



ANALISIS FISICO Y QUIMICO DEL AFLUENTE Y EFLUENTE DE LA  
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA  
INDUSTRIA PAPELERA: PROPAL-PLANTA II

ANGELA PATRICIA COVALEDA GAVILAN

UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES EXACTAS Y DE LA EDUCACION  
DEPARTAMENTO DE QUIMICA  
POPAYAN  
2005



ANALISIS FISICO Y QUIMICO DEL AFLUENTE Y EFLUENTE DE LA  
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA  
INDUSTRIA PAPELERA: PROPAL-PLANTA II

ANGELA PATRICIA COVALEDA GAVILAN

Trabajo de pasantía para optar al título de Químico

Director  
Ph.D FABIO A. CABEZAS F.

Asesor Propal  
LIDA AMPARO MOSQUERA

Asesor  
Mg. ISABEL BRAVO R.

UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES EXACTAS Y DE LA EDUCACION  
DEPARTAMENTO DE QUIMICA  
POPAYAN  
2005

## CONTENIDO

|   | pág. |
|---|------|
| 1. RESUMEN  | 3    |
| 2. INTRODUCCION   | 4    |
| 3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA   | 5    |
| 3.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA   | 5    |
| 3.2. HIPOTESIS DEL TRABAJO  | 5    |
| 4. OBJETIVOS  | 7    |
| 4.1. OBJETIVO GENERAL   | 7    |
| 4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS  | 7    |
| 5. JUSTIFICACION  | 8    |
| 6. MARCO TEORICO  | 11   |
| 6.1. FABRICACION DE PAPEL A PARTIR DEL BAGAZO DE CAÑA                   | 11   |
| 6.1.1. Descripción del proceso productivo                               | 11   |
| 6.1.1.1 Planta de pulpa   | 12   |
| 6.1.1.2 Planta de blanqueo  | 13   |
| 6.1.1.3 Máquina de papel  | 13   |
| 6.1.1.4 Planta de esmaltados  | 15   |
| 6.2. AGUAS RESIDUALES Y PARAMETROS FISICOQUIMICOS PARA<br>SU EVALUACION | 17   |
| 6.2.1. Agua residual  | 17   |
| 6.2.2. Parámetros fisicoquímicos de evaluación del agua residual        | 17   |
| 6.3. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES                                    | 20   |
| 6.4. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL SECTOR<br>PAPELERO           | 21   |
| 6.4.1. Pretratamiento   | 21   |
| 6.4.2. Tratamiento primario   | 21   |
| 6.4.3. Tratamiento secundario   | 22   |
| 6.4.4. Tratamiento de lodos   | 22   |

|  |    |
|--|----|
| 6.4.5. Tratamientos internos   | 22 |
| 6.5. ASPECTOS JURIDICOS RELACIONADOS CON EL PROGRAMA DE CONTROL PARA VERTIMIENTOS INDUSTRIALES   | 23 |
| 7. ESTADO DEL ARTE   | 24 |
| 8. METODOLOGÍA   | 27 |
| 8.1. Ubicación   | 27 |
| 8.2. Recopilación y análisis de la información existente sobre el tema   | 27 |
| 8.3. Elaboración plan de muestreo y recolección de muestras para caracterización   | 27 |
| 8.4. Tratamiento de la muestra y preservación  | 29 |
| 8.5. Caracterización del afluente y efluente muestreado  | 32 |
| 8.5.1. Análisis físico   | 32 |
| 8.5.2. Análisis químico  | 33 |
| 8.5.3. Valoración química del contenido nutricional  | 38 |
| 8.6. Análisis y manejo de datos  | 40 |
| 8.7. Elaboración de un informe de resultados preliminares para el posible uso y gestión del recurso hídrico en riego agrícola  | 40 |
| 8.8. Elaboración y presentación informe final  | 41 |
| 9. ANALISIS DE RESULTADOS  | 42 |
| 9.1 ANALISIS FISICO Y QUIMICO DE LOS EFLUENTES ENTRADA AL CLARIFICADOR, SALIDA DEL CLARIFICADOR Y SALIDA TOTAL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, PTAR | 42 |
| 9.1.1 Análisis físico  | 42 |
| 9.1.1.1 Caracterización de sólidos sedimentables y sólidos suspendidos totales   | 42 |
| 9.1.1.2 Caracterización de temperatura   | 47 |
| 9.1.2 Análisis químico   | 49 |
| 9.1.2.1 Caracterización de pH  | 49 |
| 9.1.2.2 Caracterización de la Demanda Biológica de Oxígeno DBO5 y la demanda Química de Oxígeno DQO  | 52 |
| 9.1.2.3 Caracterización de sulfuros  | 57 |

|   |    |
|---|----|
| 9.1.2.4 Caracterización de cloruros   | 61 |
| 9.1.2.5 Caracterización del porcentaje de materia orgánica  | 62 |
| 9.1.2.5.1 Correlación entre el porcentaje de materia orgánica y la relación DBO5/DQO  | 65 |
| 9.1.2.5.2 Correlación entre el porcentaje de materia orgánica y el fósforo soluble  | 68 |
| 9.1.2.5.3 Correlación entre el porcentaje de materia orgánica y el nitrógeno amoniacal  | 68 |
| 9.1.2.6 Caracterización del fósforo soluble   | 71 |
| 9.1.2.6.1 Correlación entre el fósforo soluble y el pH  | 74 |
| 9.1.2.7 Caracterización del nitrógeno amoniacal   | 76 |
| 9.1.2.7.1 Correlación entre nitrógeno amoniacal y el pH   | 79 |
| 9.1.2.8 Caracterización de nitritos   | 79 |
| 9.1.2.8.1 Correlación entre nitritos y el pH  | 82 |
| 9.1.2.9 Caracterización de nitratos   | 84 |
| 9.1.2.10 Caracterización de sulfatos  | 90 |
| 9.1.2.10.1 Correlación de sulfatos con materia orgánica, nitrógeno amoniacal y pH   | 92 |
| 9.2 ANALISIS DE LA CALIDAD DEL EFLUENTE DE LA SALIDA TOTAL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, PTAR COMO POSIBLE AGUA DE RIEGO | 92 |
| 9.2.1 Criterio de salinidad   | 93 |
| 9.2.2 Criterio de la relación de adsorción de sodio, RAS  | 94 |
| 9.2.3 Contenido de elementos tóxicos para las plantas   | 96 |
| 9.2.3.1 Contenido de cloruros   | 96 |
| 9.2.3.2 Contenido de elementos traza  | 96 |
| 9.2.3.3 contenido de compuestos orgánicos   | 97 |
| 9.2.3.4 Contenido de nitrógeno amoniacal, nitratos y sulfatos   | 98 |

|   |     |
|---|-----|
| 9.3 PROPUESTA PRELIMINAR PARA VIABILIZAR EL SISTEMA INTEGRADO DE LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS PROCEDENTES DE PROPAL PLANTA 2 | 99  |
| 9.3.1 Desarrollo de la propuesta de integración   | 99  |
| 9.3.1.1 Determinación de las fortalezas y limitaciones del sistema existente  | 99  |
| 9.3.1.2 Estructura del sistema integrado: propuesta   | 99  |
| 9.3.1.2.1 Mejoras que deben llevarse a cabo en el tratamiento del efluente final  | 99  |
| 9.3.1.2.2 Implementación del sistema de reuso   | 100 |
| 9.3.1.2.2.1 Evaluación agrícola del área con reuso probable   | 101 |
| 9.3.2 Criterios para la mitigación de los impactos existentes y potenciales   | 101 |
| 10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES  | 103 |
| BIBLIOGRAFIA  | 105 |
| ANEXOS  | 108 |

## LISTA DE TABLAS

|               |    |
|---------------|----|
| TABLA 1.....  | 9  |
| TABLA 2.....  | 16 |
| TABLA 3.....  | 23 |
| TABLA 4.....  | 24 |
| TABLA 5.....  | 25 |
| TABLA 6.....  | 26 |
| TABLA 7.....  | 29 |
| TABLA 8.....  | 30 |
| TABLA 9.....  | 43 |
| TABLA 10..... | 44 |
| TABLA 11..... | 45 |
| TABLA 12..... | 46 |
| TABLA 13..... | 47 |
| TABLA 14..... | 49 |
| TABLA 15..... | 49 |
| TABLA 16..... | 52 |
| TABLA 17..... | 53 |
| TABLA 18..... | 54 |
| TABLA 19..... | 56 |
| TABLA 20..... | 56 |
| TABLA 21..... | 57 |

|               |    |
|---------------|----|
| TABLA 22..... | 58 |
| TABLA 23..... | 60 |
| TABLA 24..... | 61 |
| TABLA 25..... | 62 |
| TABLA 26..... | 64 |
| TABLA 27..... | 65 |
| TABLA 28..... | 66 |
| TABLA 29..... | 67 |
| TABLA 30..... | 70 |
| TABLA 31..... | 72 |
| TABLA 32..... | 73 |
| TABLA 33..... | 74 |
| TABLA 34..... | 76 |
| TABLA 35..... | 79 |
| TABLA 36..... | 80 |
| TABLA 37..... | 81 |
| TABLA 38..... | 82 |
| TABLA 39..... | 83 |
| TABLA 40..... | 85 |
| TABLA 41..... | 86 |
| TABLA 42..... | 88 |
| TABLA 43..... | 89 |
| TABLA 44..... | 91 |

|               |    |
|---------------|----|
| TABLA 45..... | 92 |
| TABLA 46..... | 94 |
| TABLA 47..... | 96 |
| TABLA 48..... | 97 |

## LISTA DE GRAFICOS

|                 |    |
|-----------------|----|
| GRAFICO 1.....  | 11 |
| GRAFICO 2.....  | 28 |
| GRAFICO 3.....  | 43 |
| GRAFICO 4.....  | 45 |
| GRAFICO 5.....  | 48 |
| GRAFICO 6.....  | 51 |
| GRAFICO 7.....  | 54 |
| GRAFICO 8.....  | 55 |
| GRAFICO 9.....  | 57 |
| GRAFICO 10..... | 59 |
| GRAFICO 11..... | 62 |
| GRAFICO 12..... | 64 |
| GRAFICO 13..... | 68 |
| GRAFICO 14..... | 71 |
| GRAFICO 15..... | 73 |
| GRAFICO 16..... | 78 |
| GRAFICO 17..... | 80 |
| GRAFICO 18..... | 83 |
| GRAFICO 19..... | 87 |
| GRAFICO 20..... | 89 |
| GRAFICO 21..... | 90 |

GRAFICO 22.....91

GRAFICO 23.....95

## LISTA DE SIGLAS

**PTAR:** Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

**CRC:** Corporación Autónoma Regional del Cauca

**PROPAL:** Industria Productora de Papeles

**IFI:** Instituto de Fomento Industrial

**E.C:** Entrada al Clarificador

**S.C:** Salida Del Clarificador

**S.T:** Salida Total

**DBO:** Demanda Bioquímica de Oxígeno

**DQO:** Demanda Química de Oxígeno

**SST:** Sólidos Suspendidos Totales

**SSd:** Sólidos Sedimentables

**NTK:** Nitrógeno Total Kjeldhal

A mis padres, que hicieron grandes esfuerzos para que pudiese cumplir cada una de las etapas de aprendizaje y que fueron abnegados en la espera de ver cristalizados sus deseos de verme profesional.

A mis hermanos Heberth y Julián y a mis demás familiares por ser constantes en su apoyo.

## **AGRADECIMIENTOS**

El que finalmente haya cumplido con esta etapa, conlleva el esfuerzo y constante aliento de muchas personas a las que quiero dar un especial reconocimiento. Ese esfuerzo conjunto es el que hoy puedo mostrar no solo a mi familia, también a mis amigos y compañeros, por ello quiero expresar mis agradecimientos a:

Al Magíster Isabel Bravo y Doctor Fabio Cabezas, docentes del Programa de Química, de la Facultad de Ciencias Exactas y de la Educación de la Universidad del Cauca, quienes fueron mis asesores durante todo el proceso de la pasantía y quienes contribuyeron con sus orientaciones a que el trabajo se llevase a cabo de la mejor manera, para que la formación que me fue entregada en las aulas se viese reflejada en la práctica.

A la Productora de Papeles Propal S.A planta 2, principalmente a la señora Lyda Amparo Mosquera por permitirme llevar a cabo este trabajo, por su colaboración y apoyo.

A la Corporación Regional del Cauca CRC y a cada una de las personas que me brindaron información que sirviera al propósito de mi trabajo.

A todos aquellos que hicieron sus aportes, para la construcción de este documento.

## 1. RESUMEN

Uno de los grandes retos de la industria papelera en Colombia, es determinar la calidad de las aguas residuales vertidas a los caudales de los ríos, lagos y lagunas cercanas a las plantas procesadoras. Un avance significativo ha sido, sin duda, la construcción de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en las cuales, los controles actuales se centran en los análisis de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Con los análisis anteriores solamente, es muy difícil asegurar, por parte de la industria papelera PROPAL, la no contaminación del medio receptor y la repercusión sobre la salud de los habitantes de la región. De esta manera surgió la necesidad, de realizar análisis físicos y químicos tanto cualitativos como cuantitativos, de forma más completa y con muestreos en menores lapsos de tiempo (quincenales), de las aguas residuales originadas en la planta de procesamiento, su paso por la PTAR y la salida del mismo (afluente y efluente), los que permitirían conocer la composición fisicoquímica y valorar con una mayor precisión la verdadera condición de las aguas vertidas y la real efectividad de los tratamientos previos, de acuerdo a la normatividad ambiental. Encontrándose mediante el análisis, que la eficiencia de la PTAR es adecuada ya que la mayoría de los parámetros físicos y químicos cumplen con la Norma Colombiana mediante el Decreto 1594/84, a excepción de la DBO cuyo valor es de 2237 Kg/día con respecto a 1500 Kg/día que establece la Corporación Regional del Cauca (CRC).

Adicionalmente, el efluente final se caracterizó como agua de riego, dando como resultados preliminares, un efluente altamente salino (C3) con un riesgo de toxicidad bajo en cloruros, bajo en sodio, baja relación de absorción de sodio (RAS) y bajas concentraciones de elementos tóxicos como sulfatos, nitratos y nitrógeno amoniacal.

Los parámetros físicos y químicos mediante los cuales se calificó y cuantificó la calidad del agua debían ser precisos, válidos y representativos, para ello se utilizó el Análisis de Varianza (ANOVA), la Prueba de Duncan para determinar entre cuales de los puntos de muestreo existía diferencia significativa y la correlación de Pearson y Spearman para determinar las correlaciones entre los parámetros analizados. Las características físicas y químicas que se evaluaron en los diferentes residuos líquidos, para este caso afluente y efluente son: Residuos aniónicos, entre los que se encuentran: Nitratos, nitritos, sulfatos, sulfuros y cloruros; DBO, DQO, conductividad, temperatura, pH, sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables, materia orgánica, nitrógeno amoniacal, fósforo inorgánico y residuos catiónicos, entre los que se encuentran: Calcio, magnesio y sodio.

## 2. INTRODUCCION

Uno de los propósitos de la industria productora de papeles, PROPAL planta II, con relación a la calidad de aguas servidas, es el de minimizar el grado de contaminación del recurso hídrico cercano a la planta (área de influencia).

En la fabricación de papel y cartón, el agua constituye un elemento de uso principal como medio de dispersión y transporte de las materias primas fibrosas y de los aditivos, a través de las etapas del proceso de producción, que van desde el pulpeo hasta la formación del papel. Además el agua se utiliza como fluido de intercambio de calor, para el sellado de los sistemas a vacío, para la producción de vapor y como agente lubricante, entre otros usos.

Para la realización de este trabajo de pasantía además de conocer el proceso productivo de la fabricación de papel a partir de bagazo de caña, fue necesario conocer de qué etapas consiste el tratamiento de aguas residuales de PROPAL y bajo que normatividad ambiental está regido el control de vertimientos industriales a fuentes receptoras como ríos, lagos y lagunas. Para de esta manera determinar las especificaciones de su calidad, mediante el análisis de parámetros físicos y químicos como: Residuos aniónicos, entre los que se encuentran: Nitratos, nitritos, sulfatos, sulfuros y cloruros; DBO, DQO, conductividad, temperatura, pH, sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables, materia orgánica, nitrógeno amoniacal, fósforo inorgánico y residuos catiónicos, entre los que se encuentran: Calcio, magnesio y sodio, particularmente en los flujos de salida de la PTAR.

Además de caracterizar de forma preliminar, este mismo efluente desde el punto de vista agrícola como agua de riego y cuales podrían ser de esta manera el tipo de suelos y cultivos a los cuales se podría aplicar.

### **3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

#### **3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Los efectos del consumo de agua sobre el entorno se ve reflejado en la disminución de los caudales de los cuerpos de agua y, sobre todo, en la contaminación de los mismos, debido a variación en el pH, temperatura y una serie de especies químicas, disueltas o en suspensión, las cuales hacen parte de las descargas de agua proveniente de los diferentes procesos. Las normatividades ya establecidas en el Decreto 1594 / 84 del Ministerio del Medio Ambiente y por la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC), institución delegataria encargada de hacer cumplirlas, requieren cada vez de una mayor cobertura en los análisis de calidad para los efluentes, promoviendo finalmente una optimización de los procesos industriales.

En la industria productora de papeles, PROPAL planta II, en las instalaciones del municipio de Caloto (Cauca), se han iniciado desde varios años atrás, los procesos de depuración de aguas residuales mediante la adopción de tecnologías limpias para la reducción de cargas contaminantes logrando que la relación DBO/DQO sea mayor de 0.4 en la PTAR.

No obstante, la industria papelera PROPAL, dispone de análisis insuficientes (DBO, DQO, sólidos suspendidos totales y sólidos sedimentables), además de contratarse con asesores ambientales muestreos anuales para los demás parámetros, sin un tratamiento estadístico e interpretación de los resultados. Con los análisis anteriores solamente, es muy difícil asegurar, por parte de la industria papelera PROPAL, la no contaminación del medio receptor y la repercusión sobre la salud de los habitantes de la región ya que actualmente la producción de papel ha aumentado, manejando de esta manera su PTAR mayores volúmenes de aguas residuales que han aumentado la cantidad de lodos de la laguna de oxidación rápidamente.

Por esta razón, es necesario un estudio más completo y detallado, en estos afluentes y efluentes, de otras variables físicas y químicas como: Residuos aniónicos, entre los que se encuentran: Nitratos, nitritos, sulfatos, sulfuros y cloruros; DBO, DQO, conductividad, temperatura, pH, sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables, materia orgánica, nitrógeno amoniacal, fósforo y residuos catiónicos, entre los que se encuentran: Calcio, magnesio y sodio, que permitirán determinar si la PTAR es eficiente.

#### **3.2 HIPOTESIS DEL TRABAJO**

El control de los vertidos de las aguas residuales procedentes de Plantas de Tratamiento está regulado por diferentes normativas, con el fin de establecer las características y los límites de vertido a las diferentes fuentes de agua.

El agua residual tratada por una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), de cualquier tipo, además de cumplir con las diferentes normativas, es una materia prima

valiosa por presentar como componentes (agua + materia orgánica + nutrientes), constituyéndose en un potencial recurso hídrico. Su evaluación como recurso agrícola, permitiría optimizarlo, dado su alto valor agregado, además de ser el subproducto de mayor valor económico, pues contiene a la vez agua (cuyo valor depende del lugar), materia orgánica estabilizada (dependiendo del suelo y tipo de cultivo) y nutrientes.

Dada la posibilidad de la caracterización física y química de los residuos líquidos contenidos en el afluente y efluente de la PTAR de PROPAL planta II, se podrá determinar la eficiencia de la planta de tratamiento, mediante la evaluación de la calidad del agua tratada con respecto al medio receptor y su posible reutilización como agua de riego.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1 OBJETIVO GENERAL**

Determinar la composición fisicoquímica y definir la calidad de las aguas residuales tanto en afluentes como efluentes de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), de la industria papelera PROPAL planta II, de acuerdo a la normatividad ambiental.

### **4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Caracterizar físicamente en los afluentes y efluentes los siguientes parámetros: temperatura, sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables y conductividad.
- Caracterizar químicamente en los afluentes y efluentes los siguientes parámetros: pH, DQO, DBO, nitratos, nitritos, sulfatos, cloruros y sulfuros.
- Determinar el contenido nutricional de los afluentes y efluentes mediante los parámetros de: materia orgánica, nitrógeno amoniacal, fósforo inorgánico, sodio, calcio, y magnesio.
- Elaborar un informe de los resultados preliminares de la caracterización del agua residual del efluente de la salida total de la PTAR, para determinar su posible uso externo en riego agrícola.

## 5. JUSTIFICACION

La Industria Papelera PROPAL, como muchas otras industrias no ha sido ajena a los requerimientos de calidad y medio ambiente que exige la Legislación Nacional e Internacional; así como en atender a las exigencias de los clientes en forma de productos de mayor calidad y satisfacer la creciente demanda de su producto.

Es claro que los procesos de transformación física o química apuntados hacia la producción de elementos que sirven al hombre mismo, conllevan al deterioro, desgaste o contaminación de los recursos empleados. El proceso de contaminación es por tanto el resultado inevitable de las actividades productivas, pero no por ello incontrolables; es por esto que las medidas y datos obtenidos de la caracterización física y química del afluente y efluente de la PTAR podrán conducir, en estudios posteriores, al desarrollo e implantación de numerosas medidas correctoras destinadas a dar satisfacción a las nuevas exigencias legales y sociales que durante los próximos años se van a producir.

En este sentido se puede pensar en que el cumplimiento de la normatividad ambiental no sea vista como una "imposición ambiental", sino que por el contrario se convierta en una Oportunidad Empresarial, utilizando su PTAR como una nueva unidad de Control de Calidad de la fábrica, en la que se adopten los mecanismos que permitan reducir las pérdidas de materia prima, se vigile el consumo de insumos químicos y el gasto de agua, o se apliquen medidas que van más allá, como por ejemplo valorizar los subproductos de la PTAR (es decir los productos de descomposición del efluente), entre ellos el agua tratada para la fertirrigación de los cultivos aledaños, para reuso en el proceso o para generar ingresos de operación con su propia PTAR.

Las razones por la que se hace necesario mejorar la gestión del agua en la industria papelera son varias, entre ellas se pueden mencionar la regulación actual que cada vez es más estricta en lo concerniente a los vertidos, la opinión pública que condena la contaminación y la disminución de los recursos naturales, que se asocia, en gran medida, a la producción industrial; la imagen en los mercados la cual se pondera en mejores términos para quienes logran una producción limpia, la pérdida de fibra que hace más costosa la producción, la escasez y el coste del agua bruta, así como el coste del tratamiento de los efluentes.

De esta manera, es necesario conocer la composición fisicoquímica de afluentes y efluentes, de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), de la industria papelera, para determinar su posible contaminación sobre las fuentes de agua cercanas y/o potencial uso, entre los que se encuentra su utilización en el sector agrícola.

Lo anterior se justifica dada la ubicación de la Empresa Productora de Papeles S.A, PROPAL-Planta II, entre los municipios de Puerto Tejada y Villa Rica. En estos dos municipios, el sector agrícola es el principal usuario del recurso hídrico, ya que el 90% de sus tierras están dedicadas al cultivo de caña de azúcar y la gran mayoría del área sembrada se riega con agua superficial (ver tabla 1).

**Tabla 1. Cultivos en los municipios de Puerto Tejada y Villa Rica**

| <b>MUNICIPIO DE PUERTO TEJADA</b>   |                 |               |
|---|-----------------|---------------|
| <b>CULTIVO</b>  | <b>AREA Has</b> | <b>%</b>      |
| Caña de azúcar  | 9.387           | 95.78         |
| Cacao   | 95              | 0.97          |
| Soya  | 81              | 0.82          |
| Sorgo   | 68              | 0.69          |
| Plátano   | 58              | 0.59          |
| Maíz  | 53.2            | 0.54          |
| Tomate  | 6.5             | 0.0062        |
| Yuca  | 6.0             | 0.06          |
| Tabaco  | 5.6             | 0.057         |
| Otros usos  | 39.7            | 0.20          |
| <b>TOTAL</b>  | <b>9.800</b>    | <b>100.00</b> |
| <b>MUNICIPIO DE VILLA RICA</b>  |                 |               |
| <b>CULTIVO</b>  |                 | <b>%</b>      |
| Caña de azúcar  |                 | 59            |
| Cacao, plátano, frutales y cultivos transitorios de maíz, arroz, soya y sorgo |                 | 41            |

Fuente: Agenda Ambiental: Municipio de Puerto tejada y Villa Rica. CRC. 2002

Estas razones provocan la pérdida de algunas características físicas y químicas, además de las prácticas culturales utilizadas para el manejo agronómico de este cultivo como la fertilización, las quemas, la extracción de aguas subterráneas y la utilización de maquinaria pesada, se hace necesario aplicar un manejo agroecológico de estos cultivos. Quiere esto decir, que es evidente la exigencia de minimizar el impacto degradativo sobre el suelo y en general sobre el medio ambiente; haciéndose perentorio el que se propenda por una utilización racional del recurso hídrico, una vez sea sometido a procesos previos de análisis y se corrobore el aporte de nutrientes y materia orgánica que puedan ayudar a rehabilitarlo.

El propósito anterior se lograría en el largo plazo y complementándose con investigaciones posteriores, a través de las cuales se proveerían mayores elementos, que permitirían a la Empresa Propal tomar la decisión sobre la reutilización de aguas residuales tratadas provenientes de su planta, en la agricultura o en sus propios procesos, tomando como antecedente la información parcial de la calidad del efluente, resultados que se alcanzarán con el desarrollo de esta pasantía.

Para ello se determinará materia orgánica, ya que durante el proceso productivo de la fabricación de papel, se adiciona material de carácter orgánico, que sería fuente de nutrientes para las plantas, después de su descomposición, transformación y verificación de probables reacciones que se lleven a cabo.

También se determinará la presencia y cantidad de nutrientes como sulfatos, nitratos, calcio, magnesio y fósforo inorgánico ya que son nutrientes esenciales para el desarrollo vegetal, por ejemplo el calcio es el principal elemento alcalino que neutraliza el ácido oxálico de desamiliación de los vegetales, que sin esta transformación quemaría los tejidos; enriquecen las aguas para riego, pero una carga excesiva puede provocar efectos nocivos para el terreno y/o aguas subterráneas. (Disponible en internet: [www.gem.es](http://www.gem.es))

En cuanto al nitrógeno como amoníaco libre y ácido nitroso, presentes en valores mayores a los permitidos en aguas residuales de vertido, inhiben el desarrollo de los organismos nitrificantes, debido a la diferencia de potencial de hidrógeno que pueden causar entre el interior y exterior de la célula.

Igualmente los nitritos, originados por la presencia de bacterias reductoras en las aguas residuales en valores mayores a los permitidos para vertidos, son altamente tóxicos e incluso cancerígenos, cuando reaccionan con aminas presentes en el agua residual y dan origen a las nitrosaminas. (Sans,1999)

A diferencia del nitrógeno en las formas anteriormente mencionadas, el fósforo es un nutriente de gran importancia para el crecimiento y reproducción de los microorganismos que participan en la estabilización de la materia orgánica presente en las aguas residuales. Sin embargo su exceso y combinación con altos niveles de nitratos, da lugar a procesos de eutrofización provocando proliferación excesiva de algas y plantas acuáticas, consumiéndose el oxígeno a lo largo del curso de la fuente de agua donde son vertidas las aguas residuales ricas en este nutriente. (Orozco, 1985)

Además se determinarán componentes no aptos para un correcto desarrollo de las plantas como cloruros, que podrían ocasionar salinidad al suelo donde se realice el riego.

Igualmente se determinarán los sulfuros, debido a que ocasionan problema de malos olores.

Tanto la industria productora de papel (PROPAL) como la Universidad del Cauca, conocedores de la problemática ambiental, económica, social y académica, combinan esfuerzos en este trabajo, buscando en esta cooperación entre el sector privado y público, beneficios mutuos como instituciones, pero proyectadas finalmente al beneficio de la salud y progreso de las comunidades de la región.

## 1. MARCO TEORICO

Para enmarcar este trabajo, es necesario conocer primero que todo, el proceso productivo en el cual se basa la industria papelera PROPAL, para la fabricación de papel, a partir del bagazo de caña. Una vez conocido de forma general este proceso, se definen los puntos o estaciones críticas, en los cuales se vierten las mayores cantidades de residuo líquido a la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), y el tratamiento que reciben para ser vertidos posteriormente a las fuentes de agua cercanas.

Para complementar, es preciso definir algunos términos como agua residual, parámetros de evaluación del agua residual, plantas de tratamiento de agua residual y por último planta de tratamiento de aguas residuales en el sector papelerero. Otro aspecto a tener en cuenta es la normatividad por la cual se rige el sector industrial para el control de vertimientos a las fuentes de agua.

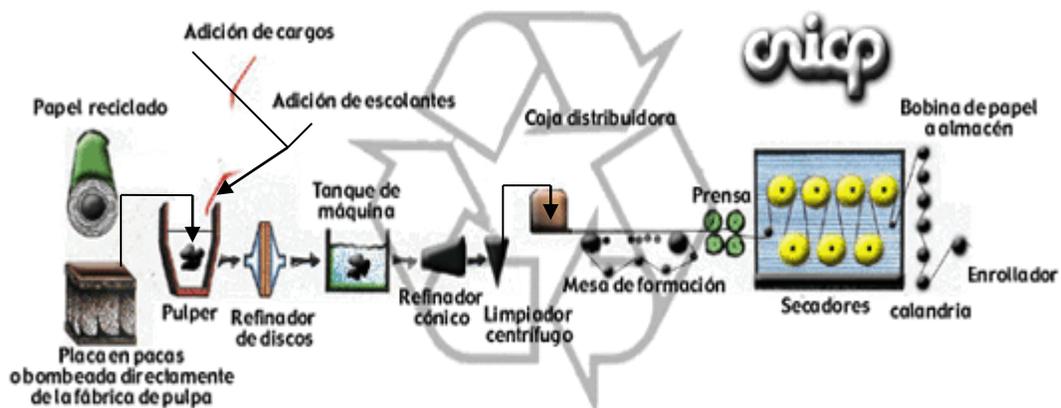
### 1.1 FABRICACION DE PAPEL A PARTIR DEL BAGAZO DE CAÑA

#### 6.1.1. Descripción del proceso productivo

De manera muy general, se puede decir que la manufactura del papel comprende operaciones esencialmente mecánicas, las cuales se basan en la tendencia de las fibras celulósicas en suspensión acuosa a unirse entre sí cuando se secan.

El proceso de la elaboración se lleva a cabo en dos grandes áreas, la primera se refiere a la preparación de pastas, mientras que la segunda corresponde a la formación del papel propiamente dicha. (Gráfico 1)

**Gráfico 1. Secuencia de fabricación de papel**



PROPAL es el único productor en Colombia de papeles para imprenta, escritura y oficina, que utiliza la fibra de la caña de azúcar como principal materia prima. El proceso de fabricación se puede describir así:

Se inicia en los ingenios azucareros en donde se recolecta el bagazo que resulta de la molienda de la caña de azúcar. Este bagazo es pretratado para remover parte de la médula, o el polvillo, que no es apta para la fabricación del papel.

Una vez la fibra de bagazo es transportada a PROPAL, se inicia el proceso de desmedulado y lavado en la planta de fibra, garantizando así, la obtención de una fibra de bagazo limpia y lista para la conversión a pulpa.

#### **6.1.1.1 PLANTA DE PULPA**

Cuando la fibra pretratada entra en la planta de pulpa, es sometida a un proceso de cocción con soda cáustica y vapor a alta presión y temperatura, que consiste en el proceso químico termomecánico denominado "proceso a la soda", el más limpio de todos los procesos de pulpeo. Su finalidad es eliminar parte de la lignina contenida en la fibra de caña de azúcar. Esta operación se efectúa en digestores continuos.

