 4 | 4 | 0.04 |
| * NO existe diferencia entre etapas de tratamiento | | | | | | 5 | 3 | 0.03 |
| | | | | | | 6 | 3 | 0.03 |
| | | | | | | 7 | 2 | 0.04 |
| | | | | | | 8 | 5 | 0.06 |

| ANVA Plomo | | | | | | Tabla de medias 0.05 | | |
|--|--------|---------|---------|---------|---------|----------------------|-----|-------|
| Fuente de variación | GI | SC | CM | Fc* | Ft 0.05 | ET | Rep | Media |
| Etapas de tratamiento | 7 | 2.32551 | 0.33221 | 1.10466 | 2.249 | 1 | 3 | 1.0 |
| Error | 18 | 5.41333 | 0.30074 | | | 2 | 4 | 0.1 |
| Total | 25 | 7.73885 | | | | 3 | 4 | 0.1 |
| CV% | 233.74 | | | | | 4 | 3 | 0.1 |
| * NO existe diferencia entre etapas de tratamiento | | | | | | 5 | 3 | 0.1 |
| | | | | | | 6 | 3 | 0.1 |
| | | | | | | 7 | 2 | 0.4 |
| | | | | | | 8 | 4 | 0.1 |

| ANVA Zinc | | | | | | Tabla de medias 0.05 | | |
|--|-------|----------|----------|--------|---------|----------------------|-----|-------|
| Fuente de variación | GI | SC | CM | Fc* | Ft 0.05 | ET | Rep | Media |
| Etapas de tratamiento | 7 | 0.041889 | 0.005984 | 1.0451 | 2.249 | 1 | 6 | 0.18 |
| Error | 28 | 0.160333 | 0.005726 | | | 2 | 7 | 0.10 |
| Total | 35 | 0.202222 | | | | 3 | 5 | 0.10 |
| CV% | 61.91 | | | | | 4 | 5 | 0.16 |
| * NO existe diferencia entre etapas de tratamiento | | | | | | 5 | 3 | 0.10 |
| | | | | | | 6 | 4 | 0.10 |
| | | | | | | 7 | 3 | 0.10 |
| | | | | | | 8 | 3 | 0.10 |