En el proceso de digestión, no solamente se lleva a cabo la deslignificación, sino que además se remueven carbohidratos y resinas. En esta etapa la soda añadida como licor de cocimiento se consume en:

- Reacción con lignina
- Disolución de carbohidratos
- Neutralización de ácidos orgánicos
- Reacción con material resinoso
- Adsorción por parte de la fibra

El mecanismo exacto por medio del cual reacciona el NaOH con la lignina es muy complejo. Sin embargo de forma general, se explica que el Na<sup>+</sup> reacciona con grupos OH<sup>-</sup> de la molécula de lignina; adicionalmente la presencia de OH<sup>-</sup> ayuda a la ruptura de uniones éteres y de enlaces C-C.

De los digestores, la pulpa pasa a un tanque donde se efectúa la despresurización. La pulpa, en esta etapa, presenta un color café. Seguidamente es enviada al cuarto de filtros lavadores en contracorriente donde se separa la pulpa del licor residual del cocimiento, más conocido como "licor negro". Posteriormente pasa al sistema de limpieza compuesto por zarandas y depuradores ciclónicos, donde se realiza una separación gruesa y fina de los materiales indeseables, como arena y otras impurezas.

La pulpa café obtenida puede continuar al proceso de blanqueo o ser usada en las máquinas papeleras con destino a la fabricación de papeles sin blanquear o naturales.

### **6.1.1.2 PLANTA DE BLANQUEO**

La función principal de esta planta, es retirar toda la lignina residual que le confiere el color café a la pulpa, lo cual se logra paulatinamente a lo largo del proceso de blanqueo gracias a la reacción química que ocurre en cada una de las torres de retención y a un posterior lavado por filtración para eliminar los productos de cada reacción.

En el blanqueo se tienen dos sistemas de reacción específicos: el sistema cloro-agua y el sistema de peróxido. En el caso del primer sistema, ocurren las siguientes reacciones:



De esta reacción, el ácido hipocloroso, HClO, se descompone, liberando iones hidrógeno  $\text{H}^+$  y iones hipoclorito  $\text{ClO}^-$ . La reacción de descomposición del ácido hipocloroso, hace que se puedan manejar diferentes agentes, cloro, ácido hipocloroso e hipoclorito. Estos agentes presentan diferentes proporciones dependiendo del pH y de esta manera se llevan a cabo las diferentes etapas de blanqueo.

En el sistema de peróxido, que constituye la etapa de extracción, se adiciona peróxido de hidrógeno, el cual se disocia de la siguiente manera:



Aquí, el agente encargado de llevar a cabo la extracción es el  $\text{HO}_2^-$ , debido a que durante esta etapa se trabaja a altos valores de pH. El peróxido decolora las impurezas de la celulosa sin removerlas.

Mediante estos procesos químicos de digestión y blanqueo se obtiene la pulpa para producir papeles "Woodfree", término con el que en la industria papelera se conocen aquellos productos que no contienen lignina, a diferencia de los que provienen de un proceso de pulpeo mecánico, tales como los papeles tipo periódico y LWC (esmaltados de bajo gramaje para revistas).

La pulpa blanqueada obtenida en este proceso, es utilizada para la producción de papel y cartulinas finas o también puede ser prensada para extraerle la humedad, convirtiéndola en hojas para su fácil almacenamiento y transporte, posterior utilización en la fábrica o para venta externa.

### **6.1.1.3 MAQUINA DE PAPEL**

A la pulpa de bagazo, blanqueada o sin blanquear, se le agregan diferentes químicos como carbonato de calcio, encolantes y aditivos diversos, de acuerdo con la formulación específica de cada grado de papel a ser producido, dependiendo de su uso final.

Entre los aditivos comunes utilizados en la fabricación de papel, se encuentran los plastificantes como glicerina, sales higroscópicas, aceites sulfonados y emulsiones de aceites, grasas y ceras. (Cushing, 1981)

La adición de los encolantes tiene como objetivos principales otorgar al papel propiedades permeables, aumentar su resistencia a la tensión, al doblar, a la explosión y, junto con las cargas, propiciar una superficie que sea adecuada a la escritura e impresión.

Entre los encolantes más usuales se encuentran las breas de colofonia (ácido resínico), a la cual se le adiciona alumbre (sulfato doble de aluminio hidratado) como dispersante, además de cumplir otras funciones como: control de la acidez, agente de retención y drenaje, preservante y antiespumante y los "almidones modificados".

Actualmente, estos encolantes han sido sustituidos por dímeros de alquilceteno (Hercon 40), producto que incluye un agente de retención. Estos compuestos, son derivados de ácidos grasos de cadena larga y están compuestos de dos cadenas de 16 carbonos unidas a un anillo de lactona.

Por lo que respecta a las cargas, citaremos que éstas son materias de relleno cuya función es la de ocluir los huecos que de manera natural se originan al momento de unirse las fibras de la celulosa en la sección de formación de la máquina de papel.

Dentro de las cargas más usualmente empleadas se pueden citar a los aluminio silicatos hidratados tal como el caolín ( $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 \cdot \text{XH}_2\text{O}$ ).

En esta etapa también se adicionan agentes de retención, entre los que se encuentra el cloruro de polialuminio, cuya finalidad por su acción iónica, es la de retener las partículas finas del material de relleno y de las pulpas, en mayor cantidad sobre la hoja y no se pierdan con las aguas blancas. Además ayudan a tener un mayor y mejor aprovechamiento de los productos de carga, los finos de pulpas, como también de los colorantes.

La mezcla se pasa a través de unos depuradores ciclónicos, retirando impurezas como arena y astillas del bagazo entre otros, para mejorar la calidad de la pulpa que posteriormente va a entrar a la máquina de papel.

Esta mezcla de fibras, aditivos químicos, colorantes orgánicos sintéticos y gran cantidad de agua es depositada sobre una malla girando a alta velocidad. Mediante una combinación de efectos de gravedad y vacío, se retira el agua quedando al final de la malla una estructura húmeda de fibras entrelazadas que es en sí el principio de la hoja de papel. Posteriormente se pasa la hoja de papel por un sistema de prensas y secadores de vapor para eliminar el exceso de humedad que todavía contiene la hoja de papel.

La hoja de papel es pasada por un sistema de rodillos, llamado calandria, que prensa la hoja para dar mejores propiedades de apariencia como lisura, calibre y porosidad. Esta hoja continua de papel es enrollada en bobinas de gran tamaño, llamadas "jumbos" o "reeles", donde se corta a rollos en anchos más pequeños de acuerdo a lo solicitado por los clientes.

En la sección de terminados se llevan a cabo actividades tales como: conversión de rollos en hojas, rollos en rollos de otras dimensiones, rollos para ser supercalandreados (reducción de calibre e incremento de la lisura del papel) o rollos para ser embosados (textura predeterminada).

#### **6.1.1.4 PLANTA DE ESMALTADOS**

El proceso de esmaltado tiene como fin aplicar al papel base por una o ambas caras, un recubrimiento de pigmentos, almidones, y adhesivos sintéticos. Este proceso se realiza aplicando la película de esmalte sobre la superficie del papel base de características predeterminadas y de acuerdo con la calidad que se requiera.

El papel esmaltado pasa por un sistema de secado con aire caliente y lámparas infrarrojas para ajustar la humedad final. Se embobina y se pasa por una supercalandria que mediante la acción de una serie de rodillos de pasta, intercalados con rodillos de acero, producen el brillo de la cara, o caras, esmaltadas de la hoja de papel. Finalmente el papel esmaltado se corta y se despacha de acuerdo con los requerimientos del cliente.

Además de los productos químicos mencionados anteriormente, también se adicionan blanqueadores ópticos, para eliminar el tono amarillento de la pulpa; biocidas, para control de bacterias y hongos, entre estos compuestos tenemos el glutaraldehído, su modo de acción es lento por fijación protéica de los gérmenes y por inhibición de cambios nutricionales con el ambiente externo; Posee amplio espectro de acción antibacterial, incluyendo esporas y virus sin cubierta (desnudos), tales como parvo- virus, enterovirus; Es un biocida hidrofílico perteneciente al grupo de los aldehidos. Otros productos químicos son los inhibidores de lama y el sulfito de sodio, el cual se adiciona al bagazo para neutralizar el exceso de cloro residual (ver tabla 2).

Como se menciona anteriormente, el agua es el principal elemento que se utiliza durante todo el proceso productivo de la fabricación de papel, luego del cual pasa a convertirse en agua poluída o contaminada que recibe el nombre de agua residual. (Disponible en Internet: [www.propal.co.com/\\_p\\_alcalino.htm](http://www.propal.co.com/_p_alcalino.htm))

**Tabla 2. Materias primas utilizadas en Propal II**

| TIPO                                  | COMPONENTE PRINCIPAL   |
|---------------------------------------|--|
| Polímeros antiespumantes              |  |
| Agente de retención                   | silica aniónica, poliacrilamida catiónica, derivados poliamina alifática catiónica y poliamina cuaternaria catiónica |
| Ácido sulfámico                       |  |
| Apresto catiónico                     |  |
| Apresto Ethilex hidroxigenado de maíz |  |
| Apresto hidroxigenado de maíz         |  |
| Apresto catiónico de papa             |  |
| Antraquinona                          |  |
| Colorante aniónico directo            | Compuestos azo/complejo de cobre   |
| Carbonato de sodio 98%                |  |
| Carbonato de calcio                   |  |
| Dióxido de carbono                    |  |
| Fosfato de amonio                     |  |
| Hercon 72                             | Alquil ceteno  |
| Infinity 20                           |  |
| Leucophor shrbu                       |  |
| Nalco 1700                            |  |
| Nalco 1820                            |  |
| Nalco 2000                            |  |
| Nalco 7203                            |  |
| Nalco 7384                            |  |
| Nalco Pp06                            |  |
| Nitrógeno                             |  |
| Oxígeno 100%                          |  |
| Pcc Albacar                           |  |
| Pcc Extraligero                       |  |
| Peróxido de hidrógeno 100%            |  |
| Lavado de fieltros (jabón)            |  |
| Pulpas                                |  |
| NaCl                                  |  |
| Slimetrol Rx36 biocida                | Glutaraldehído   |
| Spectrum 7819 biocida                 | Glutaraldehído   |
| Sulfato de aluminio tipo B            |  |
| Sulfato de aluminio tipo A            |  |
| Ultrion-polímero                      |  |
| Urea                                  |  |
| Violeta 5bf                           | Compuestos azo/complejo de cobre   |
| Bisulfito de sodio                    |  |
| Blanqueador óptico                    | Derivado ácido de 4, 4'-diamino-estilbenceno-2,2'-disulfónico  |
| Ácido sulfúrico                       |  |
| Soda cáustica 100% NaOH               |  |
| Cal viva (CaO)                        |  |
| Cloro                                 |  |
| Agentes de encolado superficial       | Copolímero de estireno/acrilato y acilonitrilo/acrilato, resina polihidroxilada                                      |
| HCl 32%                               |  |
| Piedra caliza                         |  |
| Caolines                              |  |

FUENTE: PLAN DE MANEJO AMBIENTAL, Planta Productora de Papeles S.A Propal II

### **6.3. AGUAS RESIDUALES Y PARAMETROS FISICOS Y QUIMICOS PARA SU EVALUACION**

#### **6.3.1. Agua residual**

Las aguas residuales, fundamentalmente son las aguas de abastecimiento público que luego de diversos usos, han sido poluídas o contaminadas. Desde el punto de vista de su origen un agua residual puede ser: Doméstica o sanitaria, proveniente de aparatos sanitarios, lavaderos de ropa, desperdicios de cocina, etc; Industrial, la cual normalmente contiene agentes químicos que deterioran las características físicas, químicas o bacteriológicas del cuerpo receptor y aportan sustancias tóxicas que aunque estén presentes en pequeñas cantidades desequilibran los ecosistemas acuáticos y terrestres adyacentes, y Pluvial, de precipitaciones atmosféricas y del lavado de calles. (CRR, 1995)

Estas aguas residuales se componen, básicamente, de un 99,9% de agua en su estado conocido como de agua potable y de, un 0,1% por peso de sólidos, sean éstos disueltos o suspendidos. Este 0,1% referido es el que requiere se debe remover para que el agua pueda ser reutilizada. El agua sirve o actúa como medio de transporte de estos sólidos, los que pueden estar disueltos, en suspensión o flotando en la superficie del líquido.

Cerca del 75% de los sólidos en suspensión y del 40% de los sólidos filtrables de un agua residual de concentración media son de naturaleza orgánica, material que precisa de oxígeno, y es por tanto un agente desoxigenador del agua cuando entra en descomposición, que genera además olores desagradables.

#### **6.3.2. Parámetros fisicoquímicos de evaluación del agua residual**

Para poder evaluar el daño que pueden llegar a producir las aguas residuales, se emplean diversas técnicas. Para aguas residuales, que tienen una composición más o menos constante, se emplea la medición indirecta, que consiste en la capacidad reductora del carbono existente en dichas aguas. Estas son la Demanda Química de Oxígeno (DQO), y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO). En principio, entre ellas, no hay relación en cuanto a los resultados, ya que los efectos que se producen en el agua varían al aplicar cada técnica, de unas aguas contaminadas a otras. Para el mismo fin se emplea a veces otro parámetro, la Oxidabilidad al Permanganato.

La demanda de oxígeno de un agua residual es la cantidad de oxígeno que es consumido por las sustancias contaminantes que están en esa agua durante un cierto tiempo, ya sean sustancias contaminantes orgánicas o inorgánicas. Las técnicas basadas en el consumo de oxígeno son la demanda química de oxígeno, DQO y la demanda bioquímica del oxígeno (DBO).

**La Demanda Química de Oxígeno**, DQO, es la cantidad de oxígeno en mg/L consumido en la oxidación de las sustancias reductoras que están en un agua. Se emplean oxidantes químicos, como el dicromato de potasio. El ensayo de la DQO se emplea para medir el contenido de materia orgánica tanto de las aguas naturales como de las residuales. En el

ensayo, se emplea un agente químico fuertemente oxidante en medio ácido para la determinación del equivalente de oxígeno de la materia orgánica que puede oxidarse.

**La Demanda Bioquímica de Oxígeno**, DBO, es la cantidad de oxígeno en mg/L necesaria para descomponer la materia orgánica presente mediante acción de los microorganismos aerobios presentes en el agua. Normalmente se emplea la DBO<sub>5</sub>, que mide el oxígeno consumido por los microorganismos en cinco días. Resulta el parámetro de contaminación orgánica más ampliamente empleado. La determinación del mismo está relacionada con la medición del oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica. (Disponible en Internet: [www.estrucplan.com.ar/Efluentes líquidos.htm](http://www.estrucplan.com.ar/Efluentes_líquidos.htm))

Otros parámetros fisicoquímicos que se analizan en las aguas residuales son los sólidos, nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal, sulfatos, cloruros, sulfuros, fósforo, calcio, magnesio, y sodio.

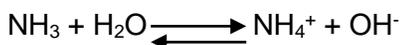
Bajo la denominación de **sólidos** se entiende en “análisis de aguas” los diferentes residuos tanto minerales como orgánicos del tipo soluble e insoluble en el agua y coloidal llegados a los diferentes cuerpos de agua por vía natural y/o antropogénicos, obtenidos a través de diferentes procesos analíticos del tipo gravimétrico.

Dentro de estas determinaciones se encuentra el “residuo total” (sólidos totales), el cual se define como el material remanente después de haber sometido la muestra a un proceso de evaporación lenta, y haberlo secado a una determinada temperatura, generalmente 103-105 °C. Para cuantificar las diferentes clases de sustancias que constituyen el residuo total, se acostumbra dividirlos de acuerdo a los diferentes análisis efectuados sobre las muestras, en: Residuo No Filtrable (sólidos suspendidos), Residuo Filtrable (sólidos disueltos), sólidos volátiles, sólidos fijos y sólidos sedimentables.

Medir los niveles de **nitrato** en el agua es un paso muy importante a la hora de determinar la calidad del agua. El nitrógeno está presente en el agua de muchas maneras, dos de las cuales son nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y nitritos (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>). De estas dos, la primera suele ser la más importante. Los nitratos son un nutriente esencial para el crecimiento de las algas y de otras plantas acuáticas, y pueden encontrarse en niveles muy grandes, debido a los aportes que proceden de una variedad de fuentes.

El **nitrógeno** presente en el agua residual reciente se encuentra principalmente en la forma de urea y materia proteica. La descomposición por las bacterias cambia fácilmente estas formas en amoníaco. En un ambiente aerobio, las bacterias pueden oxidar el nitrógeno del amoníaco a nitritos y nitratos. El predominio del nitrógeno del nitrato indica que el agua residual se ha estabilizado con respecto a la demanda de oxígeno.

El nitrógeno amoniacal existe en solución acuosa bien como ión amonio o como amoníaco dependiendo ello del pH de la solución según la siguiente ecuación de equilibrio:



A niveles de pH superior a 7, el equilibrio se desplaza hacia la izquierda; a niveles inferiores a pH 7, el ión amonio es predominante.

Con respecto a los **sulfatos**, estos se encuentran en las aguas naturales en un amplio intervalo de concentraciones. Las aguas de minas y los efluentes industriales contienen grandes cantidades de sulfatos provenientes de la oxidación de la pirita y del uso del ácido sulfúrico. Los límites de concentración, arriba de los cuales se percibe un sabor amargo en el agua son: Para el sulfato de magnesio 400 a 600 ppm y para el sulfato de calcio son de 250 a 400 ppm. En los sistemas de agua para uso doméstico, los sulfatos no producen un incremento en la corrosión de los accesorios metálicos, pero cuando las concentraciones son superiores a 200 ppm, se incrementa la cantidad de plomo disuelto proveniente de las tuberías de plomo.

Los **cloruros** son aniones que generalmente se encuentran contenidos en las aguas naturales. La magnitud de su concentración es muy variable, siendo mayor normalmente cuando aumenta el contenido mineral de las aguas. No se conocen efectos tóxicos para el hombre por altas concentraciones de cloruros, sin embargo, su valor en agua potable se recomienda que no exceda de 250 mg/L por razones de sabor, ya que los cloruros en concentraciones superiores a este valor, cuando el agua contiene sodio le imparten sabor salado al agua. (Disponible en Internet: [www.globe.com](http://www.globe.com))

Los **sulfuros** se encuentran a menudo en el agua subterránea, especialmente en manantiales calientes. Su presencia común en las aguas residuales se debe en parte a la descomposición de la materia orgánica, presente a veces en los residuos industriales, pero procedente casi siempre de la reducción bacteriana de los sulfatos.

Desde el punto de vista analítico, se distinguen tres categorías de sulfuros en el agua y aguas residuales:

A) *Sulfuro total*, que incluye  $H_2S$  y  $HS^-$  disuelto, así como sulfuros metálicos solubles en ácido, presentes en la materia en suspensión.  $S^{2-}$  es despreciable, y supone menos de 0.5% a pH 12, a menos del 0.05% a pH 11, etc.,. Los sulfuros de cobre y de plata son tan insolubles que no responden a las determinaciones ordinarias del sulfuro; pueden ignorarse a efectos prácticos.

B) *Sulfuro disuelto*, que permanece tras haber eliminado los sólidos en suspensión por floculación y depósito.

C) *Sulfuro de hidrógeno no ionizado*, que puede calcularse a partir de la concentración de sulfuro disuelto, el pH de la muestra y la constante de ionización práctica de  $H_2S$ . (Disponible en Internet: [www.us.es](http://www.us.es))

Las formas más frecuentes en que se encuentra el **fósforo** en soluciones acuosas son ortofosfato, polifosfato y fosfato orgánico.

Los ortofosfato, por ejemplo,  $PO_4^{3-}$ ,  $HPO_4^{2-}$ ,  $H_2PO_4^-$  y  $H_3PO_4$ , se hallan disponibles para el metabolismo biológico sin precisar posterior ruptura.

Los polifosfatos sufren la hidrólisis en soluciones acuosas y vuelven a su forma de ortofosfato.

Una vez evaluado el daño causado por las aguas residuales, mediante los parámetros mencionados anteriormente, se procede a realizar su tratamiento. Este consiste de una serie de operaciones aplicadas sobre vertimientos o aguas contaminadas a fin de entregarlos a ríos y quebradas con una alta disminución de cargas contaminantes a fin de que esos cuerpos receptores no sufran degradaciones.

#### **6.4. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

Existen cuatro divisiones en el estudio de los tratamientos de aguas residuales. Ellos son: preliminares, primarios, secundarios y terciarios. Los cuales están inmersos dentro de otras categorías según la función que cada uno de sus componentes desempeña, y son: Procesos Físicos Unitarios, Procesos Químicos Unitarios y Procesos Biológicos Unitarios. Los primeros incluyen operaciones de desbaste, mezclado, floculación, sedimentación, flotación y filtración. Las operaciones agrupadas en los segundos son la precipitación (o clarificación), transferencia de gases (o aireación), la adsorción (o captación de sustancias solubles) y la desinfección. Los procesos biológicos, son los que se hacen a base de la reproducción de microorganismos degradantes de materia orgánica, bien de tipo aeróbico o anaeróbico. (Disponible en Internet: [www.propal.co.com/\\_p\\_alcalino.htm](http://www.propal.co.com/_p_alcalino.htm))

Las PTAR son unidades de transformación de los efluentes industriales y domésticos, o sea unidades de transformación de la materia orgánica, generando unos lodos o residuos sólidos que deben ser dispuestos en forma adecuada para minimizar su impacto en el medio ambiente.

Una PTAR es casi siempre una combinación de tratamiento primario y secundario, y si se requiere, se aplica un tratamiento terciario.

Antes del tratamiento anaerobio propiamente dicho (que de por sí combina el proceso primario (decantación) y secundario (estabilización)), hay casi siempre la necesidad de algún tratamiento físico-químico (decantación, flotación, tamizaje, etc.) que genera también sub-productos. En el caso de las aguas residuales industriales, suele recuperarse con este tratamiento previo parte de la materia prima del proceso desaprovechada por la fábrica: grasa, pulpa de papel, aceite, etc.

En la industria, una PTAR es una unidad de control de calidad del proceso productivo, donde por medio del análisis del agua residual (cantidad, calidad), se puede diagnosticar la eficiencia de la fábrica en un momento determinado, y en particular las pérdidas de materia prima y el gasto de insumos. (Conil, 1996)

## **6.5. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL SECTOR PAPELERO**

En la fabricación de papel a partir de bagazo de caña, la mayor cantidad de residuo líquido, se origina en la máquina de papel, este es conocido con el nombre de aguas blancas, además de éste, están los vertimientos residuales del lavado en la planta de fibra y los de la planta de pulpa que junto con las aguas blancas contienen gran cantidad de productos químicos, a pesar de ser uno de los procesos o tecnologías más limpias en la producción de papel.

La Planta 2 comenzó sus operaciones en 1991 con todos los sistemas de control de aguas residuales, gracias al mejoramiento de la planta de aguas residuales preexistente, mediante la adición de otra laguna de 12 hectáreas y mejorando el sistema motor del clarificador, el de deshidratación de lodos y el de monitoreo de los afluentes.

La PTAR de PROPAL planta II, fue diseñada bajo las normas internacionales y nacionales de la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC) para el control de contaminación de aguas, la planta de tratamiento de efluentes es la más grande en su género en Colombia, y comprende: colectores de efluentes ácidos y cáusticos con control de neutralización; clarificador para remoción de sólidos (85%); laguna de oxidación por descomposición aeróbica de 7 Has. con 18 aireadores y laguna de retención y sedimentación de 13 Has, con un tiempo de retención del agua en efluentes de 17 días. (Disponible en Internet: [www.propal.co.com/\\_p\\_alcalino.htm](http://www.propal.co.com/_p_alcalino.htm))

Las etapas de tratamiento de las aguas residuales realizadas en Propal – planta II son las siguientes (Plan de Manejo Ambiental, 2003):

### **6.5.1. Pretratamiento**

En esta etapa, se efectúa la separación de sólidos gruesos con una rejilla fina y material mediano con una rejilla autolimpiante, seguida de una preneutralización con lechada de cal, pasando luego a un desarenador ciclónico con 45% de eficiencia en remoción de sólidos suspendidos totales (SST). Finalmente en esta etapa se lleva a cabo una neutralización automática (lechada de cal / ácido sulfúrico/CO<sub>2</sub>), para control de pH.

### **6.5.2. Tratamiento primario**

Todo este residuo líquido total es recolectado en un tanque, y de aquí se bombea hacia el sistema de tratamiento cuya primera parte está constituida por un clarificador mecanismo EIMCO (sedimentador), donde se retiran por gravedad los sólidos suspendidos, los cuales son removidos por bombas para ser enviados al sistema de tratamiento de los lodos (deshidratación), y luego ser transportados al depósito de residuos sólidos de la planta. En esta etapa del tratamiento, se logra una eficiencia en remoción de sólidos suspendidos totales (SST) entre el 80 - 87% y de DBO<sub>5</sub> entre el 20 - 25%.

### 6.5.3. Tratamiento secundario

Posteriormente, el gran volumen del agua clarificada, se lleva primero a la laguna de oxidación y luego a la laguna facultativa, donde se descontamina el agua por la acción de microorganismos (bacterias).

- **Laguna de oxidación:** El efluente del clarificador se trata en una laguna de oxidación de 250.000 m<sup>3</sup>, un área de 7.1 hectáreas y 3.5 m de profundidad, la cual por acción de las bacterias aeróbicas, (a las cuales se les suministra oxígeno con 20 aireadores y nutrientes como úrea y fosfato de amonio) depura el agua residual, descontaminándola.

El tiempo de residencia del efluente es aproximadamente de 5 a 6 días antes de pasar a la laguna facultativa.

- **Laguna facultativa:** En esta laguna, se completa el tratamiento biológico por acción de las bacterias facultativas. El volumen de esta laguna es de 468.000 m<sup>3</sup>, un área de 12 hectáreas, 4.5 m de profundidad y un tiempo de retención entre 9 y 11 días aproximadamente, para un total entre 14 y 17 días antes de ser vertido al Río Palo.

Tanto en la laguna de oxidación, como en la facultativa, se tiene un hábitat de patos silvestres, con una población mayor de 1000 ejemplares, la cual es un indicador de la calidad del agua tratada.

- **Laguna de emergencia:** Es una laguna de sedimentación primaria para ser utilizada cuando sea necesario sacar de servicio el clarificador o el sistema de tratamiento de lodos en casos de emergencia, evitando enviar el efluente sin tratamiento a la laguna de oxidación.  
Esta laguna, tiene un volumen útil de 17.091 m<sup>3</sup> aproximadamente, un área de 7.558 m<sup>2</sup> y un tiempo de retención de 8 – 10 horas.

### 6.5.4. Tratamiento de lodos

Los lodos retirados del clarificador son enviados a dos zarandas espesadoras y dos filtros prensa de bandas de doble malla para deshidratar hasta un 30% de sólidos, (80 toneladas de sólidos secos), los cuales son depositados posteriormente en el relleno sanitario de la empresa.

### 6.5.5. Tratamientos internos

Se efectúa recirculación y reuso de aguas calientes y condensados limpios y contaminados. (CRPLM y Min. Medio ambiente, 2003)

- **Torre de enfriamiento:** Mediante este equipo, se disminuye la temperatura de las aguas de sello de las bombas de vacío para volver a ser utilizadas en la misma actividad, en la máquina de papel, reduciendo en un 16% el consumo de agua.
- Recuperación de vapor y de agua industrial utilizada para enfriamiento del sistema de evaporación del licor negro, el cual se aprovecha para el lavado de pulpa café.

- Lavado en contracorriente en la sección de blanqueo, reduciendo vertimientos, consumo de agua y de químicos.

## 6.6. ASPECTOS JURIDICOS RELACIONADOS CON EL PROGRAMA DE CONTROL PARA VERTIMIENTOS INDUSTRIALES

Es función de la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC) evaluar, controlar y hacer seguimiento ambiental de los usos del agua, ello sobre la base del decreto 1594/84 referido a disposiciones sanitarias sobre el recurso, y la Ley 99 de 1993 o Ley del Medio Ambiente, fundamentalmente. Dentro de esta normatividad se inscriben artículos que en forma directa indican cómo, dónde, cuándo y cuáles deben ser los lineamientos legales a aplicar según el caso.

Determinadas con el nombre de usuarios, en el Artículo 72 del Decreto mencionado, las industrias existentes y las nuevas tienen seis parámetros (pH, temperatura, material flotante, grasas y aceites y sólidos suspendidos) con los cuales deben cumplir en forma incondicional, independiente de las que les corresponden de acuerdo a su propia actividad (tabla 3).

**Tabla 3. Valores admisibles de acuerdo al tipo de usuario y al punto de entrega del vertimiento**

| VALORES ADMISIBLES PARA VERTIMIENTOS SEGUN SITIO DE DESCARGA |                             |                                 |                                 |
|--|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| REFERENCIA   | USUARIO                     | EXISTENTE                       | NUEVO                           |
| pH   | Alc/llado de 5 a 9 unidades | Q/da o fuente de 5 a 9 unidades | Q/da o fuente de 5 a 9 unidades |
| Temperatura  | ≤ 40 °C                     | ≤ 40 °C                         | ≤ 40 °C                         |
| Material flotante  | Ausente                     | Ausente                         | Ausente                         |
| Grasas y/o aceites   | Remoción<br>≥ 80%           | Remoción<br>≥ 80%               | Remoción<br>≥ 80%               |
| Sólidos suspendidos totales                                  | Remoción<br>≥ 80%           | Remoción<br>≥ 50%               | Remoción<br>> 0.80%             |
| DBO <sub>5</sub>   | Remoción<br>≥ 80%           | Remoción<br>≥ 30%               | Remoción<br>≥ 80%               |

Actualmente, la Corporación Autónoma Regional del Cauca según Artículo 103 del Decreto 1594/84, otorgó un permiso provisional de vertimientos a la Empresa Productora de Papeles S.A – PROPAL (Resolución 1348 del 31 de diciembre de 2003), mediante el cual se aumenta el porcentaje de remoción a 85% para los parámetros: DBO<sub>5</sub>, DQO, grasas y aceites y sólidos suspendidos totales y adiciona nuevos parámetros a analizar como son: Sólidos sedimentables (SSd), nitrógeno total Kjeldhal (NTK), pH, temperatura, caudal (Q), coliformes fecales y totales. (Disponible en Internet: [www.propal.co.com/\\_p\\_alcalino.htm](http://www.propal.co.com/_p_alcalino.htm))

## 7. ESTADO DEL ARTE

En 1990 PROPAL S.A en una alianza estratégica, adquirió del Instituto de Fomento Industrial – IFI, los activos del proyecto PAPELCO S.A, planta integrada de pulpa y papel sobre la base de fibra de caña de azúcar, ubicada en el Municipio de Caloto, Departamento del Cauca, con una capacidad inicial de producción de 87.000 toneladas, que en el momento de su compra se encontraba en un 85% de instalación y al ser terminada inició operaciones en septiembre de 1991, convirtiéndose en la planta Propal II S.A, la cual actualmente tiene una capacidad instalada de 126.000 toneladas.

Anteriormente en la planta de tratamiento de aguas residuales, se han realizado análisis anuales de diferentes parámetros fisicoquímicos, principalmente nitrógeno en sus diferentes formas, grasas, sulfatos, fosfatos, fenoles, sodio, calcio, magnesio, potasio y metales pesados. Estos análisis fueron contratados por medio de asesores ambientales como Análisis Ambiental y Fumindustrial en los años 2002 y 2003 respectivamente, para determinar el cumplimiento de la normatividad mediante el Decreto 1594/84 (Plan de Manejo Ambiental). Sin embargo no se ha hecho un tratamiento estadístico de éstos, para evaluar la eficiencia de la planta y la calidad del agua tratada para reutilización externa.

Los datos registrados, principalmente, para los análisis de metales pesados y fenoles en el efluente (ver tabla 4), se toman en cuenta con mayor importancia que los demás análisis, debido a que son los contaminantes de menor remoción en las aguas residuales tratadas, además de ocasionar contaminación en el suelo cuando se encuentran en valores mayores a los permitidos, en caso de utilizarse estas aguas en riego agrícola.

**Tabla 4. Datos de fenoles y metales pesados registrados para el efluente de la PTAR**

| Año 2002       |                   |                    |                  |                   |                    |
|----------------|-------------------|--------------------|------------------|-------------------|--------------------|
| ANTES DESCARGA |                   |                    | DESPUES DESCARGA |                   |                    |
| Análisis       | Método            | Resultado          | Análisis         | Método            | Resultado          |
| Fenoles        | Colorimétrico     | < 0.001 mg fenol/L | Fenoles          | Colorimétrico     | < 0.001 mg fenol/L |
| Mercurio       | Absorción atómica | < 0.001 mg Hg/L    | Mercurio         | Absorción atómica | < 0.001 mg Hg/L    |
| Plomo          | Absorción atómica | < 0.01 mg Pb/L     | Plomo            | Absorción atómica | < 0.01 mg Pb/L     |
| Cromo          | Absorción atómica | 0.002 mg Cr/L      | Cromo            | Absorción atómica | 0.01 mg Cr/L       |
| Cadmio         | Absorción atómica | < 0.001 mg Cd/L    | Cadmio           | Absorción atómica | < 0.001 mg Cd/L    |
| Zinc           | Absorción atómica | 0.025 mg Zn/L      | Zinc             | Absorción atómica | 0.04 mg Zn/L       |
| Arsénico       | Absorción atómica | < 0.001 mg As/L    | Arsénico         | Absorción atómica | < 0.001 mg As/L    |

**Continuación tabla 4. Datos de fenoles y metales pesados registrados para el efluente de la PTAR**

| Año 2003       |                   |                  |                  |                   |                  |
|----------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|
| ANTES DESCARGA |                   |                  | DESPUES DESCARGA |                   |                  |
| Análisis       | Método            | Resultado        | Análisis         | Método            | Resultado        |
| Fenoles        | Colorimétrico     | 0.008 mg fenol/L | Fenoles          | Colorimétrico     | 0.011 mg fenol/L |
| Mercurio       | Absorción atómica | N.D              | Mercurio         | Absorción atómica | N.D              |
| Plomo          | Absorción atómica | N.D              | Plomo            | Absorción atómica | N.D              |
| Cromo          | Absorción atómica | 0.01 mg Cr/L     | Cromo            | Absorción atómica | 0.01 mg Cr/L     |
| Cadmio         | Absorción atómica | N.D              | Cadmio           | Absorción atómica | N.D              |
| Zinc           | Absorción atómica | N.D              | Zinc             | Absorción atómica | N.D              |
| Arsénico       | Absorción atómica | N.D              | Arsénico         | Absorción atómica | N.D              |

Fuente: Corporación Autónoma Regional del Cauca, Resultados de laboratorio, análisis fisicoquímico de agua. Asesores ambientales

N.D: No detectable.

Los valores registrados para fenoles y metales pesados del efluente de la PTAR, cumplen con los valores permitidos, según el decreto 1594/84 (ver tabla 5).

**Tabla 5. Valores admisibles para fenoles y metales pesados para la destinación del recurso para consumo humano y doméstico**

| PARAMETRO | DECRETO 1594/84 |
|-----------|-----------------|
| Fenoles   | 0.2 mg/L        |
| Mercurio  | 0.002 mg/L      |
| Plomo     | 0.05 mg/L       |
| Cromo     | 0.05 mg/L       |
| Cadmio    | 0.01 mg/L       |
| Arsénico  | 0.05 mg/L       |
| Zinc      | 15 mg/L         |

Las cargas contaminantes en los últimos tres años (2001-2003) de la Empresa Productora de Papeles S.A, Propal - planta II, realizadas por INGESAM LTDA, son las siguientes (ver tabla 6):

**Tabla 6. Registro histórico de cargas netas de DBO y SST en el efluente final**

| Parámetro                        | Fecha de Muestreo |              |              |              |              |             |              |             |              |
|----------------------------------|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
|                                  | Sep<br>6/01       | Sep<br>11/01 | Sep<br>13/01 | Nov<br>23/01 | Dic<br>18/01 | Jul<br>1/02 | Dic<br>31/02 | Jul<br>4/03 | Dic<br>11/03 |
| <b>EFLUENTE FINAL</b>            |                   |              |              |              |              |             |              |             |              |
| Conc. DBO <sub>5</sub><br>mg/L   | 23                | 25           | 55           | 28           | 31           | 34.7        | 39.3         | 108         | 88           |
| Conc. SST,<br>mg/L               | 33                | 43           | 45           | 62           | -            | 54.8        | 70.6         | 81          | 130          |
| Caudal, L/s                      | 518               | 510.5        | 474.6        | 426          | 389          | 352         | 378          | 291.1       | 224.3        |
| <b>AGUA DE SUMINISTRO</b>        |                   |              |              |              |              |             |              |             |              |
| Conc. DBO <sub>5</sub><br>mg/L   | 1.5               | 0.9          | 1.1          | 1.4          | 3            | 0.7         | 1.1          | 3.1         | 1            |
| Conc. SST,<br>mg/L               | 10                | 10           | 10           | 23           | -            | 36          | 46           | 42          | 63           |
| <b>CARGA NETA</b>                |                   |              |              |              |              |             |              |             |              |
| Conc. DBO <sub>5</sub><br>Kg/día | 963               | 1063         | 2210         | 979          | 941          | 997         | 1051         | 2638        | 1686         |
| Conc. SST,<br>Kg/día             | 1030              | 1455         | 1435         | 1435         | -            | 1100        | -            | 981         | 1298         |

Fuente: Corporación Autónoma Regional del Cauca, Informe de Avance N° 4, 2003

## **8. METODOLOGÍA**

### **8.1. Ubicación**

La industria papelera PROPAL planta II (antes PAPELCOL), está localizada al Nororiente del Municipio de Caloto (Cauca), en su área rural, a 25 Km del Sur de Cali y a 5 Km del Municipio de Puerto Tejada, en la carretera que de Puerto Tejada conduce a Villa Rica, a través de la vía pavimentada que lleva al Ingenio La Cabaña, en la margen derecha del Río Palo, Departamento del Cauca.

La caracterización del afluente y efluente de la planta de tratamiento de las aguas residuales (PTAR), de esta industria, se llevó a cabo en el Laboratorio de Tecnología de Procesos, ubicado en sus instalaciones, y lo correspondiente al análisis de calcio, magnesio y sodio en el Laboratorio de la Secretaría de Agricultura y la determinación de materia orgánica, nitrógeno amoniacal, nitratos, nitritos, sulfatos y fósforo en el Laboratorio del Grupo de Agroquímica - Unicauca (Popayán).

### **8.2. Recopilación y análisis de la información existente sobre el tema**

Se realizó búsqueda vía INTERNET, y desde fuentes directas en la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC), además se contó con la asesoría de una persona experta en el tema de la industria papelera PROPAL planta II y un asesor del Departamento de Química de la Universidad del Cauca, quien realizó visitas mensuales para verificar los avances del trabajo (Director del trabajo de pasantía).

### **8.3 Elaboración plan de muestreo y recolección de muestras para caracterización**

Para la caracterización de los residuos líquidos provenientes de la industria y los lixiviados del patio de almacenamiento de residuos sólidos, se hizo un muestreo al afluente y efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), para facilitar el análisis de éstos.

El muestreo consistió en tomar una muestra acumulada (24 h), mediante muestreador automático (muestras en intervalos de 20 minutos), ubicado en cada punto de muestreo, el cual toma la muestra a 0.46 m con respecto al canal (altura 0.9 m). La muestra fue subdividida en 3 muestras compuestas a excepción de los parámetros de DQO, sólidos suspendidos totales y sólidos sedimentables, tanto para el afluente (entrada al clarificador y salida del clarificador) como para el efluente (salida total), puntos de muestreo que se pueden observar en el gráfico 2, identificados como estación 1, 2 y 3; con un volumen total de 3 L en frascos de plástico (polietileno o equivalente), para realizar todos los análisis propuestos a continuación.



Este muestreo se realizó en los días programados por Propal planta II, en las fechas registradas en los resultados, realizándose dos muestreos en la semana correspondiente, durante 7 meses.

Los resultados se reportaron de acuerdo al muestreo de la siguiente manera (tabla 7).

**Tabla 7. Resultados reportados según el plan de muestreo**

| Parámetro                     | Muestra acumulada por semana para cada punto de muestreo | Total de muestreos | Datos no reportados |
|-------------------------------|--|--------------------|---------------------|
| DBO <sub>5</sub>              | 1  | 11                 | -                   |
| DQO                           | 1  | 11                 | -                   |
| *Sólidos sedimentables        | 1  | 15                 | -                   |
| **Sólidos suspendidos totales | 1  | 11                 | -                   |
| **Temperatura                 | 2  | 23                 | -                   |
| **pH                          | 2  | 23                 | -                   |
| **Porcentaje materia orgánica | 2  | 23                 | 3                   |
| **Sulfuros                    | 2  | 23                 | -                   |
| **Nitritos                    | 2  | 23                 | 1                   |
| **Fósforo                     | 2  | 23                 | -                   |
| **Cloruros                    | 2  | 23                 | -                   |
| **Nitrógeno amoniacal         | 2  | 23                 | -                   |
| **Nitratos                    | 2  | 23                 | 8                   |
| **Sulfatos                    | 2  | 23                 | 8                   |
| **Conductividad               | 2  | 23                 | 8                   |
| **Calcio, magnesio y sodio    | 2  | 23                 | 8                   |

\* Se reportaron un total de 15 muestreos, ya que se realizaron dos muestreos adicionales

\*\* En la primera semana se tomaron 3 muestras acumuladas para cada punto de muestreo

#### 8.4. Tratamiento de la muestra y preservación

Con base en la tabla 8 donde se especifica las recomendaciones necesarias para el muestreo y preservación, se hizo el respectivo muestreo.

Para las muestras con demasiado material en suspensión como las de análisis de sulfuros, nitrógeno amoniacal, cloruros, sulfatos, calcio, magnesio y sodio, se filtraron a través de filtro Whatman 42 y a través de filtro de 25 micras para nitritos y nitratos.

| TABLA 8. RECOMENDACIONES PARA EL MUESTREO Y PRESERVACIÓN<br>DE MUESTRAS DE ACUERDO CON LAS MEDICIONES |             |                               |                  |   |                                    |
|---|-------------|-------------------------------|------------------|---|------------------------------------|
| Determinación   | Recipiente* | Volumen mínimo de muestra, mL | Tipo de muestra* | Preservación  | Almacenamiento máximo recomendado  |
| Cloruro   | P, V        | 50                            | s, c             | No requiere   | 28 d                               |
| Conductividad   | P, V        | —                             | s, c             | Refrigerar  | 28 d                               |
| DBO   | P, V        | —                             | s                | Refrigerar  | 48 h                               |
| DQO   | P, V        | 2,5                           | s, c             | Analizar lo más pronto posible, o agregar H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> hasta pH<2; refrigerar | 28 d                               |
| Nitrógeno:  |             |                               |                  |   |                                    |
| Amoniacal   | P, V        | 1                             | s, c             | Analizar lo más pronto posible, o agregar H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> hasta pH<2; refrigerar | 7 d                                |
| Nitrato   | P, V        | 25                            | s, c             | Analizar lo más pronto posible o refrigerar   | 48 h (28 d para muestras cloradas) |
| Nitrito   | P, V        | 50                            | s, c             | Analizar lo más pronto posible o refrigerar   | 48 h                               |
| pH  | P, V        | —                             | s                | Análisis inmediato  | —                                  |
| Sólidos   | P, V        | 200                           | s, c             | Refrigerar  | 2-7 d                              |
| Sulfato   | P, V        | 10                            | s, c             | Refrigerar  | 28 d                               |
| Sulfuro   | P, V        | 200                           | s, c             | Refrigerar; agregar 4 gotas de acetato de zinc 2N/100 mL; agregar NaOH hasta pH>9               | 7 d                                |

CONTINUACION TABLA 8. RECOMENDACIONES PARA EL MUESTREO Y PRESERVACIÓN DE MUESTRAS DE ACUERDO CON LAS MEDICIONES

| Determinación    | Recipiente* | Volumen mínimo de muestra, mL | Tipo de muestra* | Preservación  | Almacenamiento máximo recomendado |
|------------------|-------------|-------------------------------|------------------|---|-----------------------------------|
| Temperatura      | P, V        | —                             | s                | Análisis inmediato  | —                                 |
| Calcio, magnesio | P, V        | 5                             | s, c             | Refrigerar. En el momento de la lectura agregar 10 mL de óxido de lantano 1%. Utilizar agua desionizada | 28 d                              |
| Sodio            | P, V        | 2,5                           | s, c             | Refrigerar  | 28 d                              |
| Fósforo          | P, V        | 2                             | s, c             | Refrigerar  | 7 d                               |

\*P = plástico (polietileno o equivalente); V = vidrio

\*s = simple o puntual; c = compuesta.

Todas las muestras se almacenaron a 4° C sin congelación, para ser preservadas para su posterior análisis.

## 8.5 Caracterización del afluente y efluente muestreado

A las muestras recolectadas se les determinaron los siguientes parámetros, según las metodologías estandarizadas. Los métodos para el análisis físico entre ellos sólidos suspendidos totales y sólidos sedimentables del afluente y efluente y algunos análisis químicos como DBO, DQO, se encuentran estandarizados en la Empresa Productora de Papeles S.A Propal-planta II. Los demás métodos relacionados a continuación, se encuentran estandarizados por el Laboratorio del Grupo de Agroquímica de la Universidad del Cauca (Manual de prácticas de química agrícola, 2002), a excepción de la determinación de sodio, calcio, magnesio y potasio que se encuentran estandarizados en el laboratorio de la Secretaría de Agricultura y serán aplicados a la evaluación cuantitativa de los parámetros mencionados.

Los métodos propuestos, servirán para el montaje y diseño de las técnicas en el laboratorio de Tecnología de Procesos de la industria papelera PROPAL.

### 8.5.1 Análisis físico

- **Temperatura:**

Se determinó en el sitio de muestreo con termómetro Celsius de mercurio graduado con escala cada 0.1 °C, sumergiéndolo en el agua y la lectura se realizó después de un período suficiente (estabilización del nivel de mercurio).

- **Sólidos suspendidos totales:**

Se determinó mediante filtración de volúmenes mayores a 10 mL (dependiendo de la carga), en filtro Whatman de 1 $\mu$  con posterior secado del residuo a 105 °C. Se calcula por diferencia de peso.

- **Sólidos sedimentables:**

Se determinó volumétricamente mediante el uso del cono Inhoff, después de dejar el agua en reposo durante 1 hora y se reportaron en mL/L.

- **Conductividad:**

La conductividad se midió con un conductímetro Model 135 A – 136 S de lectura directa en  $\mu$ mho/cm a 25 °C con un error menor del 0,5%, previa calibración con solución patrón de KCl 0.01 M.

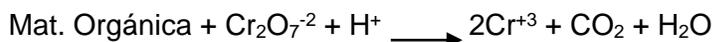
### 8.5.2 Análisis químico

- **pH:**

Se midió en forma instrumental empleando un pH metro BECQMAN, en muestras puntuales, previa calibración con soluciones tampón de referencia de pH 4 y 7.

- **DQO:**

Se determinó con diluciones de la muestra de 20/500 mL y posterior oxidación de la mayoría de las formas de materia orgánica, mediante la digestión de la muestra (2,5 mL), con una mezcla de ácido sulfúrico – sulfato de plata (3,5 mL) más sulfato de mercurio – ácido sulfúrico - dicromato de potasio (1,5 mL). Estos volúmenes se adicionaron a tubos de reacción colorimétricos y la mezcla se sometió a digestión en un reactor de digestión HACH por dos horas; durante este período, el material orgánico oxidable reduce una cantidad equivalente de dicromato. La reacción es la siguiente:



El consumo de oxígeno se midió a una longitud de onda de 603 nm en un espectrofotómetro visible HACH DR-2000 con un porcentaje de error de  $\pm$ . 3 nm y un máximo de detección de 800 ppm.

- **DBO:** método Winkler

Se realizó tomando alícuotas de la muestra con o sin dilución previamente neutralizadas, revisando los consumos anteriores (referencia consumos menores de 2 ppm) y se distribuyeron para un total de cuatro siembras.

Posteriormente se adicionaron 2 mL de inóculo (cultivo mixto), previamente preparado en agua desmineralizada y neutralizada y agua de dilución especialmente preparada de modo que existan nutrientes (buffer de fosfato, solución de sulfato de magnesio, solución de cloruro de calcio y solución de cloruro férrico, adicionándose 1 mL por cada litro de agua de dilución), y oxígeno disponibles durante el periodo de incubación. Se prepararon los controles de inóculo, los controles de ácido glutámico más glucosa y el blanco y se tomó el oxígeno inicial con electrodo para medición de oxígeno disuelto YSI Model 58, previamente calibrado con respecto a la temperatura ambiente con un porcentaje de error de  $\pm$ . 2 °C .

Luego se sometieron las muestras, controles de inóculo, controles de ácido glutámico más glucosa y el blanco a un período de incubación en incubadora LAB LINE INSTRUMENT durante 5 días a una temperatura de 20°C y se midió el oxígeno final.

La DBO se determina mediante la siguiente fórmula:

$$\text{DBO mg/L} = ((D_1 - D_2) - (B_1 - B_2)) f / P$$

$D_1$  = Oxígeno disuelto inicial de la muestra inmediatamente después de la preparación, mg/L

$D_2$  = Oxígeno disuelto final de la muestra después de la incubación 5 días a 20 °C, mg/L

$B_1$  = Oxígeno disuelto inicial del control de inóculo, mg/L

$B_2$  = Oxígeno disuelto final del control de inóculo después de la incubación 5 días a 20 °C, mg/L

$F$  = Volumen de inóculo en la muestra / volumen de semilla en el control de semilla

$P$  = fracción volumétrica decimal de la muestra empleada

- **Contenido de nitratos:** método espectrométrico

Se filtró la muestra al vacío en membranas de filtración de 0.45  $\mu$  de diámetro de poro. Posteriormente la muestra (50 mL) se trató con 1 mL de HCl 1 N (previene la interferencia de hidróxidos y carbonatos) y se leyó a una longitud de onda de 220 nm en un espectrofotómetro UV/VIS DMS 100 con un rango de detección de 900 – 350 nm para la lámpara visible y 350 – 190 nm para la lámpara ultravioleta; previa calibración del equipo y barrido del blanco entre 190 a 240 nm.

Para la determinación de nitratos, se extrapolaron los datos obtenidos de la muestra a la curva patrón (soluciones patrón de nitratos: 0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1 y 2 ppm), realizada con anterioridad a partir de un patrón de 100 ppm de  $\text{KNO}_3$ .

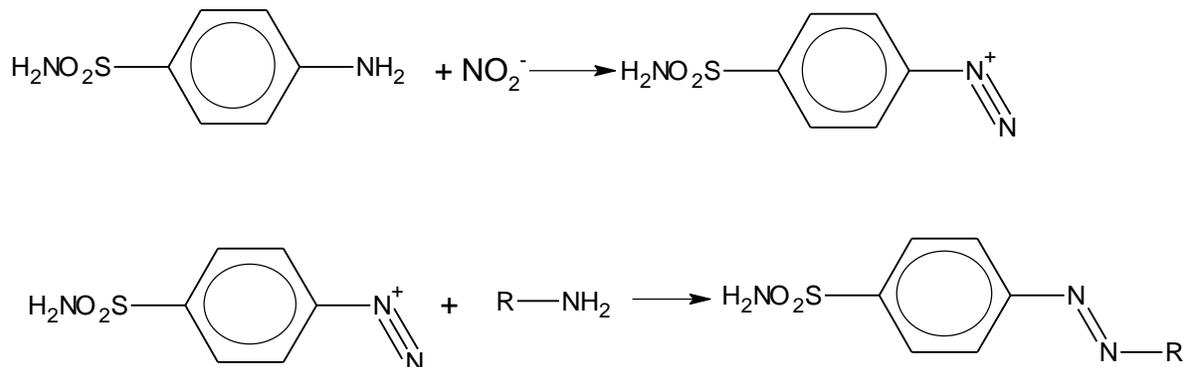
En esta determinación hay interferencia por materia orgánica, por esta razón, se lee a una longitud de 275 nm y se resta de la lectura de la muestra.

- **Contenido de nitritos:** método de Griess

Se filtró la muestra al vacío en membranas de filtración de 0.45  $\mu$  de diámetro de poro. Posteriormente a la muestra (50 mL), se le adicionó 1 mL de sulfanilamida y luego de 5 minutos, 1 mL de solución de diclorhidrato N-(1-naftil)-etilén-diamina 0.1%. Luego de 10 minutos, se leyó a una longitud de onda de 543 nm en un espectrofotómetro VIS 20 GENESYS con un rango de longitud de onda de 325 – 1100 nm con exactitud de onda de  $\pm$  2 nm.

Para la determinación de nitritos, se extrapolaron los datos obtenidos de la muestra a la curva patrón (soluciones patrón de nitritos: 0, 0.02, 0.05, 0.1, 0.15, 0.20 ppm), realizada con anterioridad a partir de un patrón de solución de nitrógeno nitroso  $\text{NaNO}_2$  1 ppm, previamente estandarizada a partir de una solución de 150 ppm. También se realizó un blanco.

Este método se basa en la reacción entre la sulfanilamida y el nitrito para dar un diazocompuesto que posteriormente reacciona con una amina aromática (cloruro de N-[1-naftil] etilendiamonio) para dar un compuesto coloreado, que presenta un máximo de absorción a 543 nm, de acuerdo con el siguiente esquema de reacciones:



- **Nitrógeno amoniacal:** método de destilación con arrastre de vapor

Se tomaron 5 mL de muestra previa neutralización y determinación del porcentaje de carbono y se transfirió a tubos Kjeldhal. Posteriormente se adicionó 7 mL de ácido sulfúrico concentrado y se diluyó con 50 mL de agua destilada.

A continuación se colocó el tubo Kjeldhal en la unidad de destilación Model K-314 BUCHI y se agregó NaOH al 32% hasta completar un volumen de 100 mL. Se destiló la muestra y se recogió sobre 15 mL de ácido bórico al 4% con indicador mixto (solución rosada). Se recogió 100 mL de destilado para asegurar la presencia de nitrógeno (cambio del indicador mixto de rosado a verde).

Posteriormente se tituló la muestra con ácido sulfúrico 0.1 N (cambio de color del indicador de verde a rosado) y se calculó la cantidad de nitrógeno amoniacal  $\text{N}-\text{NH}_4$  (ppm N) por medio de la siguiente fórmula:

$$\text{N}-\text{NH}_4 \text{ (ppm N)} = (\text{M}-\text{B}) \times \text{N} \times 14000 / \text{Pm}$$

donde:

M = mL de ácido sulfúrico consumidos por la muestra

B = mL de ácido sulfúrico consumidos por el agua destilada (blanco)

N = Normalidad de la solución de ácido sulfúrico

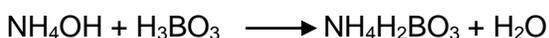
Pm = Peso de la muestra =  $V_m \times \rho$

$V_m$  = Volumen de la muestra

$\rho$  = Densidad de la muestra

Las reacciones llevadas a cabo en este procedimiento son las siguientes:

- ❖ El destilado se recoge sobre ácido bórico. La reacción es la siguiente:



La presencia de borato de amonio, se observa con el cambio de color de rosado a verde del indicador mixto (rojo de metilo y verde de bromocresol).

- ❖ La tercera y última etapa consiste en titular el borato de amonio con ácido clorhídrico 0.1 N hasta observarse cambio de color del indicador (verde a rosado). La reacción correspondiente es:



Simultáneamente se realiza un blanco.

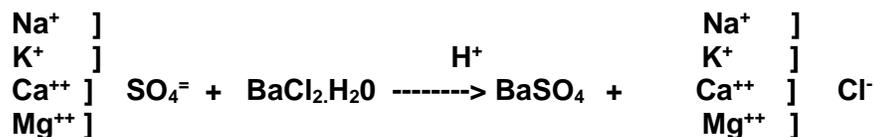
- **Contenido de sulfatos:** método turbidimétrico

Se filtró la muestra al vacío en papel filtro Whatman 42. Posteriormente a la muestra (10 mL), se le adicionó 5 mL de bacto gelatina y 0.5 g de cloruro de bario, se dejó en reposo 5 minutos y se realizó la lectura hasta estabilización de la solución con un tiempo total de 10 minutos.

Luego de 10 minutos, se leyó a una longitud de onda de 420 nm en un espectrofotómetro VIS 20 GENESYS con un rango de longitud de onda de 325 – 1100 nm con exactitud de onda de  $\pm$  2 nm.

Para la determinación de sulfatos, se extrapolaron los datos obtenidos de la muestra a la curva patrón (soluciones patrón de sulfatos: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10 ppm), realizada con anterioridad a partir de un patrón de solución de sulfatos de 100 ppm. También se realizó un blanco.

La reacción llevada a cabo en este procedimiento es la siguiente:



- **Contenido de cloruros:** método de Mohr

Se filtró la muestra al vacío en papel filtro Whatman 42. Posteriormente se tomaron 50 mL de muestra y se le agregó 1 mL del indicador de cromato de potasio al 5% el cual da a la muestra un color amarillo vidrioso. Luego se tituló la muestra con la solución valorada de nitrato de plata 0.1 N hasta cambio de color (café rojizo).

La cantidad de cloruros se calculó por medio de la siguiente fórmula:

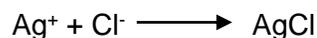
$\text{mg/L de Cl}^- = (A-B) \times N \times 35450 / \text{mL de muestra}$   
donde:

A = mL de nitrato de plata consumidos por la muestra

B = mL de nitrato de plata consumidos por el agua destilada (blanco)

N = Normalidad de la solución de nitrato de plata

En este método, se usa nitrato de plata ( $\text{AgNO}_3$ ) en la titulación del ión cloruro, el cual precipita como cloruro de plata blanco.



Para estimar la cantidad de  $\text{AgNO}_3$  necesaria para reaccionar con todo el cloruro existente en la muestra, se precisa determinar el punto de viraje en el que todo el cloruro se ha precipitado como cloruro de plata.

Este punto no se puede detectar a simple vista a menos que se agregue un indicador a la muestra. Este indicador es cromato de potasio ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ). Una vez que se ha agotado el ión cloruro, los iones de plata reaccionan con el cromato y forman un precipitado café rojizo.



Para el cálculo del contenido de cloruros, se realizó la titulación de un blanco para corregir cualquier error introducido en el método.

- **Contenido de sulfuros:** método yodométrico

Se filtró la muestra (200 mL) al vacío en papel filtro Whatman 42. Luego se añadió 20 mL de solución de  $\text{KI} / \text{I}_2$  0.0250N y 2 mL de  $\text{HCl}$  6N. Se llevó con la pipeta 200 mL de muestra al matraz, descargando la pipeta bajo la superficie de la solución.

Posteriormente se tituló el yodo liberado con tiosulfato sódico 0.0250N, previamente estandarizado con solución patrón de yodato de potasio  $\text{KIO}_3$  0.0021 M; adicionando un exceso hasta observar un color paja pálido, en este punto, se añadieron unas gotas de solución de almidón y se siguió titulando con tiosulfato sódico hasta observar que desapareciera el color azul producido por el complejo almidón-yodo. Adicionalmente se realizó un blanco.

La cantidad de sulfuros se calculó por medio de la siguiente fórmula:

$\text{mg S}^{2-} / \text{L} = [ (A * B) - (C * D) ] * 16000 / \text{mL de muestra}$

A = mL de solución de tiosulfato sódico gastados en el blanco.

B = normalidad de la solución de yodo.  
C = mL de solución de tiosulfato sódico gastados en la muestra.  
D = normalidad de la solución de tiosulfato sódico.

Los sulfuros presentes en la muestra reaccionan con yodo en solución ácida y se oxidan en azufre.



### 8.5.3 Valoración química del contenido nutricional

Con el fin de conocer el contenido nutricional del afluente y efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), se realizaron las siguientes determinaciones:

- **Materia orgánica:** método Walckley-Black

Se determinó tomando 4 mL de muestra y se le adicionaron 2.5 mL de  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  1N y 5 mL de ácido sulfúrico concentrado. Se agitó por 30 segundos y se dejó enfriar la solución aproximadamente 30 minutos. Cumplido este tiempo, se adicionaron 25 mL de agua destilada, 2.5 mL de ácido fosfórico y tres gotas del indicador ferroína.

Se tituló la muestra con sulfato ferroso 0.5 N hasta un color rojizo, previa estandarización con dicromato de potasio 1N.

Para este procedimiento se realiza un patrón de glucosa que no debe exceder el % Corg glucosa teórico (40.5%).

La cantidad de materia orgánica se calculó por medio de la siguiente fórmula:

$$\% \text{Corg} = (\text{Vol b} - \text{Vol m}) \times \text{N} \times 0,003 \times 100 / \text{Wm}$$

$$\% \text{M.O} = \% \text{Corg} \times 1.724$$

$$\text{Peso de la muestra} = \text{Wm} = \text{Vm} \times \rho$$

$$\text{Densidad de la muestra} = \rho$$

$$\text{Volumen de la muestra} = \text{Vm}$$

$$\text{Normalidad de FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = \text{N}$$

$$\text{Volumen de FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} \text{ gastado en el blanco} = \text{Vol b}$$

$$\text{Volumen de FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} \text{ gastado en la muestra} = \text{Vol m}$$

Este método consiste en oxidar una fracción del carbono orgánico total presente en el agua residual, basándose en la reducción del dicromato de potasio (agente oxidante fuerte), reacción llevada a cabo en medio ácido (ácido sulfúrico concentrado), como se muestra a continuación:



Dado a que solo se oxida aproximadamente el 77% de carbono orgánico, queda materia orgánica sin reaccionar, en una cantidad equivalente al exceso de dicromato de potasio utilizado, el cual se determina volumétricamente con una solución de sulfato de hierro ácido utilizando como indicador ferroína (o-fenantrolina + sulfato ferroso). El punto final donde todo el hierro se oxida, se distingue con una coloración marrón.

La reacción llevada a cabo en la valoración es:



Previamente se realiza un blanco que consta de solución de dicromato de potasio 1 N con ácido sulfúrico.

- **Determinación de fósforo, sodio, calcio y magnesio**

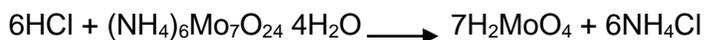
- ❖ **Fósforo:**

Se filtró la muestra al vacío en papel filtro Whatman 42. Posteriormente a la muestra (2 mL), se le adicionó 18 mL de solución coloreadora.

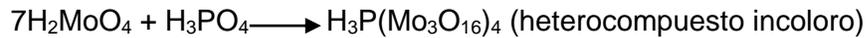
Las muestras se leyeron a una longitud de onda de 660 nm en un espectrofotómetro VIS 20 GENESYS con un rango de longitud de onda de 325 – 1100 nm con exactitud de onda de  $\pm$  2 nm.

Para la determinación de fósforo, se extrapolaron los datos obtenidos de la muestra a la curva patrón multiplicando por el factor 2/20 al igual que los patrones (soluciones patrón de fósforo: 0, 0.5, 1, 2, 5, 10 y 15 ppm), realizada con anterioridad a partir de un patrón de solución de fósforo de 50 ppm. También se realizó un blanco.

Este procedimiento se basa en la formación de un complejo de fósforo con ácido molibdico, que absorbe a una longitud de onda de 660 nm. El método cloro molibdico utiliza una solución de  $\text{HCl}-(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  donde al reaccionar produce el ácido molibdico como se muestra a continuación:



La formación del complejo ocurre así:



Este último compuesto formado se reduce con cloruro de estaño en presencia de ácido clorhídrico, formando un compuesto de color azul que absorbe a la longitud de onda antes mencionada.

❖ **Sodio, calcio, magnesio:**

Se determinó mediante la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica en el filtrado, previa extracción mediante la digestión Perclórico:Nítrico (3:1). Se leyó cada elemento a su respectiva longitud de onda 740, 422.7, 285.2 nm. Análisis realizado en los Laboratorios de la Secretaría de Agricultura en Popayán Cauca.

Para la eliminación de interferencias se adicionó óxido de lantano al 1% para la lectura de calcio y magnesio.

## **8.6 Análisis y manejo de datos**

En las tablas de resultados se presentan los valores medios de cada fecha programada de muestreo, en cada punto de muestreo para los parámetros de control descritos anteriormente, registrados durante los siete meses de evaluación.

Con el objeto de validar los resultados obtenidos en el análisis de las muestras de aguas residuales, se aplicó un tratamiento estadístico con pruebas paramétricas, con el objeto de que los datos se ajusten a la normalidad y/o pruebas no paramétricas, mediante una base de datos, donde se tabularon. Para ello, se utilizó el método de análisis de varianza (ANOVA), para determinar diferencias entre los resultados y una prueba de Duncan, para interpretar las diferencias entre los resultados de un punto de muestreo y otro. También se realizaron correlaciones de Pearson y Spearman, para interpretar las correlaciones entre los parámetros analizados, de los cuales los que presentaron correlación significativa, se les realizó la respectiva gráfica de correlación.

## **8.7 Elaboración de un informe de resultados preliminares para el posible uso y gestión del recurso hídrico en riego agrícola**

Mediante la determinación de la calidad del agua residual antes (entrada al clarificador) y después del tratamiento (salida total), se sugirió la posibilidad de un mejoramiento en la gestión

del recurso hídrico, en cuanto al uso externo para riego agrícola, incluyendo una comparación e interpretación preliminar de su uso potencial, de acuerdo a los niveles críticos que plantean las normas internacionales para aguas de riego y los usos del suelo en la región.

### **8.8 Elaboración y presentación informe final**

Se elaboraron informes mensuales de avance y un informe final con todos los resultados obtenidos y su análisis respectivo.

## **9. ANALISIS DE RESULTADOS**

### **9.1 Análisis físico y químico de los efluentes entrada al clarificador, salida del clarificador y salida total de la planta de tratamiento de aguas residuales, PTAR:**

#### **9.1.1 Análisis físico:**

##### **9.1.1.1 Caracterización de sólidos sedimentables y sólidos suspendidos totales:**

El agua residual contaminada de las fábricas de pasta y de papel puede causar la muerte de organismos acuáticos y permite la bioacumulación de compuestos tóxicos en los peces. Los vertidos de las aguas residuales de pasta y papel se caracterizan, según criterios físicos, químicos o biológicos, por ser los más importantes en contenido en sólidos, demanda de oxígeno y toxicidad. (Austin, 1988)

El contenido en sólidos se clasifica típicamente sobre las bases de la fracción en suspensión (no disuelta), la fracción de sólidos en suspensión que es sedimentable y las fracciones respectivas que son volátiles. La fracción sedimentable es la más nociva, porque puede formar una densa capa de cieno junto al punto de desagüe, que rápidamente reduce el oxígeno del agua recibida y permite la proliferación de bacterias anaerobias que generan metano y gases de azufre reducido. (Tebbutt, 1995)

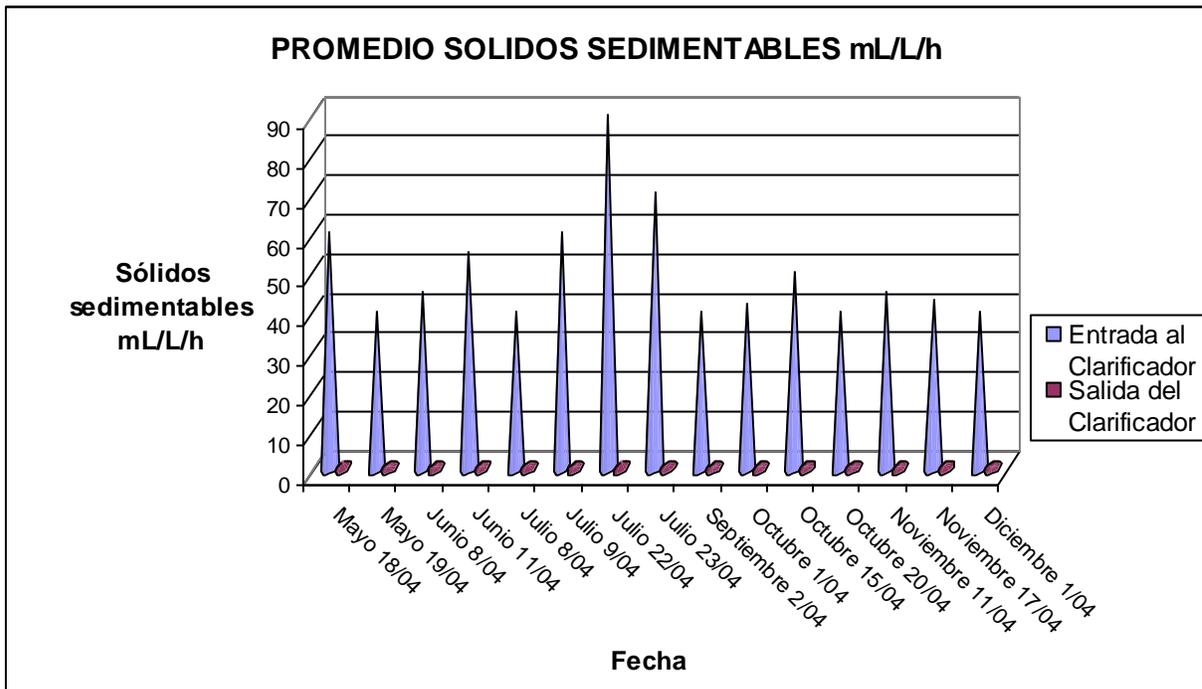
Mediante el tratamiento primario (clarificador), en la planta de tratamiento de aguas residuales, PTAR, se pretende eliminar la materia en suspensión sedimentable, para lo cual se emplean decantadores donde sedimenta, por acción de la gravedad, una buena parte de la contaminación. (Rojas, 1996)

Con respecto a los sólidos sedimentables (ver tabla 9, gráfica 3), se observa que el tratamiento primario mencionado anteriormente, es altamente eficiente en la remoción de éstos con un porcentaje de remoción del 99,1% aproximadamente, siendo de esta manera totalmente eliminados en este tratamiento y por esta razón los valores registrados para la salida total fueron nulos.

**Tabla 9. Valores de sólidos sedimentables para los efluentes entrada al clarificador, salida del clarificador y salida total de la PTAR**

| Fecha           | Promedio sólidos sedimentables mL/L/h |                         |              |  |
|-----------------|---------------------------------------|-------------------------|--------------|--|
|                 | Entrada al Clarificador               | Salida del Clarificador | Salida total | Eficiencia en depuración de tanto por ciento |
| Mayo 18/04      | 60                                    | 1,5                     | 0            | 97,5   |
| Mayo 19/04      | 40                                    | 0,3                     | 0            | 99,2   |
| Junio 8/04      | 45                                    | 0,3                     | 0            | 99,3   |
| Junio 11/04     | 55                                    | 0,1                     | 0            | 99,8   |
| Julio 8/04      | 40                                    | 0,6                     | 0            | 98,5   |
| Julio 9/04      | 60                                    | 0,3                     | 0            | 99,5   |
| Julio 22/04     | 90                                    | 1,5                     | 0            | 98,3   |
| Julio 23/04     | 70                                    | 0,5                     | 0            | 99,2   |
| Septiembre 2/04 | 40                                    | 0,3                     | 0            | 99,2   |
| Octubre 1/04    | 42                                    | 0,3                     | 0            | 99,3   |
| Octubre 15/04   | 50                                    | 0,3                     | 0            | 99,4   |
| Octubre 20/04   | 40                                    | 0,2                     | 0            | 99,5   |
| Noviembre 11/04 | 45                                    | 0,1                     | 0            | 99,8   |
| Noviembre 17/04 | 43                                    | 0,5                     | 0            | 98,8   |
| Diciembre 1/04  | 40                                    | 0,1                     | 0            | 99,8   |

**Gráfica 3. Promedio de sólidos sedimentables para los efluentes entrada al clarificador y salida del clarificador de la PTAR**



Mediante el Análisis de Varianza (ANOVA anexo 1), se encuentra una diferencia altamente significativa ( $p= 0,000$ ) entre los puntos de medida, entrada al clarificador y salida del clarificador a través del tiempo de muestreo para el parámetro de sólidos sedimentables.

Mediante la comparación múltiple de Duncan (tabla 10), se especifica entre cuales de los sitios muestreados se encuentra esta significancia o diferencia, observándose que en promedio los sólidos sedimentables entran al clarificador con una concentración de 50,67 mg/L y éstos son removidos por medio de éste hasta una concentración promedio de 0,4600 mg/L, siendo el tratamiento primario altamente eficiente durante los siete meses de muestreo, pues tanto por el análisis mes a mes como por el general, se encontró este mismo comportamiento.

**Tabla 10. Prueba de Duncan para el parámetro sólidos sedimentables en los tres sitios de muestreo**

| SOLIDOS SEDIMENTABLES   |    |                      |         |
|-------------------------|----|----------------------|---------|
| Duncan <sup>a,b</sup>   |    |                      |         |
| SITIO                   | N  | Significancia = 0.05 |         |
|                         |    | 1                    | 2       |
| SALIDA TOTAL            | 15 | 0.0000               |         |
| SALIDA DEL CLARIFICADOR | 15 | 0.4600               |         |
| ENTRADA AL CLARIFICADOR | 15 |                      | 50.6667 |
| Sig.                    |    | 0.861                | 1.000   |

Los sólidos en suspensión vertidos por las fábricas de pasta y de papel contienen arena, aditivos de la fabricación de papel, sedimentos del licor, subproductos de los procesos de tratamiento de aguas y células microbianas de las operaciones del tratamiento secundario.

Aunque los sólidos no sedimentables generalmente se diluyen en las aguas circulantes y son, por consiguiente, de menos relevancia, pueden transportar compuestos orgánicos e inorgánicos tóxicos para los organismos acuáticos. (Austin, 1988)

Como se observa en la tabla 11 y en la gráfica 4, a lo largo del tratamiento primario y secundario, la remoción de los sólidos suspendidos totales es alta ya que los sólidos suspendidos totales en la entrada del clarificador oscilan entre 3240 y 1000 mg/L y se obtiene al final una cantidad considerablemente baja de éstos, valores entre 125 y 68 mg/L que no afectaría la fuente de vertido, a pesar de presentar un incremento en los meses de Octubre a Diciembre en el efluente final como consecuencia del arrastre de sólidos de la zona quieta de la laguna de oxidación, debido a las intensas lluvias presentadas durante estos meses.

La meta establecida por la Corporación Regional del Cauca (CRC), para el parámetro fisicoquímico correspondiente a los sólidos suspendidos totales es de 5.000 Kg/día para vertimientos a cuerpos de agua, procedente del efluente de la salida total de la planta de tratamiento de agua residual, PTAR. El promedio para este parámetro a lo largo de los meses de Mayo a Diciembre es de 3.699 Kg/día, cumpliendo de esta manera con la meta establecida.

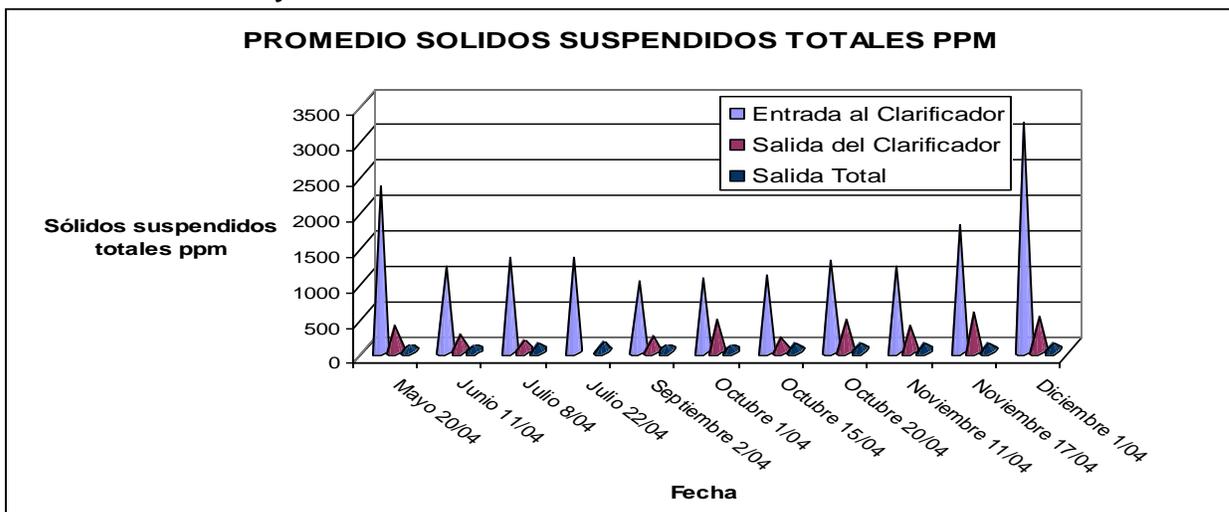
A pesar de que la carga en el efluente de salida total no supera el valor establecido, el tratamiento secundario no alcanza el valor de remoción de carga tipificado por la norma colombiana en el Decreto 1594/84, artículo 72 (remoción  $\geq 80\%$  en carga), para vertimientos a cuerpos de agua.

**Tabla 11. Valores de sólidos suspendidos totales para los efluentes entrada al clarificador, salida del clarificador y salida total de la PTAR**

| Fecha           | Promedio Sólidos Suspendidos Totales ppm |                         |              |                   |                        |  |
|-----------------|--|-------------------------|--------------|-------------------|------------------------|--|
|                 | Entrada al clarificador                  | Salida del clarificador | Salida total | Flujo Galones/min | Salida total en Kg/día | Eficiencia en depuración de tanto por ciento |
| Mayo 20/04      | 2330                                     | 360                     | 79           | 6419              | 2764                   | 78,1   |
| Junio 11/04     | 1195                                     | 235                     | 75           | 6364              | 2602                   | 68,1   |
| Julio 8/04      | 1322                                     | 164                     | 117          | 6197              | 3952                   | 28,7   |
| Julio 22/04     | 1335                                     | D.D                     | 140          | 6389              | 4875                   | -  |
| Septiembre 2/04 | 1000                                     | 212                     | 68           | 6467              | 2397                   | 68   |
| Octubre 1/04    | 1042                                     | 452                     | 78           | 6020              | 2559                   | 82,7   |
| Octubre 15/04   | 1090                                     | 190                     | 120          | 6570              | 4297                   | 36,8   |
| Octubre 20/04   | 1287                                     | 443                     | 111          | 6473              | 3916                   | 75   |
| Noviembre 11/04 | 1200                                     | 368                     | 122          | 6550              | 4355                   | 66,8   |
| Noviembre 17/04 | 1793                                     | 564                     | 125          | 6942              | 4730                   | 77,8   |
| Diciembre 1/04  | 3240                                     | 484                     | 119          | 6580              | 4278                   | 75,4   |
| TOTAL           |  |                         |              |                   | 3699                   | 60   |

\* D.D: dato dudoso

**Gráfica 4. Promedio de sólidos suspendidos totales para los efluentes entrada al clarificador, salida del clarificador y salida total de la PTAR**



Después del tratamiento estadístico aplicado (ANOVA ver anexo 1), existe diferencia altamente significativa ( $p= 0,000$ ), entre los tres sitios de medida y en el tiempo para el parámetro de sólidos suspendidos totales.

Por medio de la comparación múltiple de Duncan, se observa que la diferencia a lo largo de los siete meses de muestreo es más clara que en el análisis mes a mes, y se encuentra realmente entre el efluente de la entrada del clarificador y los efluentes de la salida del clarificador y salida total, observándose una remoción altamente significativa a través del tratamiento primario y un poco menor en el tratamiento secundario (ver tabla 12).

**Tabla 12. Prueba de Duncan para el parámetro sólidos suspendidos totales en los tres sitios de muestreo**

| SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES      |    |                      |           |
|----------------------------------|----|----------------------|-----------|
| Duncan <sub>b</sub> <sup>a</sup> |    |                      |           |
| SITIO                            | N  | Significancia = 0.05 |           |
|                                  |    | 1                    | 2         |
| SALIDA TOTAL                     | 11 | 104.9091             |           |
| SALIDA DEL CLARIFICADOR          | 10 | 347.2000             |           |
| ENTRADA AL CLARIFICADOR          | 11 |                      | 1529.4545 |
| Sig.                             |    | 0.183                | 1.000     |

En cuánto al análisis de correlación de Pearson (prueba paramétrica ver anexo 2) y el análisis de correlación de Spearman (prueba no paramétrica ver anexo 3), para el efluente de salida total con los parámetros que podría relacionarse como pH y sulfatos tiene una correlación negativa, es decir que al disminuir el valor de estos dos parámetros disminuyen los sólidos suspendidos totales.

Probablemente esto se podría explicar debido a que en el proceso de la obtención de papel a partir del bagazo de caña, se utilizan diferentes fuentes de sulfatos tales como ácido sulfúrico y sulfatos de aluminio y parte de ellos pueden pasar como residuos a la PTAR. Algunos de estos sulfatos pueden ser solubles como por ejemplo el sulfato de sodio, pero otros insolubles como el sulfato de calcio, donde formarían parte de los sólidos totales, no obstante a los sólidos suspendidos totales pasarían los sulfatos insolubles, por esto entre mayor sea el contenido de sulfato en solución menor será el contenido de sólidos suspendidos totales, sin embargo la correlación no es significativa ( $p = 0,702$ ) lo que indica que no depende totalmente de este parámetro, sino que hay otros parámetros que influyen en este aumento de sólidos suspendidos totales.

En cuanto a la relación de los sólidos suspendidos totales con el pH, también se observa una correlación negativa, pero en la tabla 15 se ve en todos los muestreos para el efluente de salida total, que los valores de pH se encuentran entre 7,16 y 8,06, y en este rango no habría solubilidad del sulfato de calcio, por esto no aumentarían los sulfatos en solución y se podría explicar este comportamiento, aún cuando no es significativo ( $p = 0,596$ ), indicando así que solamente es una influencia.

Con respecto a la materia orgánica su correlación es positiva con los sólidos suspendidos totales, es decir que al aumentar ésta, aumentan los sólidos suspendidos totales ya que aumentaría el contenido de sustancias orgánicas insolubles. Sin embargo, la correlación no es significativa (0,618).

### 9.1.1.2 Caracterización de temperatura:

El parámetro de la temperatura (ver tabla 13), posee un comportamiento relativamente constante en los tres puntos de muestreo en función del tiempo (entrada al clarificador, salida del clarificador y salida total), característica que se aprecia con mayor claridad en la gráfica correspondiente (gráfica 5). En cuanto a este parámetro, las aguas residuales tratadas (efluente salida total) que son conducidas a la fuente de vertido cumplen con la norma colombiana establecida mediante el Decreto 1594/84, artículo 72 ( $T^{\circ} \leq 40^{\circ} C$ ).

Sin embargo, las temperaturas entre 39,5 – 40 °C del efluente de la salida del clarificador, podrían estar afectando la temperatura total de las lagunas de oxidación y facultativa, ocasionando detenciones importantes en la actividad fotosintética, relacionadas con la estimulación del crecimiento de algas verdeazules (cianofíceas), menos productivas que las algas verdes (clorofíceas) a las que sustituyen (W.H.O., 1987).

Con respecto a la actividad microbial, la temperatura del efluente de la salida del clarificador no supera la temperatura de decrecimiento microbial, ya que la tasa de crecimiento microbial se incrementa hasta temperaturas entre 35 °C y 38 °C, temperatura máxima en la cual el crecimiento microbial empieza a decrecer por la presencia de organismos termófilos que están presentes a partir de temperaturas de 40 °C, cuya tasa de descomposición es más lenta. (Romero J.A, 1998). En este caso, la actividad microbial no está siendo afectada en las lagunas de oxidación y facultativa por la temperatura del efluente de la salida del clarificador.

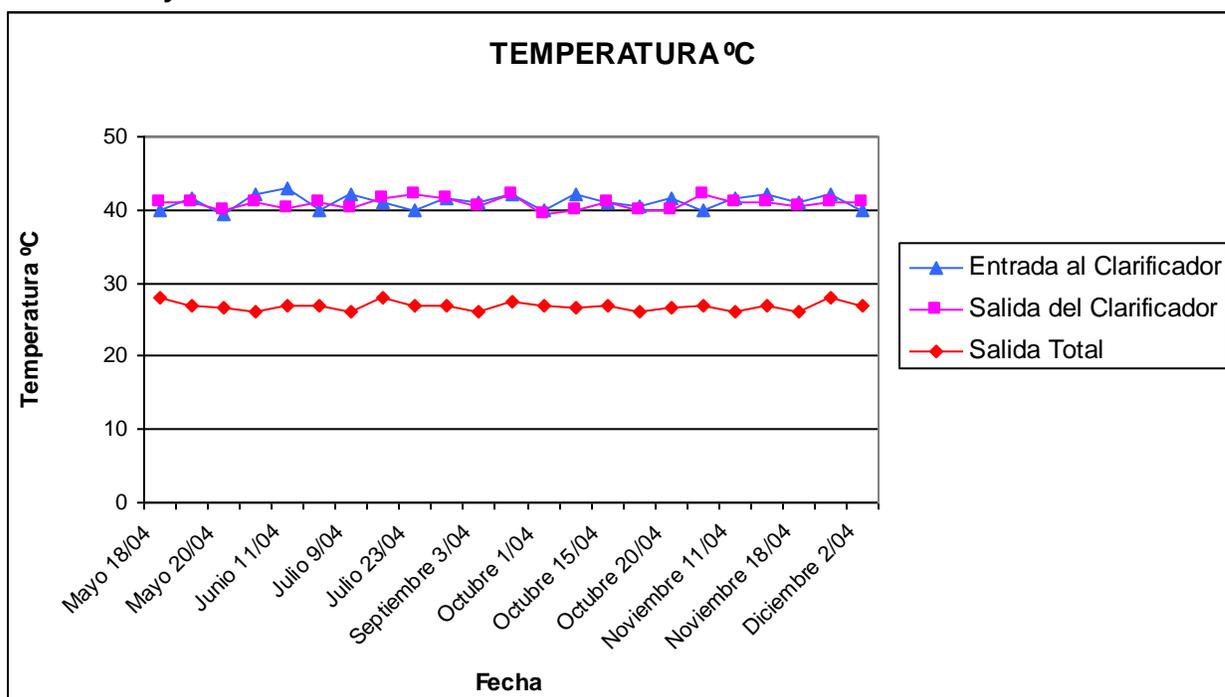
**Tabla 13. Valores de temperatura para los efluentes entrada al clarificador, salida del clarificador y salida total de la PTAR**

| Fecha            | Temperatura °C          |                         |              |
|------------------|-------------------------|-------------------------|--------------|
|                  | Entrada al Clarificador | Salida del Clarificador | Salida Total |
| Mayo 18/04       | 40                      | 41                      | 28           |
| Mayo 19/04       | 41,5                    | 41                      | 27           |
| Mayo 20/04       | 39,5                    | 40                      | 26,5         |
| Junio 8/04       | 42                      | 41                      | 26           |
| Junio 11/04      | 43                      | 40,3                    | 27           |
| Julio 8/04       | 40                      | 41                      | 27           |
| Julio 9/04       | 42                      | 40,3                    | 26           |
| Julio 22/04      | 41                      | 41,5                    | 28           |
| Julio 23/04      | 40                      | 42                      | 27           |
| Septiembre 2/04  | 41,5                    | 41,5                    | 27           |
| Septiembre 3/04  | 41                      | 40,5                    | 26           |
| Septiembre 30/04 | 42                      | 42                      | 27,5         |

**Continuación tabla 13. Valores de temperatura para los efluentes entrada al clarificador, salida del clarificador y salida total de la PTAR**

| Fecha           | Temperatura °C          |                         |              |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|--------------|
|                 | Entrada al Clarificador | Salida del Clarificador | Salida Total |
| Octubre 1/04    | 40                      | 39,5                    | 27           |
| Octubre 14/04   | 42                      | 40                      | 26,5         |
| Octubre 15/04   | 41                      | 41                      | 27           |
| Octubre 19/04   | 40,5                    | 40                      | 26           |
| Octubre 20/04   | 41,5                    | 40                      | 26,5         |
| Noviembre 10/04 | 40                      | 42                      | 27           |
| Noviembre 11/04 | 41,5                    | 41                      | 26           |
| Noviembre 17/04 | 42                      | 41                      | 27           |
| Noviembre 18/04 | 41                      | 40,5                    | 26           |
| Diciembre 1/04  | 42                      | 41                      | 28           |
| Diciembre 2/04  | 40                      | 41                      | 27           |

**Gráfica 5. Valores de temperatura para los efluentes entrada al clarificador, salida del clarificador y salida total de la PTAR**



Igualmente, al hacer el tratamiento estadístico, mediante el Análisis de Varianza (ANOVA ver anexo 1), se observa una diferencia altamente significativa entre los tres sitios de muestreo y en función del tiempo ( $p= 0,000$ ) para el parámetro de temperatura.

Mediante la comparación múltiple de Duncan durante los siete meses de muestreo, se observa que la diferencia para el parámetro de temperatura es entre el tratamiento primario donde no hay un cambio significativo de la temperatura y el tratamiento secundario, donde a través de él se logra una disminución significativa de la temperatura (ver tabla 14). El cambio no significativo en el tratamiento primario, se puede atribuir a que el tiempo de permanencia del efluente es corto.

**Tabla 14. Prueba de Duncan para el parámetro temperatura en los tres sitios de muestreo**

| TEMPERATURA             |    |                      |       |
|-------------------------|----|----------------------|-------|
| Duncan <sup>a</sup>     |    |                      |       |
| SITIO                   | N  | Significancia = 0.05 |       |
|                         |    | 1                    | 2     |
| SALIDA TOTAL            | 23 | 26.83                |       |
| SALIDA DEL CLARIFICADOR | 23 |                      | 40.83 |
| ENTRADA AL CLARIFICADOR | 23 |                      | 41.09 |
| Sig.                    |    | 1.000                | 0.263 |

### 9.1.2 Análisis químico:

#### 9.1.2.1 Caracterización de pH:

En la tabla 15, se puede observar que el parámetro de pH para la entrada del clarificador se encuentra en el rango de 5,75 a 9,21, variación que se puede atribuir a que en los efluentes provenientes del proceso de fabricación de papel, se reciben diferentes aportes tanto de carácter ácido como básico que hacen que este parámetro fluctúe.

**Tabla 15. Valores de pH para los efluentes entrada al clarificador, salida del clarificador y salida total de la PTAR**

| Fecha            | Promedio pH             |                         |              |
|------------------|-------------------------|-------------------------|--------------|
|                  | Entrada al Clarificador | Salida del Clarificador | Salida Total |
| Mayo 18/04       | 6,01                    | 7,58                    | 7,58         |
| Mayo 19/04       | 6,18                    | 6                       | 7,28         |
| Mayo 20/04       | 7,2                     | 6,41                    | 8,06         |
| Junio 8/04       | 5,75                    | 4,87                    | 7,51         |
| Junio 11/04      | 8,89                    | 7,16                    | 7,47         |
| Julio 8/04       | 6,49                    | 6,91                    | 7,36         |
| Julio 9/04       | 6,73                    | 5,78                    | 7,95         |
| Julio 22/04      | 6,09                    | 6,29                    | 7,44         |
| Julio 23/04      | 6,33                    | 5,37                    | 7,35         |
| Septiembre 2/04  | 6,96                    | 6,28                    | 7,53         |
| Septiembre 3/04  | 6,27                    | 6,63                    | 7,61         |
| Septiembre 30/04 | 6,62                    | 6,80                    | 7,65         |
| Octubre 1/04     | 7,52                    | 6,93                    | 7,70         |
| Octubre 14/04    | 6,21                    | 4,63                    | 7,48         |
| Octubre 15/04    | 6,70                    | 5,38                    | 7,49         |
| Octubre 19/04    | 5,48                    | 4,76                    | 7,44         |

**Continuación tabla 15. Valores de pH para los efluentes entrada al clarificador, salida del clarificador y salida total de la PTAR**

| Fecha           | Promedio pH             |                         |              |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|--------------|
|                 | Entrada al Clarificador | Salida del Clarificador | Salida Total |
| Octubre 20/04   | 6,29                    | 5,41                    | 7,45         |
| Noviembre 10/04 | 6,15                    | 6,40                    | 7,21         |
| Noviembre 11/04 | 5,55                    | 6,35                    | 7,75         |
| Noviembre 17/04 | 7,12                    | 7,22                    | 7,94         |
| Noviembre 18/04 | 6,75                    | 6,02                    | 7,67         |
| Diciembre 1/04  | 9,21                    | 5,78                    | 7,59         |
| Diciembre 2/04  | 7,03                    | 6,38                    | 7,16         |

También se puede observar un hecho relevante en el tratamiento primario (clarificador), para algunos muestreos, el cual consiste en una disminución del pH, desde valores cercanos a pH neutro hasta valores próximos a 5,0. Esto posiblemente se atribuye a reacciones anaeróbicas que se están llevando a cabo en el clarificador, entre ellas, la de mayor importancia la fermentación ácida, debida a los azúcares disueltos en los licores de la preparación de la pasta de papel.

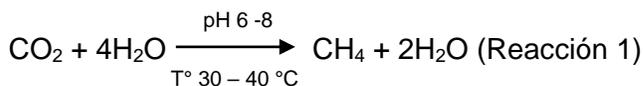
La reacción de fermentación ácida está favorecida por las altas temperaturas del afluente (T° aprox. 40 °C) y la acidez de los lodos depositados. Por medio de esta reacción, se aporta más acidez al efluente, ya que la materia orgánica solubilizada es rápidamente convertida a ácidos orgánicos. Los principales ácidos producidos son acético, propiónico y butírico con trazas de fórmico, valérico, isovalérico y caproico. (Crites, 2000)

Al anterior hecho, se le suma la observación de burbujas en el clarificador (Ver anexo 4 foto 1), que se pueden deber a gases producto de las reacciones anaeróbicas como metano, nitrógeno gaseoso producidas por bacterias nitrosomonas y nitrobacter (desnitrificación), entre otros.

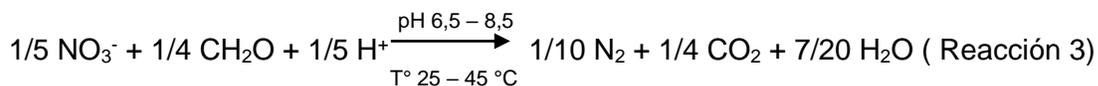
Estas reacciones son favorecidas por el pH del efluente de la entrada del clarificador, además de las altas temperaturas como se mencionó anteriormente.

Las reacciones que pueden ocurrir son:

**Metanogénesis**

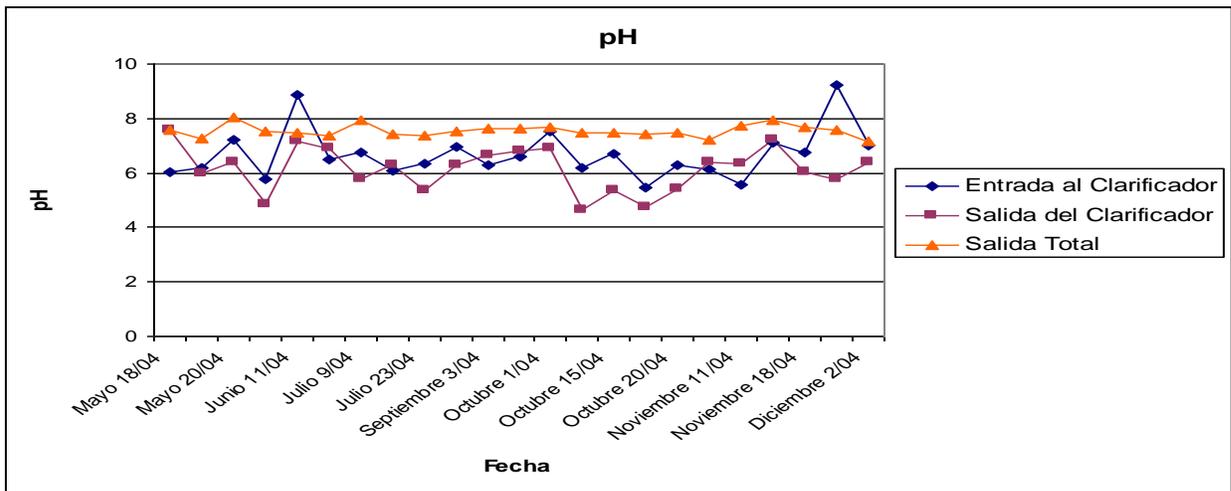


**Desnitrificación desamilativa**



Como se aprecia en la gráfica 6, el pH presenta un comportamiento relativamente constante para el efluente de la salida total y un poco menos para el de la entrada al clarificador. Sin embargo en el efluente de la salida del clarificador hay un comportamiento fluctuante, destacando los valores de pH más ácidos (4,87, 5,78, 5,37, 4,63, 5,38, 4,76, 5,41 y 5,78), que podrían estar afectando la efectividad del tratamiento secundario, ya que las colonias bacterianas prefieren un pH dentro del intervalo de 5 a 9, y sus actividades son seriamente inhibidas si el pH cae por debajo de 5 o excede de 10.

**Gráfica 6. Valores de pH para los efluentes entrada al clarificador, salida del clarificador y salida total de la PTAR**



Al hacer el tratamiento estadístico mediante el Análisis de Varianza (ANOVA ver anexo 1), para el parámetro de pH, se encontró que hay diferencia altamente significativa ( $p= 0,000$ ) entre los tres sitios de muestreo y a través del tiempo.

La prueba de comparación múltiple de Duncan (tabla 16), indica que el parámetro de pH es significativo para los tres efluentes, siendo significativamente superior el pH de la salida total. Para el efluente de la entrada del clarificador, se encuentra un promedio de pH a lo largo de los siete meses de muestreo cercanos a la neutralidad y al pasar por el clarificador en general sufre una disminución del pH, haciéndose ligeramente ácido con lo que se explica el comportamiento expuesto anteriormente para el análisis mes a mes.

Sin embargo a lo largo del tratamiento secundario se observa un incremento significativo en el valor del pH hasta valores ligeramente superiores a la neutralidad, dado que el metabolismo de los microorganismos libera sustancias de carácter ácido como ácidos orgánicos, estos pueden formar sales de carácter cercano a la neutralidad con los reactivos que son adicionados después del tratamiento primario para mantener activos a los microorganismos, tales como calcio y magnesio.

El parámetro de pH para el efluente de la salida total, cumple con la Norma Colombiana, Decreto 1594/84, artículo 72, la cual establece un valor entre 5-9 unidades para aguas residuales de vertido.

**Tabla 16. Prueba de Duncan para el parámetro de pH en los tres sitios de muestreo**

| Duncan <sup>a</sup>     |    | pH                   |        |        |
|-------------------------|----|----------------------|--------|--------|
| SITIO                   | N  | Significancia = 0.05 |        |        |
|                         |    | 1                    | 2      | 3      |
| SALIDA DEL CLARIFICADOR | 23 | 6.1472               |        |        |
| ENTRADA AL CLARIFICADOR | 23 |                      | 6.6752 |        |
| SALIDA TOTAL            | 23 |                      |        | 7.5509 |
| Sig.                    |    | 1.000                | 1.000  | 1.000  |

De acuerdo al análisis de correlación de Pearson y Spearman (anexo 2 y 3), se puede apreciar que el pH del efluente de la salida total tiene correlación negativa con los parámetros de sólidos suspendidos totales, cloruros, nitrógeno amoniacal, nitratos, nitritos, sulfatos, sulfuros y materia orgánica, indicando que su valor disminuye a medida que disminuyen los valores de los parámetros indicados, pero la significancia establece que en ningún caso esa correlación es significativa (0,596, 0,285, 0,904, 0,981, 0,919, 0,705, 0,689 y 0,666 respectivamente). También se aprecia que el pH tiene correlación positiva con la DBO<sub>5</sub>, DQO y con el contenido de fósforo, indicando que al aumentar el valor de estos parámetros, el pH aumenta, pero el valor de significancia señala que la correlación no es significativa (0,403, 0,691 y 0,578 respectivamente).

#### **9.1.2.2 Caracterización de la demanda biológica de oxígeno DBO<sub>5</sub> y la demanda química de oxígeno DQO:**

En las fábricas de pasta y papel, los derivados de la madera disueltos en los licores de la preparación de la pasta, como oligosacáridos, azúcares simples, derivados de la lignina de bajo peso molecular, ácido acético, encolantes y fibras de celulosa solubilizadas, son los principales contribuyentes tanto a la demanda biológica de oxígeno (DBO) como a la demanda de oxígeno químico (DQO). (Austin, 1988)

La cantidad de oxígeno necesaria para la descomposición biológica aeróbica de un material nutriente es el factor clave para expresar su fuerza contaminante. La prueba de demanda bioquímica (o biológica) de oxígeno (DBO) estima el oxígeno gastado en la descomposición biológica actual de una muestra residual y constituye una simulación de laboratorio del proceso de autopurificación.

En general tanto para la DBO<sub>5</sub> como para la DQO, se observa en las tablas 17 y 18 y gráficas 7 y 8, que existe una alta remoción de la materia orgánica, valores entre 1149 y 575 mg/L para DBO<sub>5</sub> y entre 4950 y 2275 mg/L para DQO en la entrada del clarificador, hasta valores menores

entre 985 y 412,1 mg/L para DBO<sub>5</sub> y entre 2575 y 900 mg/L para DQO en la salida del clarificador, que a su vez disminuyen en la salida total, encontrándose valores de DBO<sub>5</sub> y DQO entre 75,5 – 27,9 mg/L y 439 – 159 mg/L respectivamente; pero como es de esperarse, la remoción es mucho mayor para el tratamiento biológico, ya que es aquí donde por medio de los microorganismos, la materia orgánica sufre los diferentes procesos de degradación.

También se puede observar, que los valores de la DQO son siempre superiores a los de la DBO<sub>5</sub> porque muchas sustancias orgánicas pueden oxidarse químicamente, pero no biológicamente.

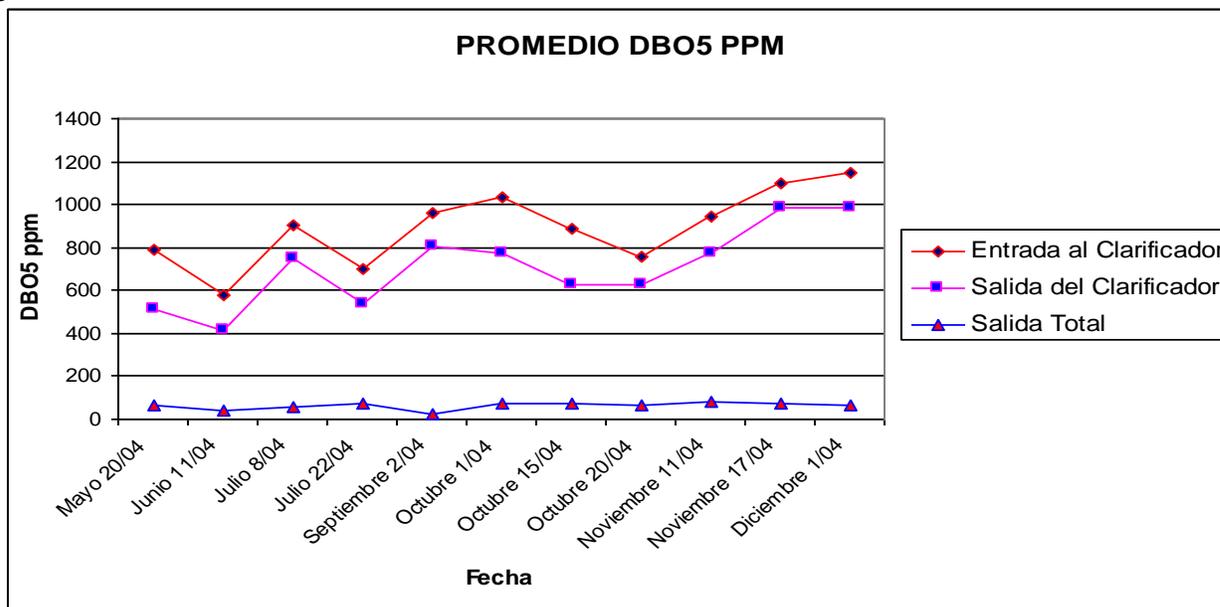
En las tablas mencionadas anteriormente, se puede observar en la fecha de inicio del mes de Septiembre, uno de los valores más bajos de DBO<sub>5</sub> y DQO en el efluente de salida total (27,9 y 159 ppm). Esto fue debido a que durante el mes de Agosto se realizó una parada total de cuatro días e intermitente de seis días en la caldera de potencia, por lo cual se conservó su efecto hasta inicio de mes. También se puede subrayar en los valores de los meses de Octubre a Diciembre tanto para DBO<sub>5</sub> como DQO, los cuales son mayores comparados con los de meses anteriores, esto se podría explicar mediante cambios en el proceso de la fabricación de papel debidos a un aumento de la materia orgánica por impurezas en la materia prima (bagazo), ocasionado por la época de lluvias.

A pesar de observarse en general, una disminución tanto de la DBO<sub>5</sub> como de la DQO a lo largo del tratamiento primario y secundario de las aguas residuales, el efluente de la salida total no cumple con la meta establecida por la Corporación Regional del Cauca (CRC), para el parámetro fisicoquímico correspondiente a la demanda bioquímica de oxígeno, DBO<sub>5</sub>, la cual es de 1500 Kg/día para vertimientos a cuerpos de agua ya que el promedio para este parámetro a lo largo de los meses de Mayo a Diciembre es de 2237 Kg/día.

**Tabla 17. Valores de DBO<sub>5</sub> para los efluentes entrada al clarificador, salida del clarificador y salida total de la PTAR**

| Fecha           | DBO <sub>5</sub> ppm    |                         |              |                   |                     |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|--------------|-------------------|---------------------|
|                 | Entrada al Clarificador | Salida del Clarificador | Salida Total | Flujo Galones/min | Salida total Kg/día |
| Mayo 20/04      | 792,8                   | 510,8                   | 61,08        | 6419              | 2137                |
| Junio 11/04     | 575,9                   | 412,1                   | 42,95        | 6364              | 1490                |
| Julio 8/04      | 902,2                   | 752,8                   | 55,82        | 6197              | 1885                |
| Julio 22/04     | 701,5                   | 534,5                   | 71,95        | 6389              | 2505                |
| Septiembre 2/04 | 957                     | 809                     | 27,9         | 6467              | 983                 |
| Octubre 1/04    | 1035                    | 776                     | 75,2         | 6020              | 2467                |
| Octubre 15/04   | 890                     | 629                     | 75,5         | 6570              | 2704                |
| Octubre 20/04   | 757                     | 628                     | 67,5         | 6473              | 2381                |
| Noviembre 11/04 | 942                     | 772                     | 81           | 6550              | 2892                |
| Noviembre 17/04 | 1101                    | 985                     | 73,1         | 6942              | 2760                |
| Diciembre 1/04  | 1149                    | 984                     | 66,9         | 6580              | 2399                |
| TOTAL           |                         |                         |              |                   | 2237                |

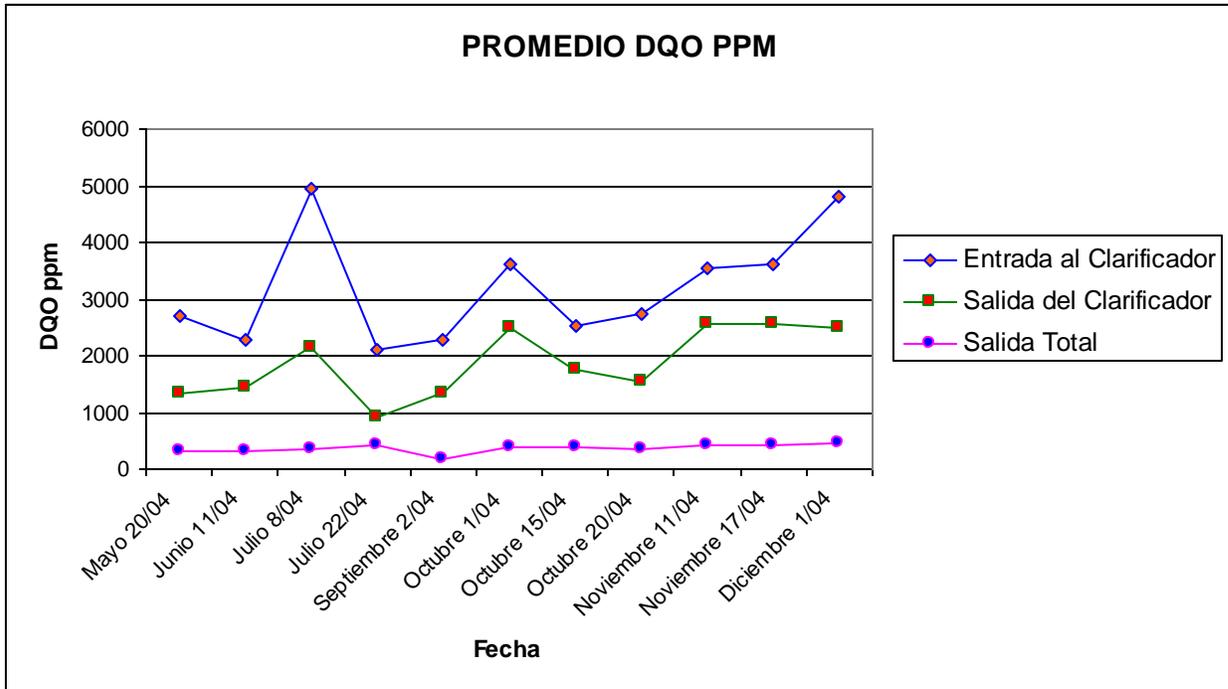
**Gráfica 7. Promedio DBO<sub>5</sub> para los efluentes entrada al clarificador, salida del clarificador y salida total de la PTAR**



**Tabla 18. Valores de DQO para los efluentes entrada al clarificador, salida del clarificador y salida total de la PTAR**

| Fecha           | DQO ppm                 |                         |              |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|--------------|
|                 | Entrada al Clarificador | Salida del Clarificador | Salida Total |
| Mayo 20/04      | 2710                    | 1320                    | 321          |
| Junio 11/04     | 2275                    | 1425                    | 307          |
| Julio 8/04      | 4950                    | 2125                    | 343          |
| Julio 22/04     | 2100                    | 900                     | 419          |
| Septiembre 2/04 | 2275                    | 1350                    | 159          |
| Octubre 1/04    | 3600                    | 2475                    | 393          |
| Octubre 15/04   | 2525                    | 1750                    | 386          |
| Octubre 20/04   | 2750                    | 1550                    | 358          |
| Noviembre 11/04 | 3550                    | 2575                    | 436          |
| Noviembre 17/04 | 3625                    | 2570                    | 405          |
| Diciembre 1/04  | 4800                    | 2475                    | 439          |

**Gráfica 8. Promedio DQO para los efluentes entrada al clarificador, salida del clarificador y salida total de la PTAR**



Tanto para los parámetros de  $DBO_5$  como para la DQO, se encontró mediante el tratamiento estadístico de Análisis de Varianza (ANOVA anexo 1), que hay diferencia altamente significativa ( $p = 0,000$ ) en los diferentes puntos de muestreo y en el tiempo.

Y mediante la comparación múltiple de Duncan (tablas 19 y 20), se corrobora que el valor de DQO a la entrada del clarificador es significativamente superior al de la salida del clarificador y a su vez este significativamente superior al de la salida total, de igual forma ocurre con el parámetro de  $DBO_5$ , indicando que la materia orgánica sufre un verdadero proceso de degradación en cada uno de los tratamientos, siendo mayor a través del tratamiento secundario ya que es aquí donde por medio de los microorganismos, la materia orgánica sufre los diferentes procesos de degradación, pero como los valores son aún altos (63,60 mg/L que corresponde a un valor de carga de 2237 Kg/día), comparados con el valor de carga establecido por la CRC, se concluye que se debe mejorar la eficiencia de la degradación.

Con respecto a la correlación de estos parámetros con parámetros como la materia orgánica y el pH para el efluente de la salida total, se encontró que tanto para el análisis de correlación de Pearson y Spearman (anexo 2 y 3), estos parámetros tienen una correlación positiva, es decir que al aumentar el valor de la materia orgánica y del pH aumenta el valor de  $DBO_5$  y DQO, pero el valor de correlación es no significativo con la materia orgánica ( $p = 0,232$  y  $0,191$  respectivamente) y el pH ( $p = 0,691$  y  $0,402$  respectivamente).

**Tabla 19. Prueba de Duncan para el parámetro de DQO en los tres sitios de muestreo**

**DQO**

Duncan <sup>a</sup>

| SITIO                   | N  | Significancia = 0.05 |           |           |
|-------------------------|----|----------------------|-----------|-----------|
|                         |    | 1                    | 2         | 3         |
| SALIDA TOTAL            | 11 | 360.5455             |           |           |
| SALIDA DEL CLARIFICADOR | 11 |                      | 1865.0000 |           |
| ENTRADA AL CLARIFICADOR | 11 |                      |           | 3196.3636 |
| Sig.                    |    | 1.000                | 1.000     | 1.000     |

**Tabla 20. Prueba de Duncan para el parámetro de DBO<sub>5</sub> en los tres sitios de muestreo**

**DBO5**

Duncan <sup>a</sup>

| SITIO                   | N  | Significancia = 0.05 |          |          |
|-------------------------|----|----------------------|----------|----------|
|                         |    | 1                    | 2        | 3        |
| SALIDA TOTAL            | 11 | 63.6018              |          |          |
| SALIDA DEL CLARIFICADOR | 11 |                      | 708.4727 |          |
| ENTRADA AL CLARIFICADOR | 11 |                      |          | 891.2182 |
| Sig.                    |    | 1.000                | 1.000    | 1.000    |

La tabla 21, indica que hay una correlación positiva significativa entre los valores de DQO y DBO<sub>5</sub> (p= 0,000), lo que indica que al llegar a su término la degradación biológica, se inicia la degradación química. Por esta razón al haber mayor cantidad de materia orgánica no biodegradable hay mayor DQO, puesto que se necesita mayor oxidación, probablemente por presentar moléculas organominerales de muy alto peso molecular.

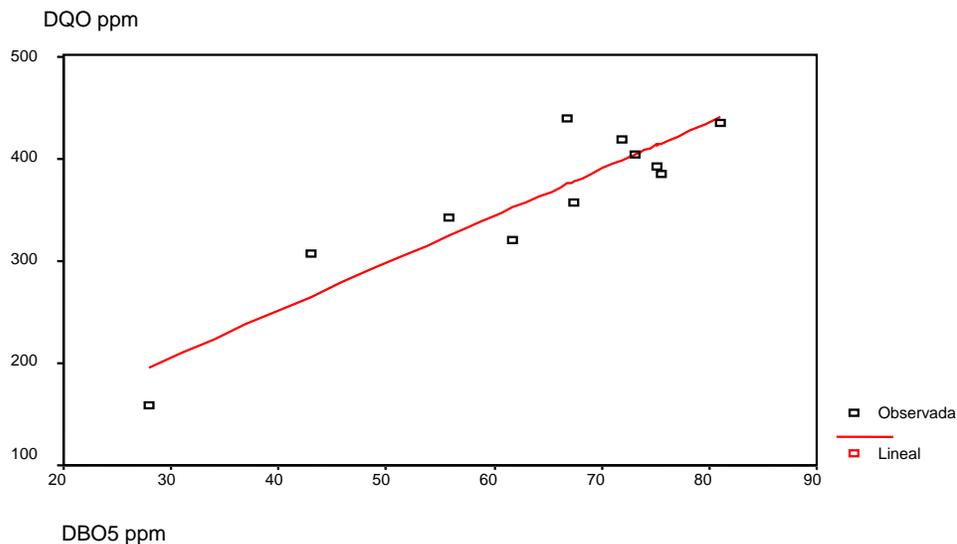
En la gráfica 9, se puede observar este comportamiento donde existe una relación lineal entre los dos parámetros mencionados anteriormente, representada con la ecuación:

$$DQO = 4,6094DBO_5 + 67,3811 \quad R_{sq} = 0,836$$

**Tabla 21. Análisis de correlación de Pearson para el efluente de la salida total**

|                  |                        | DBO5   | MATERIA ORGANICA | DQO |
|------------------|------------------------|--------|------------------|-----|
| DBO5             | Correlación de Pearson |        |                  |     |
|                  | Sig. (bilateral)       |        |                  |     |
|                  | N                      |        |                  |     |
| MATERIA ORGANICA | Correlación de Pearson | 0,232  |                  |     |
|                  | Sig. (bilateral)       | 0,520  |                  |     |
|                  | N                      | 10     |                  |     |
| DQO              | Correlación de Pearson | 0,914* | 0,451            |     |
|                  | Sig. (bilateral)       | 0,000  | 0,191            |     |
|                  | N                      | 11     | 10               |     |

**Gráfica 9. Análisis de correlación entre la DBO<sub>5</sub> y la DQO para el efluente de la salida total**



**9.1.2.3 Caracterización de sulfuros:**

La formación de sulfuros en las aguas superficiales se hace por procesos anaeróbicos, en los que actúan bacterias sobre sustancias orgánicas. Bajo condiciones aerobias el ión sulfuro se convierte rápidamente en iones sulfato y azufre. Esto se corrobora en el análisis de correlación de Pearson y Spearman (anexo 2 y 3), donde se observa que el pH tiene una correlación negativa con el contenido de sulfuros, indicando que a mayor cantidad de sulfuros es menor el valor de pH ya que estos se están transformando en sulfatos.

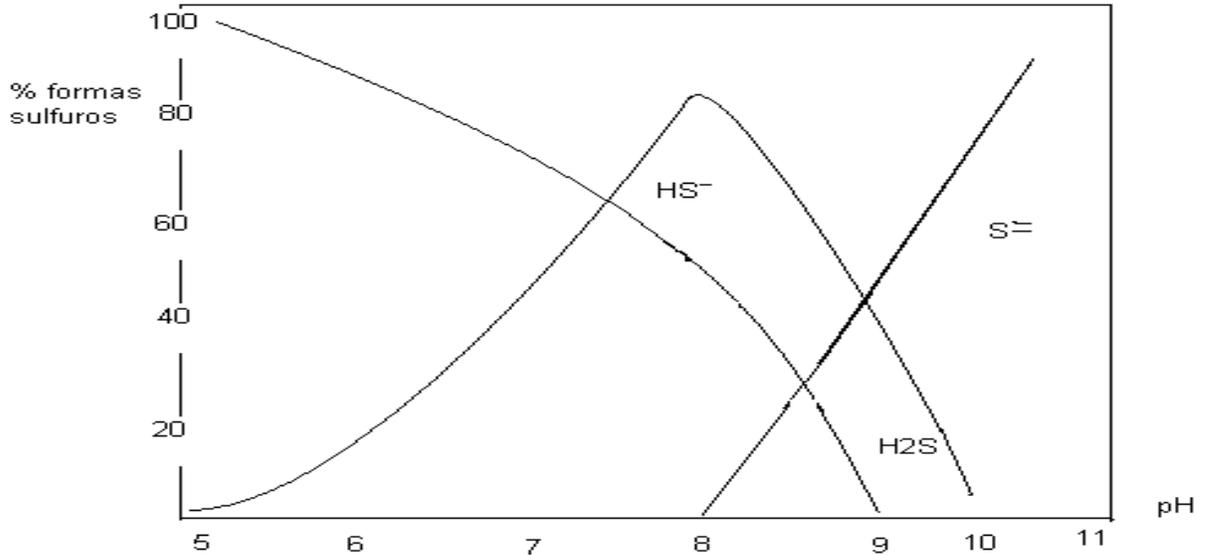
Los sulfuros disueltos existen en el agua como moléculas no ionizadas o  $H_2S$ , hidrosulfuro ( $HS^-$ ) y muy ocasionalmente  $S^{2-}$ . El equilibrio entre estas formas es una función del pH. La materia en suspensión puede contener sulfuros metálicos. Cuando la concentración de sulfuros es apreciable, se presentan condiciones de fuerte olor y tóxicas que hacen inadecuada el agua para su consumo humano y para otros usos. (Hernandez, 1998)

En la tabla 22, se puede observar un aumento marcado en el valor de los sulfuros en la salida del clarificador en algunos de los muestreos. Esto se puede explicar al comparar estos valores con el del pH para el correspondiente muestreo (5,75, 4,63, 5,38, 5,41, 5,78), debido a que cuando el pH es menor de 8 se forma rápidamente el  $H_2S$  y aparecen los olores, y para este caso entre menor sea el pH, mayor será la cantidad de sulfuros (gráfica 10). También se puede notar, que no se obtuvieron valores de sulfuros al inicio del mes de septiembre, esto se podría explicar al igual que la disminución de  $DBO_5$  y  $DQO$ , por los efectos de la parada del mes de agosto en la caldera de potencia.

**Tabla 22. Valores de sulfuros para los efluentes entrada al clarificador, salida del clarificador y salida total de la PTAR**

| Fecha            | Promedio $S^{2-}$ ppm   |                         |              |
|------------------|-------------------------|-------------------------|--------------|
|                  | Entrada al Clarificador | Salida del Clarificador | Salida Total |
| Mayo 18/04       | 1,008                   | 1,176                   | 3,864        |
| Mayo 19/04       | 4,200                   | 2,268                   | 2,756        |
| Mayo 20/04       | 3,612                   | 2,268                   | 1,092        |
| Junio 8/04       | 0,8400                  | 2,100                   | 2,268        |
| Junio 11/04      | 2,772                   | 1,332                   | 0,4800       |
| Julio 8/04       | 4,368                   | 1,680                   | 3,108        |
| Julio 9/04       | 4,788                   | 1,092                   | 2,064        |
| Julio 22/04      | 2,016                   | 1,008                   | 1,008        |
| Julio 23/04      | 0,7560                  | 0,5880                  | 1,176        |
| Septiembre 2/04  | 0                       | 0                       | 0            |
| Septiembre 3/04  | 0                       | 0                       | 0            |
| Septiembre 30/04 | 1,950                   | 1,132                   | 1,741        |
| Octubre 1/04     | 2,109                   | 1,492                   | 1,730        |
| Octubre 14/04    | 1,850                   | 2,030                   | 2,347        |
| Octubre 15/04    | 1,623                   | 1,932                   | 2,270        |
| Octubre 19/04    | 2,184                   | 1,344                   | 1,680        |
| Octubre 20/04    | 1,344                   | 1,680                   | 0,6720       |
| Noviembre 10/04  | 1,945                   | 1,278                   | 1,541        |
| Noviembre 11/04  | 1,341                   | 1,149                   | 1,373        |
| Noviembre 17/04  | 1,732                   | 1,330                   | 1,647        |
| Noviembre 18/04  | 1,523                   | 1,232                   | 1,470        |
| Diciembre 1/04   | 1,856                   | 2,134                   | 2,380        |
| Diciembre 2/04   | 1,434                   | 1,280                   | 1,567        |

**Gráfica 10. Efectos del pH en el equilibrio del sulfuro de hidrógeno**



Fuente: Orozco Jaramillo Álvaro y Salazar Arias Álvaro. Tratamientos biológicos de las aguas residuales. Medellín, Colombia. 1985. Pág. 75.

Los valores de sulfuros en el efluente de la salida total para los meses de Octubre a Diciembre tienen una ligera reducción comparados con los meses anteriores. Se podría explicar esta disminución debido a las lluvias que se presentaban en estos meses, las cuales daban paso a una pequeña oxigenación de las lagunas de oxidación y estabilización del tratamiento biológico, ocasionando de esta manera la oxidación espontánea de sulfuros a azufre elemental y agua.



El análisis estadístico mediante prueba Análisis de Varianza (ANOVA anexo 1), indica que no hay diferencia estadística entre los valores de sulfuros de los tres sitios de muestreo en función del tiempo, esto se corrobora en el análisis de comparación múltiple de Duncan (tabla 23), en donde se detecta un solo grupo de datos, siendo este parámetro no significativo ( $p= 0,123$ ) e indicando que la remoción de éste a través de los tratamientos primario y secundario es mínima.

**Tabla 23. Prueba de Duncan para el parámetro de sulfuros en los tres sitios de muestreo**

| SULFUROS                |    |                      |
|-------------------------|----|----------------------|
| Duncan <sup>a</sup>     |    |                      |
| SITIO                   | N  | Significancia = 0.05 |
|                         |    | 1                    |
| SALIDA DEL CLARIFICADOR | 23 | 1.3707               |
| SALIDA TOTAL            | 23 | 1.6623               |
| ENTRADA AL CLARIFICADOR | 23 | 1.9674               |
| Sig.                    |    | 0.052                |

En la tabla 23, en el efluente de la salida total se puede notar un aumento marcado de los sulfuros, indicando con esto que podrían estarse llevando a cabo en el tratamiento secundario, reacciones de tipo anaeróbico, en las cuales el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), está siendo generado por reducción de los sulfatos (Reacción 5) o mediante hidrólisis de los aminoácidos con grupos funcionales –SH-. (Min. de obras públicas y transporte, 1991)

#### **Reducción de sulfatos**

SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> + Materia orgánica  $\xrightarrow{\text{bacterias}}$  S<sup>-2</sup> + H<sub>2</sub>O + CO<sub>2</sub> (Reacción 5)



Una de las consecuencias de la producción de sulfuros es la formación de sulfuro de hierro, el cual confiere el color negro a los fangos. Además disminuye la posibilidad de crecimiento de algas ya que impiden la penetración de la luz y son tóxicos, manteniendo el medio en condiciones anaerobias.

Al comparar los valores de sulfuros obtenidos, para el efluente de la salida total (promedio 1,6623 mg/L), con el valor reportado en el Decreto 1594/84, Artículo 45 que determina los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para la preservación de flora y fauna en aguas superficiales (0,0002 mg/L), estos valores superan el límite establecido, teniendo en cuenta que este valor no corresponde a aguas de vertido.

La prueba de correlación de Pearson y Spearman (anexo 2 y 3), indica que el contenido de sulfuros influye positivamente sobre la materia orgánica, de tal manera que al aumentar la concentración de éstos aumentaría el nivel de materia orgánica, pero la significancia indica que esta correlación no es significativa (p= 0,491).

#### 9.1.2.4 Caracterización de cloruros:

La salinidad de un agua provocada fundamentalmente por cloruros, sulfatos y sulfuros, puede impedir su uso en agricultura, para consumo humano e utilización industrial. Puede producir mortalidad o al menos forzar la emigración de numerosas especies.

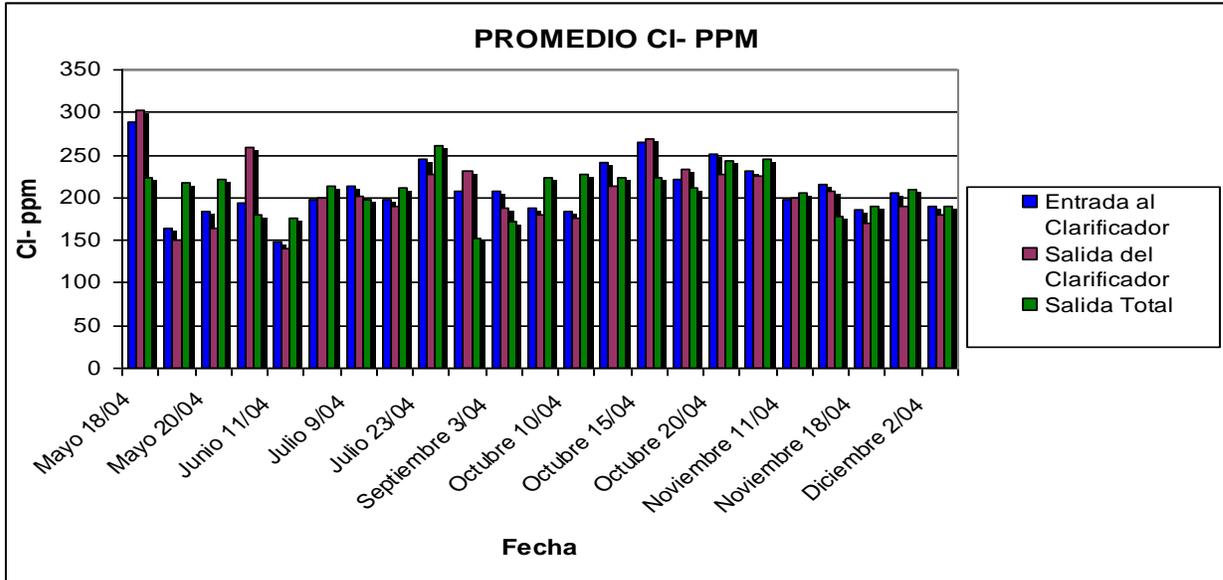
En cuanto a los cloruros, en la tabla 24 y gráfica 11, en el efluente de la salida total hay un ligero incremento de los valores de este parámetro. Sin embargo, al hacer el tratamiento estadístico de la prueba de Análisis de Varianza (ANOVA anexo 1), ésta indica que no hay diferencia significativa entre los tres puntos de muestreo y en el tiempo ( $p= 0,903$ ), comprobándose con la prueba de comparación múltiple de Duncan (tabla 25), en donde se observa un solo grupo de datos, indicando nuevamente que no hay diferencia significativa y por lo tanto su remoción a través del tratamiento primario y secundario es mínima con un ligero aumento en la concentración de éste en el efluente de la salida total, que se podría atribuir a que la laguna de oxidación presenta zonas muertas que impide el apropiado flujo del agua, provocando fluctuaciones en la concentración de cloruros.

La concentración de cloruros oscila entre 140,2 y 233,2 mg/L en el efluente de la salida total, no sobrepasando el valor establecido por la norma colombiana de 250 mg/L, establecido en el Decreto 1594/84, artículo 38 y 39, teniendo en cuenta que se compara con un efluente de destinación para consumo humano y doméstico, el cual requiere para su potabilización solamente tratamiento convencional o desinfección y no para aguas de vertido.

**Tabla 24. Valores de cloruros para los efluentes entrada al clarificador, salida del clarificador y salida total de la PTAR**

| Fecha            | Promedio Cl <sup>-</sup> ppm |                         |              |
|------------------|------------------------------|-------------------------|--------------|
|                  | Entrada al Clarificador      | Salida del Clarificador | Salida Total |
| Mayo 18/04       | 288,5                        | 302                     | 223,8        |
| Mayo 19/04       | 164,5                        | 151                     | 218,4        |
| Mayo 20/04       | 183,4                        | 164,5                   | 221,1        |
| Junio 8/04       | 194,2                        | 258,9                   | 180,7        |
| Junio 11/04      | 148,3                        | 140,2                   | 175,3        |
| Julio 8/04       | 196,8                        | 199,5                   | 213          |
| Julio 9/04       | 213                          | 202,2                   | 196,9        |
| Julio 22/04      | 198,1                        | 190,6                   | 210,6        |
| Julio 23/04      | 245,7                        | 228,2                   | 260,8        |
| Septiembre 2/04  | 208,1                        | 230,7                   | 152,9        |
| Septiembre 3/04  | 208,1                        | 188,1                   | 173          |
| Septiembre 30/04 | 187,7                        | 179,8                   | 224,2        |
| Octubre 10/04    | 183,1                        | 175,5                   | 228,2        |
| Octubre 14/04    | 240,7                        | 213,1                   | 223,1        |
| Octubre 15/04    | 265,8                        | 268,3                   | 222,8        |
| Octubre 19/04    | 220,5                        | 233,2                   | 210,6        |
| Octubre 20/04    | 250,7                        | 228,2                   | 243,2        |
| Noviembre 10/04  | 230,8                        | 225,6                   | 245,1        |
| Noviembre 11/04  | 198,3                        | 199,2                   | 206,3        |
| Noviembre 17/04  | 215,6                        | 208,4                   | 178,3        |
| Noviembre 18/04  | 185,3                        | 170,3                   | 190,8        |
| Diciembre 1/04   | 206,1                        | 189,5                   | 209,4        |
| Diciembre 2/04   | 190,4                        | 180,7                   | 190,7        |

**Gráfica 11. Promedio cloruros para los efluentes entrada al clarificador, salida del clarificador y salida total de la PTAR**



**Tabla 25. Prueba de Duncan para el parámetro de cloruros en los tres sitios de muestreo**

| CLORUROS                |    |                      |
|-------------------------|----|----------------------|
| Duncan <sup>a</sup>     |    |                      |
| SITIO                   | N  | Significancia = 0.05 |
|                         |    | 1                    |
| SALIDA DEL CLARIFICADOR | 23 | 205.5522             |
| SALIDA TOTAL            | 23 | 208.6609             |
| ENTRADA AL CLARIFICADOR | 23 | 209.7261             |
| Sig.                    |    | 0.686                |

**9.1.2.5 Caracterización del porcentaje de materia orgánica:**

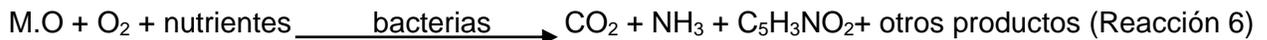
La materia orgánica, que llega con el agua residual, se adsorbe a la superficie celular, penetrando a continuación en el interior celular; para ello, las moléculas que presentan un tamaño pequeño se absorben directamente por los mecanismos de adquisición de nutrientes adecuados. Sin embargo, las macromoléculas tienen que ser hidrolizadas mediante exoenzimas producidas por los microorganismos y, una vez fragmentadas en el exterior celular, penetran en la célula. Una vez dentro de la célula, las distintas moléculas son metabolizadas por el microorganismo, obteniéndose la energía y los precursores necesarios para el crecimiento celular. Asimismo, como consecuencia del metabolismo celular, se forman productos de

desecho que son eliminados, pudiendo éstos ser utilizados como nutriente por otros microorganismos.

En el tratamiento biológico aerobio que se lleva a cabo en la laguna de oxidación, la materia orgánica del agua residual es oxidada por las bacterias heterótrofas, utilizando el oxígeno aplicado mediante aireadores mecánicos. Posteriormente las bacterias, utilizando el dióxido de carbono  $\text{CO}_2$  y el amoníaco  $\text{NH}_3$  producido por los microorganismos, metabolizan la materia orgánica produciendo polímeros extracelulares que forman flóculos, los cuales van hacia el fondo de la laguna.

La reacción general que describe este proceso es la siguiente:

### ***Oxidación de la materia orgánica***



M.O: Materia orgánica

### ***Respiración endógena***



Luego de la laguna de oxidación, la materia orgánica que no fue degradada sigue su curso hacia la laguna facultativa, la cual posee una zona aerobia y una zona anaerobia, situadas respectivamente en superficie y fondo. Por tanto, en estas lagunas se pueden encontrar cualquier tipo de microorganismos, desde anaerobios estrictos en el fango del fondo hasta aerobios estrictos en la zona inmediatamente adyacente a la superficie. Sin embargo, los seres vivos más adaptados al medio serán los microorganismos facultativos, que pueden sobrevivir en las condiciones cambiantes de oxígeno disuelto, típicas de estas lagunas a lo largo del día y del año. Además de las bacterias y protozoos, en las lagunas facultativas es esencial la presencia de algas, que son las principales suministradoras de oxígeno disuelto. (Min. de obras públicas y transporte, 1991)

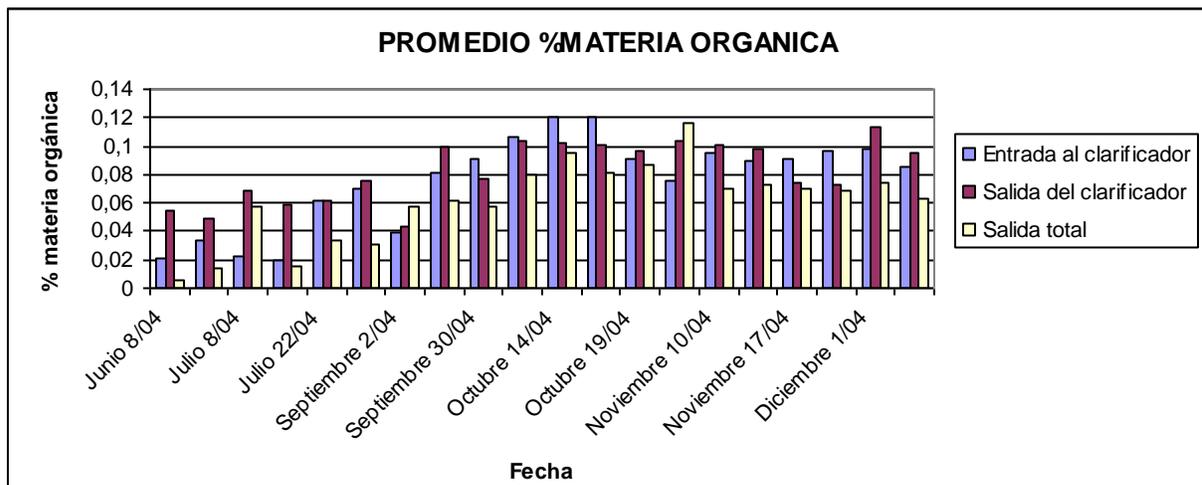
Con respecto al porcentaje de materia orgánica, en la gráfica 12 se observa que hasta el mes de Septiembre se presenta una disminución en los valores del efluente de la salida total. Al comparar los valores del efluente de la salida del clarificador con los de la salida total en la tabla 26, se podría decir, que el tratamiento biológico está ofreciendo resultados positivos de remoción de materia orgánica.

Sin embargo como se puede observar en la tabla 26, este comportamiento no se sigue observando en el mes de Octubre, pues como se mencionó anteriormente, el bagazo contenía gran cantidad de impurezas ocasionado por la época de lluvias "Ensayo de dilución del efluente de la salida total". Este mismo comportamiento se siguió observando en los meses de Noviembre y Diciembre, pero para estos meses a pesar de que había aumentado la cantidad de materia orgánica en el efluente de salida total, no era tal para efectuar la dilución del efluente.

**Tabla 26. Valores de porcentaje de materia orgánica para los efluentes entrada al clarificador, salida del clarificador y salida total de la PTAR**

| Fecha            | Promedio% materia orgánica |                         |              |
|------------------|----------------------------|-------------------------|--------------|
|                  | Entrada al Clarificador    | Salida del Clarificador | Salida Total |
| Junio 8/04       | 0,0217                     | 0,0544                  | 0,00538      |
| Junio 11/04      | 0,0334                     | 0,0492                  | 0,0147       |
| Julio 8/04       | 0,0218                     | 0,0686                  | 0,0568       |
| Julio 9/04       | 0,02                       | 0,0590                  | 0,0153       |
| Julio 22/04      | 0,0616                     | 0,0612                  | 0,0335       |
| Julio 23/04      | 0,0697                     | 0,0758                  | 0,0309       |
| Septiembre 2/04  | 0,0391                     | 0,0438                  | 0,0571       |
| Septiembre 3/04  | 0,0813                     | 0,0992                  | 0,0610       |
| Septiembre 30/04 | 0,0917                     | 0,0776                  | 0,0572       |
| Octubre 1/04     | 0,1068                     | 0,1042                  | 0,0792       |
| Octubre 14/04    | 0,1209                     | 0,1021                  | 0,0956       |
| Octubre 15/04    | 0,1201                     | 0,1003                  | 0,0808       |
| Octubre 19/04    | 0,0904                     | 0,0966                  | 0,0865       |
| Octubre 20/04    | 0,0761                     | 0,1034                  | 0,1159       |
| Noviembre 10/04  | 0,0956                     | 0,1006                  | 0,0698       |
| Noviembre 11/04  | 0,0890                     | 0,0987                  | 0,0723       |
| Noviembre 17/04  | 0,0913                     | 0,0741                  | 0,0701       |
| Noviembre 18/04  | 0,0967                     | 0,0722                  | 0,0687       |
| Diciembre 1/04   | 0,0978                     | 0,1134                  | 0,0741       |
| Diciembre 2/04   | 0,0855                     | 0,0954                  | 0,0632       |

**Gráfica 12. Promedio porcentaje materia orgánica para los efluentes entrada al clarificador, salida del clarificador y salida total de la PTAR**



Si se convierte el porcentaje de materia orgánica en ppm, considerando una eficiencia de la reacción del 77% (Bravo Isabel, 2002), se obtienen valores de materia orgánica muy cercanos a los de DBO como era de esperarse, por ejemplo en julio 11 el porcentaje de materia orgánica en la entrada del clarificador es de 0,0334 que al convertirlo en ppm se obtiene un valor de 434 ppm y el valor de DBO obtenido para esta misma fecha es de 575,9 ppm, lo que indica una relación de 1,3 por diferencia de método.

El Análisis de Varianza (ANOVA anexo 1), indica que hay diferencia significativa entre los valores de materia orgánica para los tres sitios de muestreo y en el tiempo ( $p= 0,035$ ) se encontró que el parámetro de porcentaje de materia orgánica es significativo.

En la tabla 27 para la comparación múltiple de Duncan a lo largo de los siete meses de muestreo, se observa que hay una diferencia significativa entre el efluente de la salida del clarificador y el efluente de la salida total, por lo que se podría decir que el tratamiento secundario remueve mayormente la materia orgánica que el tratamiento primario.

Como se observa en la tabla 27, las concentraciones promedio del porcentaje de materia orgánica para los tres efluentes es muy baja, por lo que se podría decir que en caso de presentarse contaminación hacia la fuente de vertido no es del tipo orgánico.

**Tabla 27. Prueba de Duncan para el parámetro de porcentaje de materia orgánica en los tres sitios de muestreo**

| MATERIA ORGANICA        |    |                      |        |
|-------------------------|----|----------------------|--------|
| Duncan <sup>a,b</sup>   |    |                      |        |
| SITIO                   | N  | Significancia = 0.05 |        |
|                         |    | 1                    | 2      |
| SALIDA TOTAL            | 19 | 0.0633               |        |
| ENTRADA AL CLARIFICADOR | 20 | 0.0755               | 0.0755 |
| SALIDA DEL CLARIFICADOR | 19 |                      | 0.0837 |
| Sig.                    |    | 0.162                | 0.346  |

De acuerdo a la correlación de Pearson y de Spearman (anexo 2 y 3), se observa que existe una correlación positiva entre la materia orgánica y los sólidos suspendidos totales, DQO, DBO<sub>5</sub>, contenido de fósforo y sulfuros, indicando que a medida que aumentan estos parámetros aumenta la materia orgánica, sin embargo el valor de significancia indica que ninguna de estas correlaciones es significativa. Además existe una correlación negativa entre la materia orgánica y el contenido de sulfatos, pero no es significativa.

#### **9.1.2.5.1 Correlación entre el porcentaje de materia orgánica y la relación DBO<sub>5</sub>/DQO:**

La relación DBO<sub>5</sub>/DQO constituye una guía para la proporción de las materias orgánicas presentes y que son biodegradables. Cuanto más se aproxime el resultado de la DBO a la determinación de la DQO, tanto más fácilmente es digerida la materia orgánica en el desecho por la bacteria seleccionada. Una relación de 0,5, por ejemplo, es extremadamente favorable,

aunque la digestión bacteriana es práctica aún cuando la relación sea tan baja como 0,1 – 0,2. (Min. de obras públicas y transporte, 1991)

Como se puede ver en la tabla 28 para el efluente de la entrada del clarificador, los valores de la relación DBO<sub>5</sub>/DQO, se encuentran entre 0,2 – 0,3, catalogando a este efluente como medianamente biodegradable. Sin embargo, al observar los valores del efluente de la salida del clarificador, éstos presentan un aumento significativo, siendo de esta manera un efluente de mayor biodegradabilidad. Esto se puede explicar mediante la función que cumple el clarificador, ya que en él, se remueve una parte de la materia orgánica mediante el proceso de sedimentación en reposo. De esta manera, se produce un efluente líquido de calidad aprovechable para la siguiente etapa de tratamiento (es decir el tratamiento biológico secundario).

El valor de la relación DBO<sub>5</sub>/DQO para el tratamiento biológico mediante lodos activados que es utilizado en las lagunas de oxidación y estabilización de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Propal, debe encontrarse en un rango mayor a 0,2 y menor de 0,4. Como puede observarse en la tabla 28, en general, el efluente de la salida del clarificador que posteriormente va dirigido a las lagunas, conserva este rango de valores, confirmando así, que la población microbiana no está siendo afectada con productos poco o nada biodegradables presentes en el agua residual, además de no estar provocando una acumulación de éstos que pueden alcanzar más adelante niveles altamente tóxicos.

**Tabla 28. Valores de promedios % materia orgánica y relación DBO<sub>5</sub>/DQO**

| Promedio% materia orgánica y relación DBO <sub>5</sub> /DQO |        |        |
|---|--------|--------|
| Entrada al Clarificador                                     | 0,0334 | 0,2531 |
|   | 0,0218 | 0,1823 |
|   | 0,0616 | 0,334  |
|   | 0,0391 | 0,4206 |
|   | 0,1068 | 0,2875 |
|   | 0,1201 | 0,3525 |
|   | 0,0761 | 0,2753 |
|   | 0,0890 | 0,2745 |
|   | 0,0913 | 0,3021 |
|   | 0,0978 | 0,2432 |
| Salida del Clarificador                                     | 0,0492 | 0,2892 |
|   | 0,0686 | 0,3542 |
|   | 0,0612 | 0,5939 |
|   | 0,0438 | 0,5992 |
|   | 0,1042 | 0,3135 |
|   | 0,1003 | 0,3594 |
|   | 0,1034 | 0,4052 |
|   | 0,0987 | 0,3045 |
| Salida Total  | 0,0741 | 0,3867 |
|   | 0,1134 | 0,4038 |
|   | 0,0147 | 0,1399 |
|   | 0,0568 | 0,1627 |
|   | 0,0335 | 0,1717 |
|   | 0,0571 | 0,1755 |
|   | 0,0792 | 0,1913 |
|   | 0,0808 | 0,1956 |
| 0,1159  | 0,1885 |        |
| 0,0723  | 0,1943 |        |
| 0,0701  | 0,1842 |        |
| 0,0741  | 0,1567 |        |

En el efluente de la salida total, se puede observar que los valores de la relación DBO<sub>5</sub>/DQO se encuentran entre 0,1 – 0,2, no queriendo decir con esto que el efluente sea poco biodegradable, al contrario, los valores disminuyen debido a que la mayor parte de la materia orgánica biodegradable presente en el efluente ha sido removida mediante el tratamiento biológico secundario. Posteriormente, el efluente al ser vertido a la fuente receptora, sigue su degradación natural, pues como se mencionó anteriormente, la digestión bacteriana es práctica aún a estos valores.

Esto se puede observar en la tabla 29, donde la correlación de Pearson es positiva y significativa (p= 0,025), indicando que al aumentar los valores de materia orgánica biodegradable aumentan los valores de la relación DBO<sub>5</sub>/DQO.

La correlación lineal entre estos dos parámetros, se puede observar en la gráfica 13, donde la relación DBO<sub>5</sub>/DQO depende de la cantidad de materia orgánica y su correlación es del 48%. Esta correlación se plasma en la siguiente ecuación:

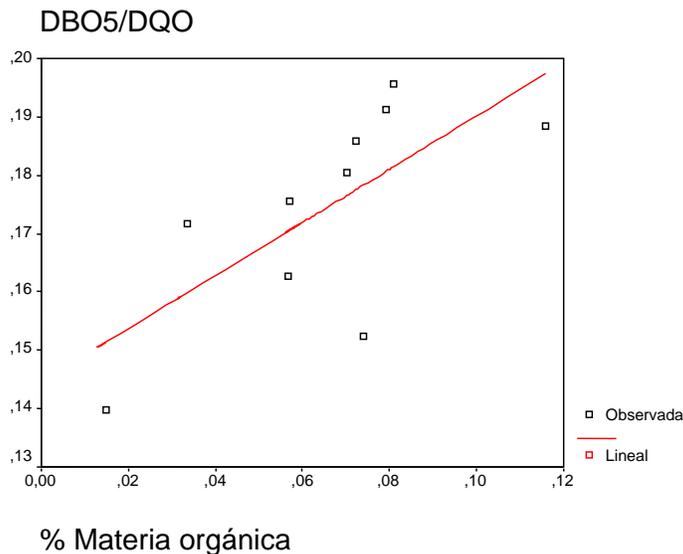
$$DBO_5/DQO = (0,4547)MO + 0,1446 \quad R_{sq} = 0,485$$

**Tabla 29. Análisis de correlación de Pearson para el efluente de la salida total**

**Correlaciones**

|          |                        | DBO5/DQC | %MO |
|----------|------------------------|----------|-----|
| DBO5/DQO | Correlación de Pearson |          |     |
|          | Sig. (bilateral)       |          |     |
|          | N                      |          |     |
| %M.O     | Correlación de Pearson | 0,696    |     |
|          | Sig. (bilateral)       | 0,025    |     |
|          | N                      | 11       |     |

**Gráfica 13. Correlación entre la relación DBO<sub>5</sub>/DQO y el % de materia orgánica para el efluente de la salida total**



#### **9.1.2.5.2 Correlación entre el porcentaje de materia orgánica y fósforo soluble:**

Mediante el análisis de correlación de Pearson (anexo 2) y el análisis de correlación de Spearman (anexo 3) para el efluente de salida total, se encontró que el porcentaje de materia orgánica presenta una correlación positiva con el contenido de fósforo, es decir que al aumentar este parámetro aumenta el contenido de fósforo, sin embargo el valor de significancia indica que esta correlación no es significativa ( $p= 0,174$ ).

Esto se podría explicar debido a que en el proceso de obtención de papel a partir de bagazo de caña, se utiliza fosfato de amonio que puede pasar como residuo a la PTAR, además allí como parte del tratamiento se utiliza una fuente mineral de fósforo para mantenimiento de los microorganismos. Estos microorganismos tienen un tiempo de vida corto y al pasar a formar parte de los residuos en forma de materia orgánica hacen un aporte de compuestos de fósforo ya que en sus membranas celulares contienen fosfolípidos, que al degradarse pasan a la solución, por esto se podría explicar probablemente el aumento del fósforo con el aumento de la materia orgánica. Sin embargo el hecho de que la correlación no sea significativa, indicaría solamente que existe una influencia pero no una dependencia total.

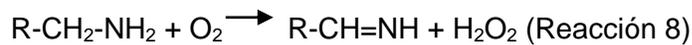
#### **9.1.2.5.3 Correlación entre el porcentaje de materia orgánica y nitrógeno amoniacal:**

Al analizar los datos registrados en la tabla 30, en los efluentes de la entrada del clarificador y salida del clarificador, se observa una relación directa entre la cantidad de materia orgánica y la de nitrógeno amoniacal, es decir que al aumentar el porcentaje de materia orgánica, aumenta la cantidad de nitrógeno amoniacal y viceversa. Este comportamiento se debe al proceso de

amonificación, mediante el cual el nitrógeno orgánico es transformado en nitrógeno amoniacal. Los mecanismos responsables de esta transformación son la hidrólisis de la materia orgánica (adición de agua a moléculas grandes, lo que resulta en la fragmentación en moléculas más pequeñas) y la desaminación subsiguiente de los aminoácidos responsables (remoción de un grupo NH<sub>2</sub> de un aminoácido o amina).

### **Desaminación oxidativa de aminas**

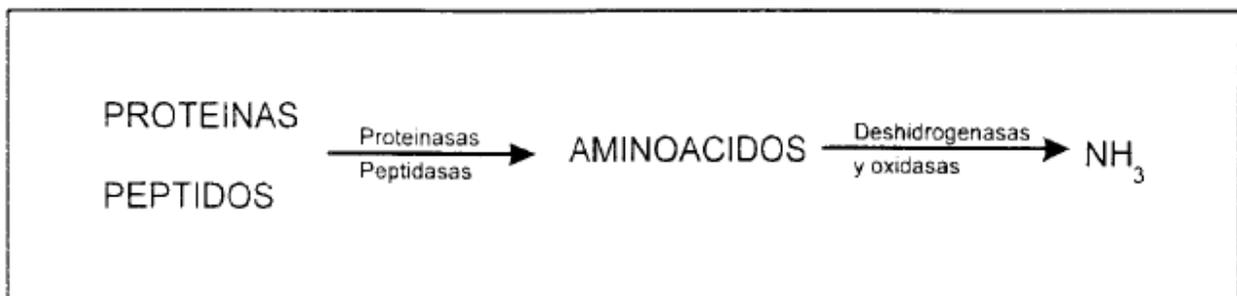
La monoamina oxidasa (MAO) y la diamina oxidasa (DAO) catalizan la desaminación de aminas a aldehídos en presencia de oxígeno. Los productos aldehídicos pueden metabolizarse posteriormente por otros enzimas al ácido correspondiente. Un mecanismo probable para la desaminación oxidativa de aminas se representa en dos pasos:



Los sustratos de la monoamina oxidasa son las catecolaminas, las triptaminas y otras arilalquilaminas y alquilaminas, siempre que el átomo de carbono no esté sustituido. Las aminas secundarias se oxidan mediante la MAO, siempre que uno de los sustituyentes sobre el nitrógeno sea un metilo.

La diamina oxidasa ataca a las diaminas y a la histamina de la misma manera que la MAO oxida a las monoaminas, con formación de aldehídos. Los reactivos bloqueantes del grupo carbonilo inhiben a este enzima, que produce peróxido de hidrógeno. (Disponible en Internet: [www.ingenieroambiental.com/newinformes/aspectoslagunasestabilizacion.pdf](http://www.ingenieroambiental.com/newinformes/aspectoslagunasestabilizacion.pdf))

### **Desaminación de aminoácidos (Reacción 10)**



**Tabla 30. Valores de promedios % materia orgánica y nitrógeno amoniacal**

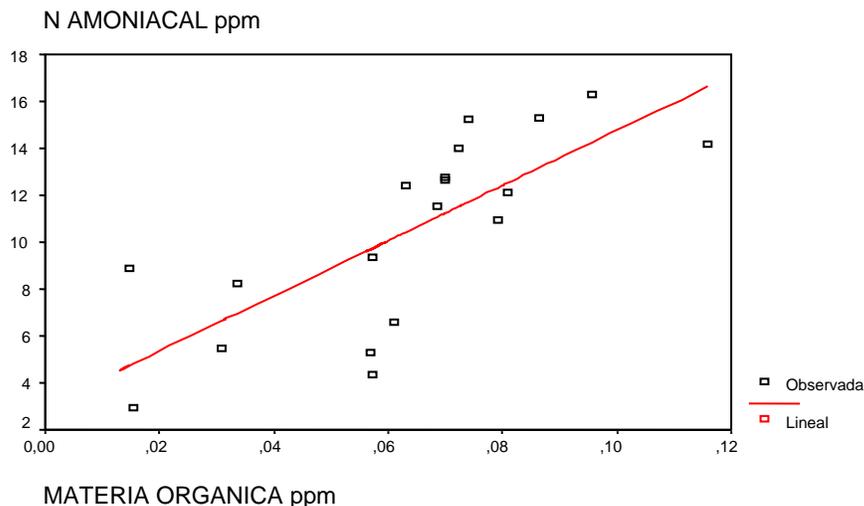
| Promedio% materia orgánica y promedio nitrógeno amoniacal ppm |         |       |
|---|---------|-------|
| Entrada al Clarificador                                       | 0,0217  | 13,3  |
|   | 0,0334  | 6,119 |
|   | 0,0218  | 1,688 |
|   | 0,02    | 2,532 |
|   | 0,0616  | 14,77 |
|   | 0,0697  | 13,08 |
|   | 0,0391  | 2,187 |
|   | 0,0813  | 2,187 |
|   | 0,0917  | 5,530 |
|   | 0,1068  | 6,570 |
|   | 0,1209  | 18,10 |
|   | 0,1201  | 14,50 |
|   | 0,0904  | 16,92 |
|   | 0,0761  | 15,23 |
|   | 0,0956  | 16,12 |
|   | 0,0890  | 15,34 |
|   | 0,0913  | 15,79 |
| 0,0967  | 16,68   |       |
| 0,0978  | 16,83   |       |
| 0,0855  | 15,18   |       |
| Salida del Clarificador                                       | 0,0544  | 11,39 |
|   | 0,0492  | 5,697 |
|   | 0,0686  | 8,651 |
|   | 0,0590  | 5,908 |
|   | 0,0612  | 10,97 |
|   | 0,0758  | 9,285 |
|   | 0,0438  | 2,187 |
|   | 0,0992  | 4,373 |
|   | 0,0776  | 7,258 |
|   | 0,1042  | 8,746 |
|   | 0,1021  | 14,03 |
|   | 0,1003  | 16,15 |
|   | 0,0966  | 13,46 |
|   | 0,1034  | 17,50 |
|   | 0,1006  | 16,59 |
|   | 0,0987  | 14,65 |
|   | 0,0741  | 13,20 |
| 0,0722  | 12,98   |       |
| 0,1134  | 17,43   |       |
| 0,0954  | 14,11   |       |
| Salida Total  | 0,00538 | 5,275 |
|   | 0,0147  | 8,862 |
|   | 0,0568  | 5,275 |
|   | 0,0153  | 2,954 |
|   | 0,0335  | 8,229 |
|   | 0,0309  | 5,486 |
|   | 0,0571  | 4,373 |
|   | 0,0610  | 6,560 |
|   | 0,0572  | 9,362 |
|   | 0,0792  | 10,93 |
|   | 0,0956  | 16,28 |
|   | 0,0808  | 12,13 |
|   | 0,0865  | 15,31 |
|   | 0,1159  | 14,17 |
|   | 0,0698  | 12,79 |
|   | 0,0723  | 13,98 |
|   | 0,0701  | 12,65 |
| 0,0687  | 11,54   |       |
| 0,0741  | 15,23   |       |
| 0,0632  | 12,41   |       |

Mediante el análisis de correlación de Pearson (anexo 2) y el análisis de correlación de Spearman (anexo 3) para el efluente de salida total, se encontró que el porcentaje de materia orgánica presenta una correlación positiva y altamente significativa ( $p= 0,000$ ) con el contenido de nitrógeno amoniacal, es decir que al aumentar este parámetro aumenta el contenido de nitrógeno amoniacal, siguiendo el proceso de amonificación mencionado anteriormente.

La dependencia del nitrógeno amoniacal del contenido de materia orgánica, se puede observar en la gráfica 14, donde hay una relación lineal entre el nitrógeno amoniacal y la materia orgánica en un porcentaje del 63%. Esta correlación está dada por la siguiente ecuación:

$$N-NH_4^+ = 136,964MO + 2,8562 \quad R_{sq} = 0,633$$

**Gráfica 14. Análisis de correlación entre el porcentaje de materia orgánica y el nitrógeno amoniacal para el efluente de la salida total**



### 9.1.2.6 Caracterización del fósforo soluble:

Al igual que el nitrógeno, el fósforo es necesario en los procesos de tratamiento biológico de las aguas residuales. En las aguas residuales industriales con poco contenido de fósforo, sometidas a tratamiento biológico, es necesario agregarlo para obtener un crecimiento óptimo de microorganismos; como en el caso de los residuos líquidos provenientes de la industria de papel. Esto se puede observar en la tabla 31, en donde se puede apreciar en general, un aumento bastante notable del fósforo soluble a través de su paso por el tratamiento primario (clarificador).

Los valores de fósforo soluble obtenidos, después del tratamiento del agua residual en las últimas fechas son superiores a los de la entrada y salida del clarificador (Ver gráfica 15); sin embargo comparado los valores obtenidos con el rango de 2 - 7 mg/L para aguas residuales domésticas tratadas por medio de lagunas de estabilización (Araujo, 1993), no superan el rango

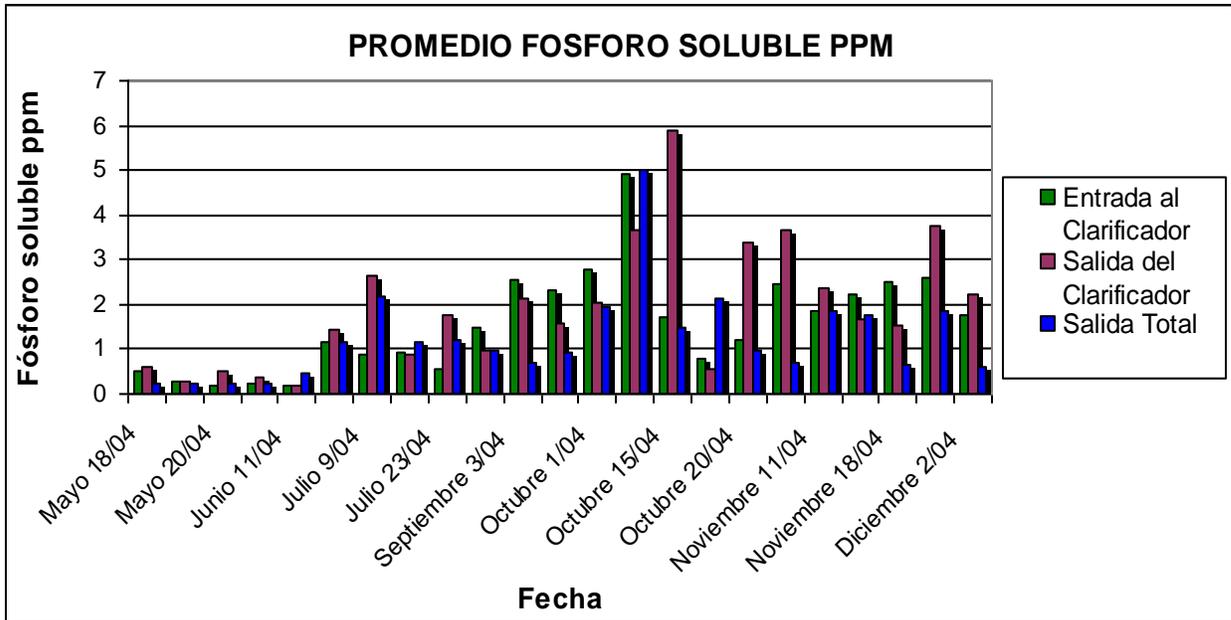
a excepción del valor reportado para la fecha de Octubre 14/04. Este incremento se podría atribuir en menor proporción a la aplicación de sales nutrientes con el objeto de alimentar los microorganismos de la PTAR, y en mayor proporción a los procesos de lavado con detergentes, aguas que provienen del restaurante, sanitarios, etc, de Propal planta II.

Estos resultados indicarían que no es conveniente estar agregando continuamente fuente de este nutriente, puesto que a largo plazo podría ocasionar problemas de eutrofización sobre la fuente de vertido, consistente ésta en un aumento de la actividad biológica del agua como consecuencia de una mayor presencia de nutrientes. Sus consecuencias principales serían la aparición de bacterias productoras de toxinas, disminución de la concentración de oxígeno en el agua, desplazamiento y mortandad de organismos que necesiten oxígeno, malos olores, etc.

**Tabla 31. Valores de fósforo soluble para los efluentes entrada al clarificador, salida del clarificador y salida total de la PTAR**

| Fecha            | Promedio fósforo soluble ppm |                         |              |
|------------------|------------------------------|-------------------------|--------------|
|                  | Entrada al Clarificador      | Salida del Clarificador | Salida Total |
| Mayo 18/04       | 0,514                        | 0,59                    | 0,246        |
| Mayo 19/04       | 0,287                        | 0,273                   | 0,252        |
| Mayo 20/04       | 0,191                        | 0,514                   | 0,252        |
| Junio 8/04       | 0,218                        | 0,383                   | 0,211        |
| Junio 11/04      | 0,198                        | 0,198                   | 0,459        |
| Julio 8/04       | 1,14                         | 1,429                   | 1,168        |
| Julio 9/04       | 0,858                        | 2,626                   | 2,165        |
| Julio 22/04      | 0,92                         | 0,8787                  | 1,168        |
| Julio 23/04      | 0,5691                       | 1,739                   | 1,188        |
| Septiembre 2/04  | 1,467                        | 0,9539                  | 0,9926       |
| Septiembre 3/04  | 2,568                        | 2,128                   | 0,6762       |
| Septiembre 30/04 | 2,310                        | 1,572                   | 0,9315       |
| Octubre 1/04     | 2,774                        | 2,059                   | 1,935        |
| Octubre 14/04    | 4,914                        | 3,655                   | 5,024        |
| Octubre 15/04    | 1,694                        | 5,884                   | 1,502        |
| Octubre 19/04    | 0,8069                       | 0,5385                  | 2,114        |
| Octubre 20/04    | 1,192                        | 3,366                   | 0,9513       |
| Noviembre 10/04  | 2,456                        | 3,654                   | 0,6987       |
| Noviembre 11/04  | 1,843                        | 2,369                   | 1,832        |
| Noviembre 17/04  | 2,214                        | 1,681                   | 1,749        |
| Noviembre 18/04  | 2,501                        | 1,543                   | 0,6431       |
| Diciembre 1/04   | 2,598                        | 3,757                   | 1,865        |
| Diciembre 2/04   | 1,764                        | 2,211                   | 0,6116       |

**Gráfica 15. Promedio fósforo soluble para los efluentes entrada al clarificador, salida del clarificador y salida total de la PTAR**



El Análisis de Varianza (ANOVA anexo 1), indica que no hay diferencia significativa entre los datos de contenido de fósforo soluble provenientes de los tres puntos de muestreo en función del tiempo, corroborándose con la comparación múltiple de Duncan (tabla 32), donde se observa que la diferencia entre los tres efluentes para el parámetro de fósforo soluble no es significativa y que su remoción a través del tratamiento primario y secundario es mínima. Solamente existe un ligero aumento del fósforo soluble a través del tratamiento primario, debido a como se menciona anteriormente en el análisis mes a mes, este es adicionado.

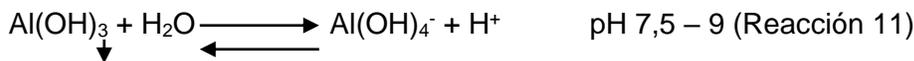
**Tabla 32. Prueba de Duncan para el parámetro de fósforo soluble en los tres sitios de muestreo**

| Duncan <sup>a</sup>     |    |                      |
|-------------------------|----|----------------------|
| FOSFORO                 |    |                      |
| SITIO                   | N  | Significancia = 0.05 |
|                         |    | 1                    |
| SALIDA TOTAL            | 23 | 1.2450               |
| ENTRADA AL CLARIFICADOR | 23 | 1.5651               |
| SALIDA DEL CLARIFICADOR | 23 | 1.9131               |
| Sig.                    |    | 0.081                |

### 9.1.2.6.1 Correlación entre el fósforo soluble y el pH:

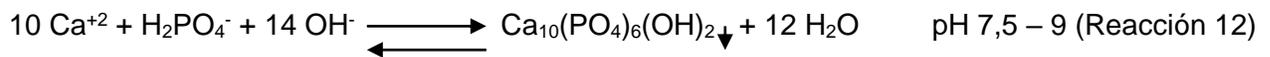
El fósforo cumple un papel primordial en la transferencia energética de los sistemas celulares; generalmente se encuentra unido al hierro, aluminio, calcio y magnesio, dependiendo del pH encontrado en el medio. Esto se puede observar en la tabla 33, en donde a diferentes valores de pH básico o alcalino entre 7,16 a 8,89, se presenta una notable disminución del fósforo en solución, debido a que se encuentra precipitado en forma de fosfato de calcio  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$  y magnesio  $\text{Mg}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$  y la concentración de fósforo soluble reportada corresponde por lo tanto a los fosfatos de hierro y aluminio  $\text{Al}(\text{OH})_2 \text{H}_2\text{PO}_4$  que son solubles a partir del rango de pH 7,5 a 9, siendo estos fosfatos de menor concentración en solución que los anteriores.

#### Reacción de solubilidad del aluminio:



A diferentes valores de pH ácido y ligeramente básicos, en el rango de 4,63 a 7,59, se observa un aumento notable del fósforo soluble, ya que a estos pHs los fosfatos de calcio y magnesio se encuentran solubles, representando la mayor cantidad de éste en solución, siendo el de mayor proporción el fosfato de calcio. A estos valores de pH, los fosfatos de hierro y aluminio se encuentran precipitados. (Orozco, 1985)

#### Reacciones de precipitación:



**Tabla 33. Valores de pH y fósforo soluble**

| pH y promedio fósforo soluble ppm |        |
|-----------------------------------|--------|
|                                   | 6,01   |
|                                   | 6,18   |
|                                   | 7,2    |
|                                   | 5,75   |
|                                   | 8,89   |
|                                   | 6,49   |
|                                   | 6,73   |
|                                   | 6,09   |
|                                   | 6,33   |
|                                   | 6,96   |
|                                   | 6,27   |
|                                   | 6,62   |
|                                   | 7,52   |
|                                   | 6,21   |
|                                   | 6,70   |
|                                   | 5,48   |
|                                   | 6,29   |
|                                   | 6,15   |
|                                   | 5,55   |
|                                   | 7,12   |
|                                   | 6,75   |
| Entrada al Clarificador           | 9,21   |
|                                   | 7,03   |
|                                   | 0,514  |
|                                   | 0,287  |
|                                   | 0,191  |
|                                   | 0,218  |
|                                   | 0,198  |
|                                   | 1,14   |
|                                   | 0,858  |
|                                   | 0,92   |
|                                   | 0,5691 |
|                                   | 1,467  |
|                                   | 2,568  |
|                                   | 2,310  |
|                                   | 2,774  |
|                                   | 4,914  |
|                                   | 1,694  |
|                                   | 0,8069 |
|                                   | 1,192  |
|                                   | 2,456  |
|                                   | 1,843  |
|                                   | 2,214  |
|                                   | 2,501  |
|                                   | 2,598  |
|                                   | 1,764  |

**Continuación tabla 33. Valores de pH y fósforo soluble**

|                         |        |        |
|-------------------------|--------|--------|
| Salida del Clarificador | 7,58   | 0,59   |
|                         | 6      | 0,273  |
|                         | 6,41   | 0,514  |
|                         | 4,87   | 0,383  |
|                         | 7,16   | 0,198  |
|                         | 6,91   | 1,429  |
|                         | 5,78   | 2,626  |
|                         | 6,29   | 0,8787 |
|                         | 5,37   | 1,739  |
|                         | 6,28   | 0,9539 |
|                         | 6,63   | 2,128  |
|                         | 6,80   | 1,572  |
|                         | 6,93   | 2,059  |
|                         | 4,63   | 3,655  |
|                         | 5,38   | 5,884  |
|                         | 4,76   | 0,5385 |
|                         | 5,41   | 3,366  |
|                         | 6,40   | 3,654  |
|                         | 6,35   | 2,369  |
|                         | 7,22   | 1,681  |
| 6,02                    | 1,543  |        |
| 5,78                    | 3,757  |        |
| 6,38                    | 2,211  |        |
| Salida Total            | 7,58   | 0,246  |
|                         | 7,28   | 0,252  |
|                         | 8,06   | 0,252  |
|                         | 7,51   | 0,211  |
|                         | 7,47   | 0,459  |
|                         | 7,36   | 1,168  |
|                         | 7,95   | 2,165  |
|                         | 7,44   | 1,168  |
|                         | 7,58   | 1,188  |
|                         | 7,53   | 0,9926 |
|                         | 7,61   | 0,6762 |
|                         | 7,65   | 0,9315 |
|                         | 7,70   | 1,935  |
|                         | 7,48   | 5,024  |
|                         | 7,49   | 1,502  |
|                         | 7,44   | 2,114  |
|                         | 7,45   | 0,9513 |
|                         | 7,21   | 0,6987 |
|                         | 7,75   | 1,832  |
|                         | 7,94   | 1,749  |
| 7,67                    | 0,6431 |        |
| 7,59                    | 1,859  |        |
| 7,16                    | 0,6116 |        |

Sin embargo a la salida total, la correlación de Pearson y la correlación de Spearman (anexo 2 y 3), indican que hay una correlación positiva entre los dos parámetros, es decir que a mayor pH mayor contenido de fósforo soluble, pero esta correlación no es significativa ( $p=0,578$ ).

### 9.1.2.7 Caracterización del nitrógeno amoniacal:

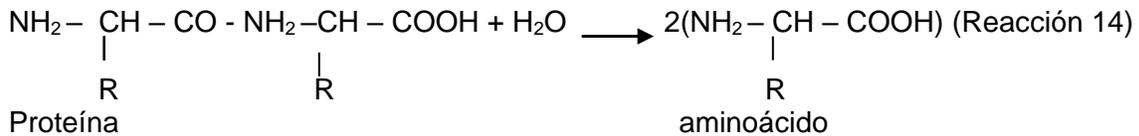
Al igual que el fósforo, el nitrógeno, es necesario en los procesos de tratamiento biológico de las aguas residuales. Igualmente, el nitrógeno se adiciona para obtener un crecimiento óptimo de microorganismos. Esto se puede observar en la tabla 34, en donde se puede apreciar generalmente, un aumento bastante notable del nitrógeno amoniacal a través de su paso por el tratamiento primario (clarificador).

**Tabla 34. Valores de nitrógeno amoniacal para los efluentes entrada al clarificador, salida del clarificador y salida total de la PTAR**

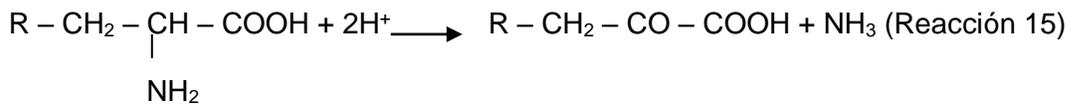
| Fecha            | Promedio nitrógeno amoniacal ppm |                         |              |
|------------------|----------------------------------|-------------------------|--------------|
|                  | Entrada al Clarificador          | Salida del Clarificador | Salida Total |
| Mayo 18/04       | 5,697                            | 9,285                   | 13,72        |
| Mayo 19/04       | 5,064                            | 10,34                   | 13,08        |
| Mayo 20/04       | 5,572                            | 9,917                   | 13,92        |
| Junio 8/04       | 13,3                             | 11,39                   | 5,275        |
| Junio 11/04      | 6,119                            | 5,697                   | 8,862        |
| Julio 8/04       | 1,688                            | 8,651                   | 5,275        |
| Julio 9/04       | 2,532                            | 5,908                   | 2,954        |
| Julio 22/04      | 14,77                            | 10,97                   | 8,229        |
| Julio 23/04      | 13,08                            | 9,285                   | 5,486        |
| Septiembre 2/04  | 2,187                            | 2,187                   | 4,373        |
| Septiembre 3/04  | 2,187                            | 4,373                   | 6,560        |
| Septiembre 30/04 | 5,530                            | 7,258                   | 9,362        |
| Octubre 1/04     | 6,570                            | 8,746                   | 10,93        |
| Octubre 14/04    | 18,10                            | 14,03                   | 16,28        |
| Octubre 15/04    | 14,50                            | 16,15                   | 12,13        |
| Octubre 19/04    | 16,92                            | 13,46                   | 15,31        |
| Octubre 20/04    | 15,23                            | 17,50                   | 14,17        |
| Noviembre 10/04  | 16,12                            | 16,59                   | 12,79        |
| Noviembre 11/04  | 15,34                            | 14,65                   | 13,98        |
| Noviembre 17/04  | 15,79                            | 13,20                   | 12,65        |
| Noviembre 18/04  | 16,68                            | 12,98                   | 11,54        |
| Diciembre 1/04   | 16,83                            | 17,43                   | 15,23        |
| Diciembre 2/04   | 15,18                            | 14,11                   | 12,41        |

El nitrógeno entra en las lagunas de oxidación y estabilización (tratamiento secundario), con el agua residual en forma de nitrógeno amoniacal, nitrógeno orgánico y nitratos; además, algunas especies de algas pueden fijar nitrógeno atmosférico. El proceso biológico a continuación, consiste en la ruptura de las proteínas, mediante hidrólisis, en aminoácidos, los cuales son descompuestos por las bacterias en amoníaco. El amoníaco soluble se combina con el ión H<sup>+</sup> para formar ión amonio.

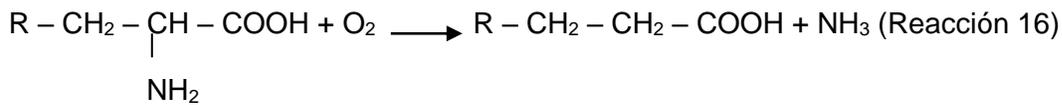
Las reacciones que describen este proceso son las siguientes:



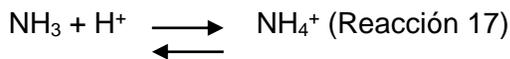
**Desaminación oxidativa**



**Desaminación reducida**



**Amonólisis**



En general se puede observar, en la gráfica 16, que hay una remoción mínima del nitrógeno amoniacal a través del tratamiento biológico. El nitrógeno amoniacal disminuye debido a procesos de transformación, en donde se puede perder en forma de gas o cuando es utilizado por los microorganismos como fuente de nitrógeno para construir su material celular. La asimilación del amonio por la cantidad de algas, depende de la actividad biológica del sistema y puede estar afectada por parámetros como temperatura, carga orgánica, tiempo de retención y las características del afluente.

Estos procesos de transformación son los siguientes:

- Nitrificación: Consiste en la conversión de amonio a nitrato mediante la acción microbiana.

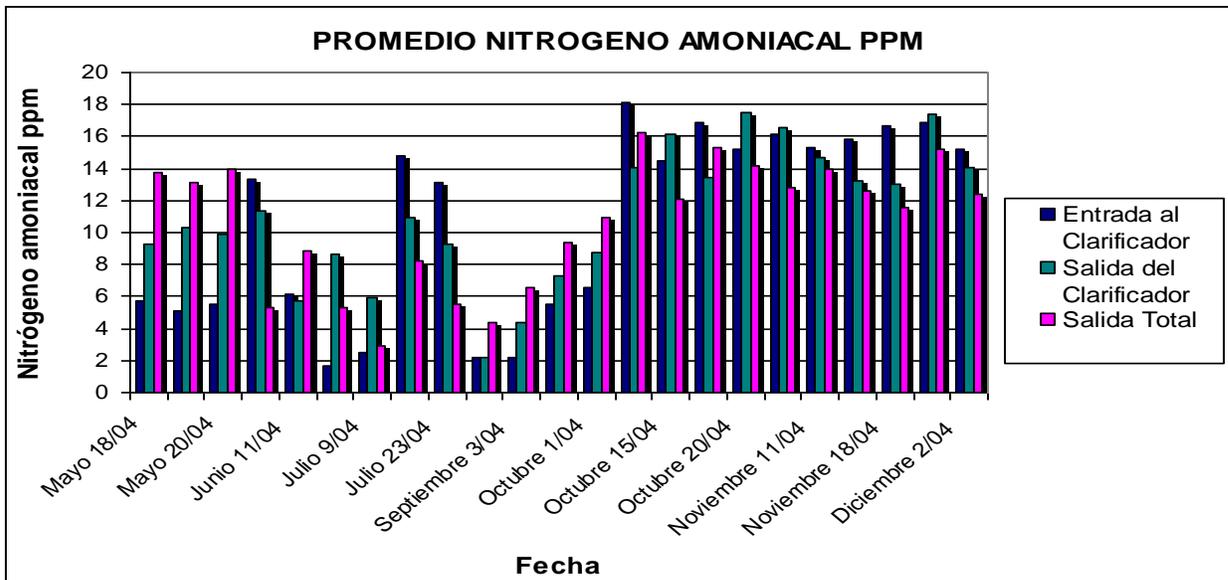


- Asimilación por los microorganismos: Tanto el nitrógeno amoniacal como los nitratos pueden ser utilizados por los microorganismos como nutrientes. De esta forma se incorporan al tejido celular y vuelven a formar parte del nitrógeno orgánico presente en el medio.

Se encuentra nitrógeno amoniacal tanto en el tratamiento primario como en el secundario, debido habitualmente a que la materia orgánica se transforma continuamente hasta el proceso de mineralización. (Hernandez, 1998)

Los valores obtenidos en la salida total para el nitrógeno amoniacal, presentan un ligero aumento en las últimas fechas (ver gráfica 16), sin embargo al comparar estos valores con el rango de 12 – 50 mg/L para aguas residuales domésticas tratadas por medio de lagunas de estabilización (Metcalf y Eddy, 1991), éstos no exceden este rango.

**Gráfica 16. Promedio nitrógeno amoniacal para los efluentes entrada al clarificador, salida del clarificador y salida total de la PTAR**



Mediante el Análisis de Varianza (ANOVA anexo 1), el parámetro de nitrógeno amoniacal no presenta diferencia significativa entre los tres sitios de muestreo y en función del tiempo, corroborándose con la comparación múltiple de Duncan (tabla 35), donde se observa que la diferencia entre los tres efluentes para el parámetro de nitrógeno amoniacal no es significativa y que su remoción a través del tratamiento primario y secundario es mínima. Solamente existe un ligero aumento al igual que el fósforo soluble a través del tratamiento primario, debido a como se menciona anteriormente en el análisis mes a mes, este es adicionado.

La mínima remoción a través de los tratamientos primario y secundario para el nitrógeno amoniacal, se podría atribuir a la aplicación continua de fuentes de este nutriente para el mantenimiento de los microorganismos que estarían provocando una acumulación con la cual los microorganismos no pueden exceder su capacidad de transformación.

**Tabla 35. Prueba de Duncan para el parámetro de nitrógeno amoniacal en los tres sitios de muestreo**

| N AMONICAL              |    |                      |
|-------------------------|----|----------------------|
| Duncan <sup>a</sup>     |    |                      |
| SITIO                   | N  | Significancia = 0.05 |
|                         |    | 1                    |
| SALIDA TOTAL            | 23 | 10.6311              |
| ENTRADA AL CLARIFICADOR | 23 | 10.6516              |
| SALIDA DEL CLARIFICADOR | 23 | 11.0481              |
| Sig.                    |    | 0.783                |

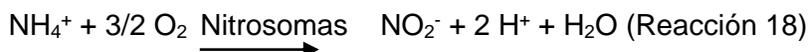
#### 9.1.2.7.1 Correlación entre el nitrógeno amoniacal y el pH:

La prueba de correlación de Pearson (anexo 2) y de correlación de Spearman (anexo 3), indica que se presenta una correlación negativa entre estos dos parámetros, es decir que al disminuir el pH aumenta el contenido de nitrógeno amoniacal, pero esta correlación no es significativa ( $p=0,904$ ).

#### 9.1.2.8 Caracterización de nitritos:

Los nitritos se encuentran en las aguas residuales debido a diversos procesos, desde una oxidación incompleta del amonio, cuya nitrificación no se completa totalmente, hasta la reducción de los nitratos mediante la influencia de una desnitrificación. Los nitritos representan un grado intermedio metaestable y tóxico, en comparación, con la degradación bacteriana proteínas – amonio – nitritos – nitratos, es por esta razón que se convierten en un importante indicador de impurificación.

#### ***Nitrificación incompleta***

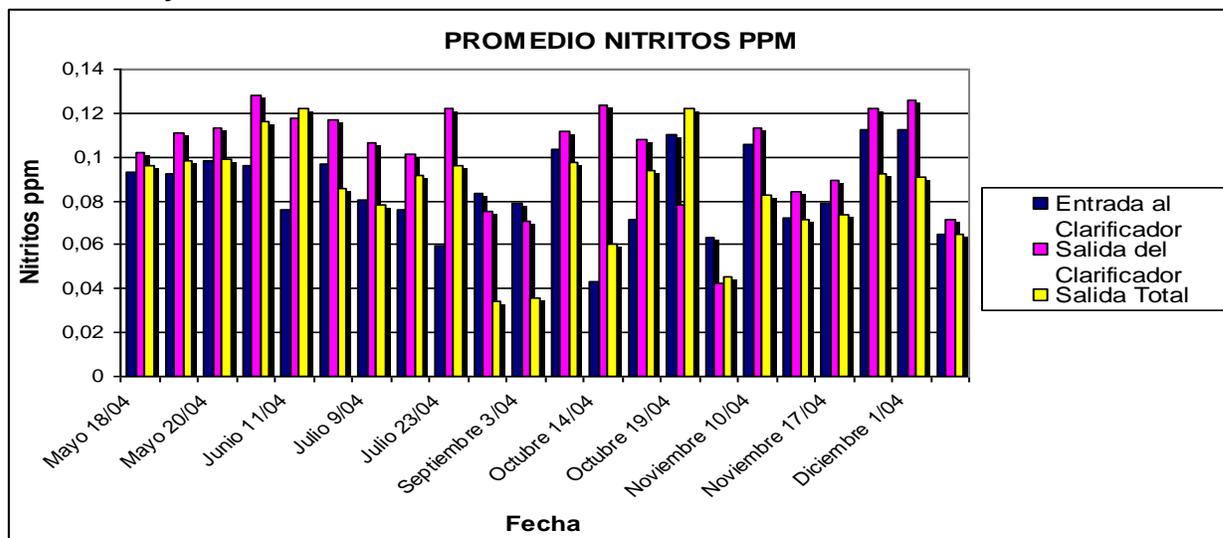


Los nitritos en aguas residuales, se encuentran generalmente en el rango de 0,025 – 0,050 mg/L, concentraciones de nitritos superiores a las antes mencionadas serían indicadoras de condiciones anóxicas o de aportes contaminantes introducidos por líquidos residuales con presencia de nitrógeno amoniacal (WHO, 1987). Esto se puede observar en el aumento de la concentración de nitritos a través del tratamiento primario (tabla 36 y gráfica 17).

**Tabla 36. Valores de nitritos para los efluentes entrada al clarificador, salida del clarificador y salida total de la PTAR**

| Fecha           | Promedio nitritos ppm   |                         |              |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|--------------|
|                 | Entrada al Clarificador | Salida del Clarificador | Salida Total |
| Mayo 18/04      | 0,0933                  | 0,1022                  | 0,0960       |
| Mayo 19/04      | 0,0927                  | 0,1110                  | 0,0982       |
| Mayo 20/04      | 0,0986                  | 0,1131                  | 0,0992       |
| Junio 8/04      | 0,0962                  | 0,1282                  | 0,1165       |
| Junio 11/04     | 0,0756                  | 0,1176                  | 0,1222       |
| Julio 8/04      | 0,0967                  | 0,1168                  | 0,0860       |
| Julio 9/04      | 0,0805                  | 0,1066                  | 0,0782       |
| Julio 22/04     | 0,0760                  | 0,1010                  | 0,0919       |
| Julio 23/04     | 0,0599                  | 0,1221                  | 0,0963       |
| Septiembre 2/04 | 0,0833                  | 0,0753                  | 0,0341       |
| Septiembre 3/04 | 0,0786                  | 0,0704                  | 0,0357       |
| Octubre 1/04    | 0,1034                  | 0,1115                  | 0,0972       |
| Octubre 14/04   | 0,0434                  | 0,1237                  | 0,0605       |
| Octubre 15/04   | 0,0712                  | 0,1082                  | 0,0936       |
| Octubre 19/04   | 0,1102                  | 0,0783                  | 0,1219       |
| Octubre 20/04   | 0,0631                  | 0,0425                  | 0,0456       |
| Noviembre 10/04 | 0,1058                  | 0,1130                  | 0,0825       |
| Noviembre 11/04 | 0,0722                  | 0,0842                  | 0,0712       |
| Noviembre 17/04 | 0,0791                  | 0,0890                  | 0,0735       |
| Noviembre 18/04 | 0,1128                  | 0,1225                  | 0,0923       |
| Diciembre 1/04  | 0,1128                  | 0,1259                  | 0,0911       |
| Diciembre 2/04  | 0,0650                  | 0,0715                  | 0,0650       |

**Gráfica 17. Promedio nitritos para los efluentes entrada al clarificador, salida del clarificador y salida total de la PTAR**



Algunas veces aparecen nitritos de forma natural en las aguas pobres en oxígeno. Esto se puede observar en los valores de oxígeno disuelto reportados en los perfiles de la laguna de oxidación (ver anexo 5), los cuales se encuentran en un promedio de 0,18 mg/L que a la vez están influyendo en las altas concentraciones de éstos encontradas en el efluente final. Además del oxígeno disuelto, las altas temperaturas probablemente bajo la influencia de una acción microbiana, es otro factor determinante en las altas concentraciones de nitritos encontradas en aguas residuales, sin embargo a pesar de que el efluente de la salida del clarificador entra a temperaturas del orden de 40 °C, ésta disminuye al pasar el efluente a través de la laguna de oxidación, manteniéndose entre 31 a 35 °C, lo que en este caso no afectaría directamente en el parámetro de nitritos.

Según el Decreto 1594/84, artículo 38 y 39, la concentración de nitritos aceptada por la Norma Colombiana es de 1 mg/L para aguas de consumo humano y doméstico, el cual requiere para su potabilización solamente tratamiento convencional o desinfección. Comparando los valores reportados para el efluente de salida total con este valor, la concentración de nitritos no excede el valor admisible, teniendo en cuenta que no corresponde a aguas de vertido.

A pesar de que la concentración de nitritos en el efluente de salida total disminuye a través del tratamiento secundario y es menor del valor establecido, su concentración es relativamente alta (aproximadamente 0,1 mg/L) y podrían presentar problemas de toxicidad a largo plazo. Según Erikson (1985) valores entre 0,1 y 0,9 mg/L pueden presentar problemas de toxicidad dependiendo del pH, asimismo valores por encima de 1 mg/L son totalmente tóxicos y representan un impedimento para el desarrollo de la vida piscícola y el establecimiento de un ecosistema fluvial en buenas condiciones.

El Análisis de Varianza (ANOVA anexo 1), indica que existe diferencia significativa entre los valores de nitritos en los tres puntos de muestreo y en función del tiempo, lo cual se corrobora con la comparación múltiple de Duncan (tabla 37), dado que se observa que los nitritos de la salida total son significativamente inferiores a los de la salida del clarificador, pero no hay diferencia entre el contenido de nitritos de la salida total y los de la entrada al clarificador, esto significa que hay una remoción en el tratamiento secundario.

**Tabla 37. Prueba de Duncan para el parámetro de nitritos en los tres sitios de muestreo**

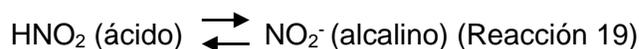
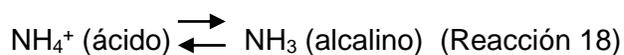
| NITRITOS                |    |                      |        |
|-------------------------|----|----------------------|--------|
| Duncan <sup>a</sup>     |    |                      |        |
| SITIO                   | N  | Significancia = 0.05 |        |
|                         |    | 1                    | 2      |
| SALIDA TOTAL            | 22 | 0.0840               |        |
| ENTRADA AL CLARIFICADOR | 22 | 0.0850               |        |
| SALIDA DEL CLARIFICADOR | 22 |                      | 0.1016 |
| Sig.                    |    | 0.883                | 1.000  |

La correlación entre el parámetro de nitritos y el parámetro de nitrógeno amoniacal para el efluente de salida total, mediante el análisis de correlación de Pearson (anexo 2) y el análisis de

correlación de Spearman (anexo 3), es positiva, es decir que al aumentar el contenido de nitrógeno amoniacal aumenta el contenido de nitritos, sin embargo esta correlación no es significativa ( $p= 0,662$ )

#### 9.1.2.8.1 Correlación entre nitritos y el pH:

Los daños ocasionados por nitritos dependen en gran medida del valor del pH, al igual que en el amonio. En ambos casos que se observan en la reacción, existe un equilibrio entre las diferentes formas en aguas, que depende del pH como las formas no ionizadas amoníaco y ácido nitroso difunden más fácilmente que los iones  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_2^-$  a través de las membranas biológicas, su toxicidad es considerablemente mayor.



Con respecto a los nitritos, a diferencia del amonio, el peligro reside en las aguas ácidas, puesto que aquí aumenta fuertemente la porción de  $\text{HNO}_2$ :

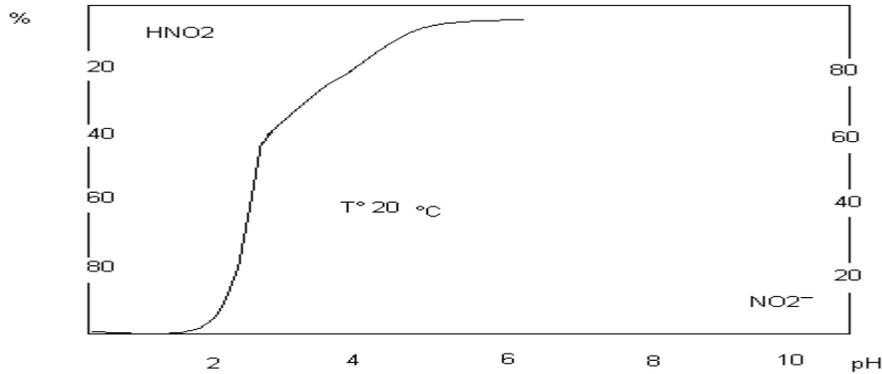
**Tabla 38. %  $\text{HNO}_2$  en función del pH**

| Valor de pH | Cantidad de $\text{HNO}_2$ a 20 °C |
|-------------|------------------------------------|
| 8           | 0,0024%                            |
| 7           | 0,024%                             |
| 6           | 0,24%                              |
| 5           | 2,36%                              |
| 4           | 19,49%                             |

Este comportamiento lo podemos observar en la tabla 39 para los efluentes de entrada al clarificador y salida del clarificador, donde a pH ácido, la concentración de nitritos aumenta con respecto a pHs cercanos o mayores a 7.

En cuanto al efluente final, los valores de pH son ligeramente alcalinos y sin embargo las concentraciones de nitritos son altas, para este caso la concentración de éstos no es dependiente del pH y se debe mayormente a otros factores mencionados anteriormente. Sin embargo al comparar los valores reportados de pHs cercanos a 7 con pHs un poco mayores, se observa una pequeña diferencia, ya que los primeros tienen mayor concentración de nitritos comparados con los segundos, pues como se ve en la gráfica 18, la concentración de nitritos disminuye con el aumento de pH.

**Gráfica 18. Relación entre el pH y la cantidad de HNO<sub>2</sub>**



Fuente: Orozco Jaramillo Álvaro y Salazar Arias Álvaro. Tratamientos biológicos de las aguas residuales. Medellín, Colombia. 1985. Pág. 72.

La independencia del parámetro de nitritos del parámetro de pH para el efluente de la salida total, se observa en el análisis de correlación de Pearson (anexo 2) y el análisis de correlación de Spearman (anexo 3), donde la correlación negativa no es significativa ( $\rho = 0,919$ ).

**Tabla 39. Valores de pH y nitritos**

| pH y promedio nitritos ppm |      |        |
|----------------------------|------|--------|
|                            | 6,01 | 0,0933 |
|                            | 6,18 | 0,0927 |
|                            | 7,2  | 0,0986 |
|                            | 5,75 | 0,0962 |
|                            | 8,89 | 0,0756 |
|                            | 6,49 | 0,0967 |
|                            | 6,73 | 0,0805 |
|                            | 6,09 | 0,0760 |
|                            | 6,33 | 0,0599 |
|                            | 6,96 | 0,0833 |
|                            | 7,52 | 0,1034 |
|                            | 6,21 | 0,0434 |
|                            | 6,70 | 0,0712 |
|                            | 5,48 | 0,1102 |
|                            | 6,29 | 0,0631 |
|                            | 6,15 | 0,1058 |
|                            | 5,55 | 0,0722 |
|                            | 7,12 | 0,0791 |
|                            | 6,75 | 0,1128 |
| Entrada al Clarificador    | 9,21 | 0,1181 |
|                            | 7,03 | 0,0650 |

**Continuación tabla 39. Valores de pH y nitritos**

|                         |      |        |
|-------------------------|------|--------|
|                         | 7,58 | 0,1022 |
|                         | 6    | 0,1110 |
|                         | 6,41 | 0,1131 |
|                         | 4,87 | 0,1282 |
|                         | 7,16 | 0,1176 |
|                         | 6,91 | 0,1168 |
|                         | 5,78 | 0,1066 |
|                         | 6,29 | 0,1010 |
|                         | 5,37 | 0,1221 |
|                         | 6,28 | 0,0753 |
|                         | 6,93 | 0,1115 |
|                         | 4,63 | 0,1237 |
|                         | 5,38 | 0,1082 |
|                         | 4,76 | 0,0783 |
|                         | 5,41 | 0,0425 |
|                         | 6,40 | 0,1130 |
|                         | 6,35 | 0,0842 |
|                         | 7,22 | 0,0890 |
|                         | 6,02 | 0,1225 |
|                         | 5,78 | 0,1259 |
|                         | 6,38 | 0,0715 |
| Salida del Clarificador | 7,58 | 0,0960 |
|                         | 7,28 | 0,0982 |
|                         | 8,06 | 0,0992 |
|                         | 7,51 | 0,1165 |
|                         | 7,47 | 0,1222 |
|                         | 7,36 | 0,0860 |
|                         | 7,95 | 0,0782 |
|                         | 7,44 | 0,0919 |
|                         | 7,58 | 0,0963 |
|                         | 7,53 | 0,0341 |
|                         | 7,70 | 0,0972 |
|                         | 7,48 | 0,0605 |
|                         | 7,49 | 0,0936 |
|                         | 7,44 | 0,1219 |
|                         | 7,45 | 0,0456 |
|                         | 7,21 | 0,0825 |
|                         | 7,75 | 0,0712 |
|                         | 7,94 | 0,0735 |
|                         | 7,67 | 0,0923 |
|                         | 7,59 | 0,0911 |
| Salida Total            | 7,16 | 0,0650 |

**9.1.2.9 Caracterización de nitratos:**

Los nitratos se obtienen mediante el proceso biológico de la nitrificación a partir del nitrógeno amoniacal por medio de las bacterias nitrificantes (nitrosomas y nitrobacter) en los siguientes pasos:



Los nitratos, es una de las formas de nitrógeno que mayormente participa en la eutrofización y está asociado a una enfermedad infantil denominada la metanoglobinemia por la ingestión de aguas con un contenido mayor de 10 mg/L de nitratos (como N) y como resultado de la conversión de nitrato en nitrito dentro del organismo, sin embargo, en períodos de débil oxigenación, los nitratos pueden jugar un papel de donante de oxígeno y evitar condiciones anóxicas. (Hernandez, 1998)

Comparando la concentración de nitratos de los efluentes de la entrada del clarificador con los de la salida del clarificador, se puede observar en la tabla 40 que hay una disminución de su concentración en aproximadamente la cuarta parte a través del tratamiento primario.

**Tabla 40. Valores de nitratos para los efluentes entrada al clarificador, salida del clarificador y salida total de la PTAR**

| Fecha           | Promedio nitratos ppm   |                         |              |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|--------------|
|                 | Entrada al Clarificador | Salida del Clarificador | Salida Total |
| Mayo 18/04      | 0,1867                  | 0,1440                  | 0,1632       |
| Mayo 19/04      | 0,1870                  | 0,1432                  | 0,1638       |
| Mayo 20/04      | 0,1856                  | 0,1427                  | 0,1620       |
| Junio 8/04      | 0,1899                  | 0,1492                  | 0,1602       |
| Junio 11/04     | 0,1930                  | 0,1563                  | 0,1721       |
| Julio 8/04      | 0,1997                  | 0,1597                  | 0,1745       |
| Julio 9/04      | 0,1949                  | 0,1540                  | 0,1724       |
| Julio 22/04     | 0,2002                  | 0,1601                  | 0,1801       |
| Julio 23/04     | 0,2640                  | 0,2510                  | 0,2490       |
| Noviembre 10/04 | 0,4523                  | 0,3027                  | 0,4390       |
| Noviembre 11/04 | 0,5067                  | 0,3576                  | 0,4832       |
| Noviembre 17/04 | 0,5842                  | 0,3959                  | 0,5675       |
| Noviembre 18/04 | 0,6105                  | 0,2519                  | 0,6013       |
| Diciembre 1/04  | 0,6130                  | 0,2578                  | 0,6145       |
| Diciembre 2/04  | 0,6295                  | 0,2404                  | 0,6074       |

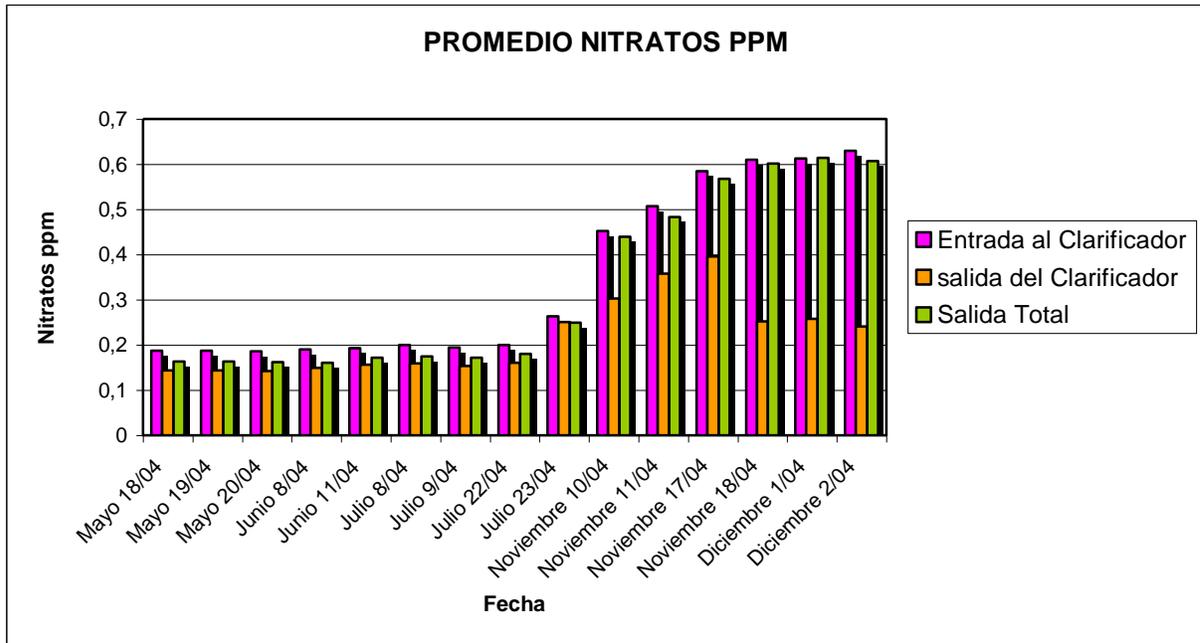
A diferencia del tratamiento primario, a través del tratamiento biológico, se observa un ligero aumento de la concentración de nitratos en el efluente de la salida total. Esto se podría explicar al hacer una comparación entre la concentración de nitritos y la concentración de nitratos (Tabla 41), donde se puede observar una relación directa entre estos dos parámetros, es decir al aumentar la concentración de nitritos aumenta la concentración de nitratos y viceversa, ya que en la reacción de nitrificación, en el último paso, hay una transformación del ion nitrito en el ion nitrato.

**Tabla 41. Valores de nitritos y nitratos**

| Promedio nitritos y nitratos ppm |        |        |
|----------------------------------|--------|--------|
| Entrada al Clarificador          | 0,0933 | 0,1867 |
|                                  | 0,0927 | 0,1870 |
|                                  | 0,0986 | 0,1856 |
|                                  | 0,0962 | 0,1899 |
|                                  | 0,0756 | 0,1930 |
|                                  | 0,0967 | 0,1997 |
|                                  | 0,0805 | 0,1949 |
|                                  | 0,0760 | 0,2002 |
|                                  | 0,0599 | 0,2640 |
|                                  | 0,1058 | 0,4523 |
|                                  | 0,0722 | 0,5067 |
|                                  | 0,0791 | 0,5842 |
|                                  | 0,1128 | 0,6105 |
|                                  | 0,1181 | 0,6130 |
| 0,0650                           | 0,6295 |        |
| Salida del Clarificador          | 0,1022 | 0,1440 |
|                                  | 0,1110 | 0,1432 |
|                                  | 0,1131 | 0,1427 |
|                                  | 0,1282 | 0,1492 |
|                                  | 0,1176 | 0,1563 |
|                                  | 0,1168 | 0,1597 |
|                                  | 0,1066 | 0,1540 |
|                                  | 0,1010 | 0,1601 |
|                                  | 0,1221 | 0,2510 |
|                                  | 0,1130 | 0,3027 |
|                                  | 0,0842 | 0,3576 |
|                                  | 0,0890 | 0,3959 |
|                                  | 0,1225 | 0,2519 |
|                                  | 0,1259 | 0,2578 |
| 0,0715                           | 0,2404 |        |
| Salida Total                     | 0,0960 | 0,1632 |
|                                  | 0,0982 | 0,1638 |
|                                  | 0,0992 | 0,1620 |
|                                  | 0,1165 | 0,1602 |
|                                  | 0,1222 | 0,1721 |
|                                  | 0,0860 | 0,1745 |
|                                  | 0,0782 | 0,1724 |
|                                  | 0,0919 | 0,1801 |
|                                  | 0,0963 | 0,2490 |
|                                  | 0,0825 | 0,4390 |
|                                  | 0,0712 | 0,4832 |
|                                  | 0,0735 | 0,5675 |
|                                  | 0,0923 | 0,6013 |
|                                  | 0,0911 | 0,6145 |
| 0,0650                           | 0,6074 |        |

Al observar los resultados de las concentraciones de nitratos en el efluente de la salida total (tabla 40 y gráfica 19), este parámetro no supera el valor admisible establecido por el decreto 1594/84, artículo 38 y 39, el cual corresponde a un valor de 10 mg/L, teniendo en cuenta que es una comparación con agua para consumo humano o doméstico, la cual requiere para su potabilización solamente tratamiento convencional o desinfección y no para aguas de vertido.

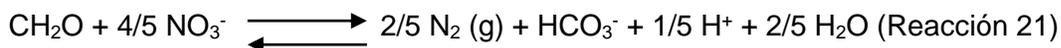
**Gráfica 19. Promedio nitratos para los efluentes entrada al clarificador, salida del clarificador y salida total de la PTAR**



A pesar de que la concentración de nitratos en el efluente de la salida del clarificador es baja, podría estar contribuyendo a través de una reacción de desnitrificación, en la flotación de lodos y presencia de espuma que se observa en la laguna de oxidación (Ver anexo 4 foto 2), formando entre la terminación de los aireadores y la salida del efluente hacia la laguna de estabilización una zona muerta que en temporada de lluvia promueve el arrastre de estos lodos y por ende presencia de una mayor cantidad de sólidos en el efluente de la salida total.

La formación de la zona muerta, se da además de utilizarse los nitratos como aceptores finales de electrones por los microorganismos, a la baja concentración de oxígeno disuelto presente en la laguna de oxidación, unido a concentraciones de nitritos y nitrógeno amoniacal relativamente altas, los cuales condicionan el crecimiento y la actuación de los nitrificantes, presencia de sulfuros y aporte de materia orgánica descomponible.

La desnitrificación consiste en la transformación en condiciones anaerobias del nitrógeno en forma nítrica en especies reducidas y escapar en forma gaseosa a la atmósfera.



La desnitrificación puede ser:

- Bacteriana a partir de microorganismos desnitrificantes

- Química a partir del  $\text{NO}_2^-$ , por inhibición del segundo paso de la nitrificación (Min. de obras públicas y transporte, 1991)

El Análisis de Varianza (ANOVA anexo1), indica que hay diferencia significativa entre los valores de nitratos de los tres sitios de muestreo y en el tiempo.

Mediante el análisis de comparación múltiple de Duncan (tabla 42), se observa que a lo largo de los siete meses de muestreo, a través del tratamiento primario hay una remoción significativa de nitratos a diferencia del tratamiento secundario donde hay un aumento significativo, debido a las razones mencionadas anteriormente para el análisis mes a mes.

**Tabla 42. Prueba de Duncan para el parámetro de nitratos en los tres sitios de muestreo**

| NITRATOS                |    |                      |        |
|-------------------------|----|----------------------|--------|
| Duncan <sup>a</sup>     |    |                      |        |
| SITIO                   | N  | Significancia = 0.05 |        |
|                         |    | 1                    | 2      |
| SALIDA DEL CLARIFICADOR | 15 | 0.2178               |        |
| SALIDA TOTAL            | 15 | 0.3273               | 0.3273 |
| ENTRADA AL CLARIFICADOR | 15 |                      | 0.3465 |
| Sig.                    |    | 0.077                | 0.753  |

El parámetro de nitratos, mediante el análisis de correlación de Pearson (anexo 2) y el análisis de correlación Spearman (anexo 3), tiene una correlación negativa con el parámetro de pH, es decir que al disminuir el pH el contenido de nitratos aumenta, sin embargo esta correlación no es significativa ( $p= 0,981$ ).

Al realizar la correlación del contenido de nitratos con la materia orgánica y el nitrógeno amoniacal, se encuentra que hay una correlación positiva altamente significativa para la primera correlación ( $p= 0,001$ ) y significativa para la correlación entre nitrógeno amoniacal y nitratos ( $p= 0,042$ ) (ver tabla 43).

**Tabla 43. Análisis de correlación de Pearson para el efluente de salida total**

**Correlaciones**

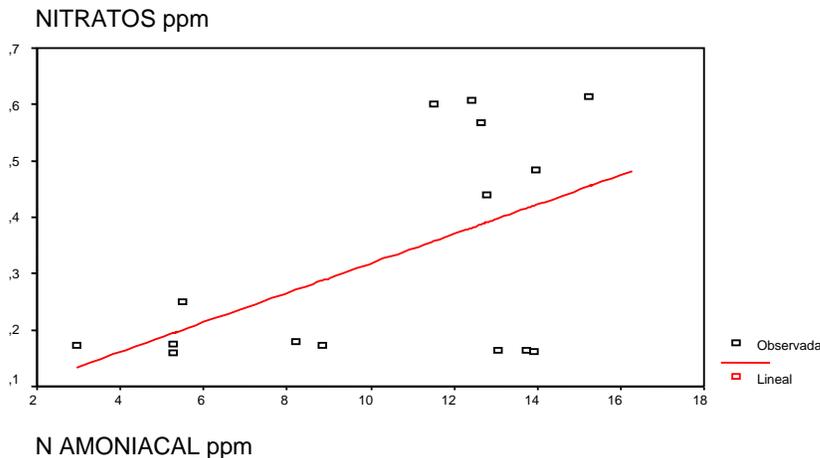
|                  |                        | N AMONICAL | NITRATOS | MATERIA ORGANICA |
|------------------|------------------------|------------|----------|------------------|
| N AMONICAL       | Correlación de Pearson |            |          |                  |
|                  | Sig. (bilateral)       |            |          |                  |
|                  | N                      |            |          |                  |
| NITRATOS         | Correlación de Pearson | 0,530      |          |                  |
|                  | Sig. (bilateral)       | 0,042      |          |                  |
|                  | N                      | 15         |          |                  |
| MATERIA ORGANICA | Correlación de Pearson |            | 0,839*   |                  |
|                  | Sig. (bilateral)       |            | 0,001    |                  |
|                  | N                      |            | 11       |                  |

Como se mencionó anteriormente, existe una correlación significativa entre el contenido de nitratos y el contenido de nitrógeno amoniacal, es decir que al aumentar el contenido de nitrógeno amoniacal aumenta el contenido de nitratos (ver gráfica 20), sin embargo debido a que el coeficiente de correlación es muy bajo ( $R_{sq} = 0,281$ ), su aumento puede deberse a otros factores antes referidos. La ecuación de la correlación es la siguiente:

$$N-NO_3^- = 10,7665N-NH_4^+ + 6,8357$$

De esta manera, se podría proponer el nitrato de amonio como fertilizante en el agua de riego para disminuir el nitrógeno amoniacal en el efluente de la salida total ya que además de que se correlacionan, se facilita su formación y es una molécula estable por poseer un enlace covalente fuerte.

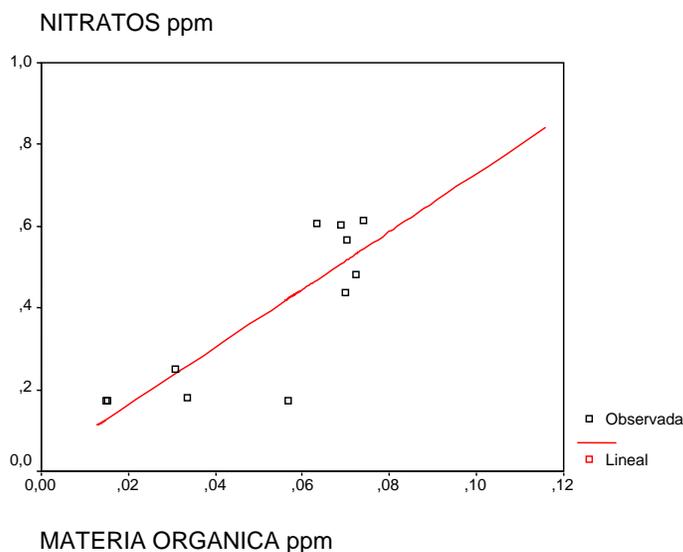
**Gráfica 20. Análisis de correlación entre el nitrógeno amoniacal y nitratos para el efluente de salida total**



También existe una correlación entre el contenido de materia orgánica y el contenido de nitratos, pero a diferencia de la anterior, ésta es altamente significativa. En la gráfica 21, se puede observar la relación directa entre estos dos parámetros con un coeficiente de correlación del 70%, indicando que al aumentar la materia orgánica aumenta el contenido de nitratos, debido a que ésta, se encuentra continuamente en proceso de mineralización. La ecuación de esta correlación es la siguiente:

$$N-NO_3^- = 7,0639MO + 0,0217 \quad R_{sq} = 0,703$$

**Gráfica 21. Análisis de correlación entre materia orgánica y nitratos para el efluente de salida total**



#### 9.1.2.10 Caracterización de sulfatos:

En el efluente de la entrada del clarificador (tabla 44 y gráfica 22), se observa la presencia de sulfatos, esto debido a que en el proceso de fabricación de papel, se utilizan sulfatos de aluminio y ácido sulfúrico como materias primas (tabla 2).

Los sulfatos pueden provenir de la oxidación de los sulfuros existentes en el agua y pueden impartirle un carácter ácido a ésta.

En el ciclo biológico del azufre los sulfatos también pueden existir en el estado de oxidación de la materia orgánica, pero ellos a su vez servirían de fuente de energía a cierto tipo de bacterias que usan el elemento en su metabolismo.

Un alto contenido de sulfatos puede proporcionar sabor al agua y podría tener un efecto laxante, sobre todo cuando se encuentra presente el magnesio. Este efecto es más significativo

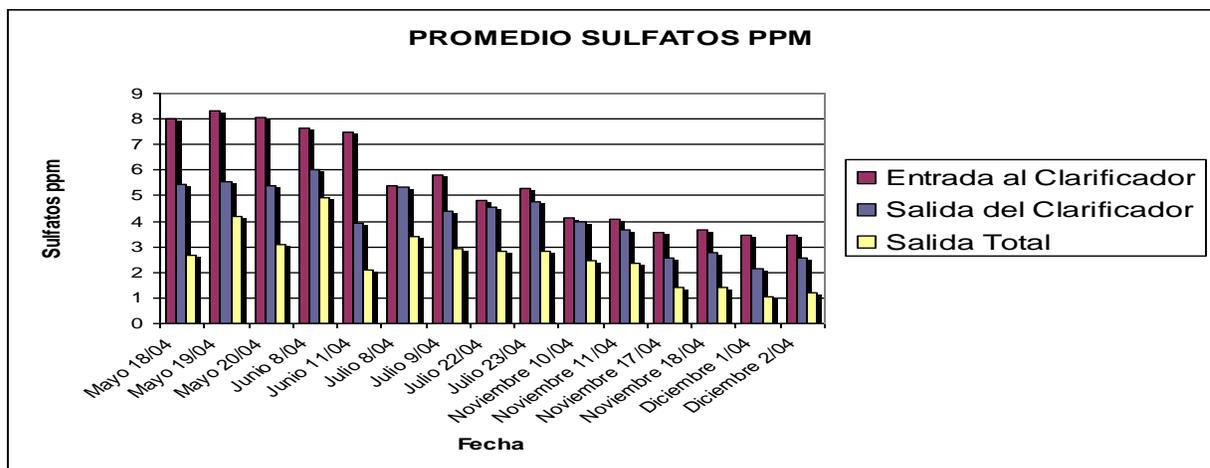
en niños y consumidores no habituados al agua de estas condiciones. (Min. de obras públicas y transporte, 1991)

En la tabla 44, se observa que tanto en el tratamiento primario como secundario se presenta una remoción significativa de la concentración de sulfatos. Al comparar los valores de sulfatos del efluente de salida total, éstos no superan el valor admisible para aguas de consumo humano o doméstico que establece el valor de 400 mg/L, el cual requiere para su potabilización solamente tratamiento convencional o desinfección y no para aguas de vertido, según el decreto 1594/84, artículos 38 y 39.

**Tabla 44. Valores de sulfatos para los efluentes entrada al clarificador, salida del clarificador y salida total de la PTAR**

| Fecha           | Promedio sulfatos ppm   |                         |              |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|--------------|
|                 | Entrada al Clarificador | Salida del Clarificador | Salida Total |
| Mayo 18/04      | 8,025                   | 5,416                   | 2,674        |
| Mayo 19/04      | 8,338                   | 5,572                   | 4,190        |
| Mayo 20/04      | 8,074                   | 5,381                   | 3,112        |
| Junio 8/04      | 7,625                   | 6,016                   | 4,929        |
| Junio 11/04     | 7,458                   | 3,914                   | 2,068        |
| Julio 8/04      | 5,410                   | 5,335                   | 3,407        |
| Julio 9/04      | 5,784                   | 4,396                   | 2,912        |
| Julio 22/04     | 4,790                   | 4,572                   | 2,830        |
| Julio 23/04     | 5,288                   | 4,781                   | 2,842        |
| Noviembre 10/04 | 4,127                   | 3,968                   | 2,456        |
| Noviembre 11/04 | 4,094                   | 3,665                   | 2,332        |
| Noviembre 17/04 | 3,567                   | 2,547                   | 1,425        |
| Noviembre 18/04 | 3,678                   | 2,782                   | 1,412        |
| Diciembre 1/04  | 3,432                   | 2,131                   | 1,022        |
| Diciembre 2/04  | 3,456                   | 2,543                   | 1,221        |

**Gráfica 22. Promedio sulfatos para los efluentes entrada al clarificador, salida del clarificador y salida total de la PTAR**



Por medio del Análisis de Varianza (ANOVA anexo 1), se encontró que el contenido de sulfatos presenta diferencias significativas entre los tres puntos de muestreo en función del tiempo y esto se corrobora con la prueba de comparación múltiple de Duncan (tabla 45), donde se observa que hay una alta remoción tanto para el tratamiento primario como para el secundario, ya que el contenido de sulfatos de la salida total es significativamente inferior al de la salida del clarificador y este a su vez significativamente inferior al de la entrada al clarificador.

**Tabla 45. Prueba de Duncan para el parámetro de sulfatos en los tres sitios de muestreo**

| SULFATOS                |    |                      |        |        |
|-------------------------|----|----------------------|--------|--------|
| Duncan <sup>a</sup>     |    |                      |        |        |
| SITIO                   | N  | Significancia = 0.05 |        |        |
|                         |    | 1                    | 2      | 3      |
| SALIDA TOTAL            | 15 | 2.5888               |        |        |
| SALIDA DEL CLARIFICADOR | 15 |                      | 4.2013 |        |
| ENTRADA AL CLARIFICADOR | 15 |                      |        | 5.5431 |
| Sig.                    |    | 1.000                | 1.000  | 1.000  |

#### **9.1.2.10.1 Correlación de sulfatos con materia orgánica, nitrógeno amoniacal y pH:**

La correlación de Pearson (anexo 2) y el análisis de correlación de Spearman (anexo 3), muestran que tiende a existir una correlación negativa entre el contenido de sulfatos y el pH, indicando que al disminuir el pH aumenta el contenido de sulfatos, pero no es significativo estadísticamente ( $p= 0,705$ ).

La misma tendencia se observa con respecto a la materia orgánica y el nitrógeno amoniacal, pero de igual forma no son significativas las correlaciones (0,102 y 0,124 respectivamente).

#### **9.2 Análisis de la calidad del efluente de la salida total de la planta de tratamiento de aguas residuales, PTAR como posible agua de riego**

La clasificación del agua para el riego de cultivos se fundamenta en dos criterios desarrollados por el Laboratorio de Salinidad de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, USDA. De acuerdo con estos criterios, la calidad del agua para el riego de cultivos puede expresarse en función de dos variables:

Una variable que pondera la salinidad del agua mediante la medición de su conductividad eléctrica, debido a que dicha propiedad afecta adversamente y en diferentes grados, a los diversos tipos de cultivos. La segunda variable que se tiene en cuenta, es una relación que se conoce genéricamente como el RAS, (Relación de Adsorción de Sodio) y que mide básicamente la proporción de sodio a calcio y magnesio que contiene la muestra.

### 9.2.1 Criterio de salinidad

La conductividad o conductancia específica, es una medida de la habilidad del agua para conducir una corriente eléctrica. Esta es sensible a la variación de sólidos disueltos especialmente las sales minerales disueltas. El grado de disociación del agua en iones está relacionado con la cantidad de carga eléctrica de cada ión, la movilidad iónica y la temperatura, los cuales influyen la conductividad. La conductividad se expresa en microsiemens por centímetro ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) y para un cuerpo de agua dado, está relacionada con la concentración total de sólidos disueltos e iones mayores.

Los intervalos de conductividad de las aguas superficiales varían de 10 a 1000  $\mu\text{S cm}^{-1}$  pero pueden exceder 1000  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , especialmente en aguas contaminadas que reciben una gran cantidad de escorrentía, además puede ser un indicador aproximado de contenido de minerales cuando otros métodos no pueden ser usados. La conductividad puede ser medida para establecer una zona de contaminación alrededor de la descarga de un efluente, y observar la extensión de la influencia de las aguas de escorrentía.

En relación con la salinidad del agua, esta puede clasificarse en los siguientes seis grupos:

**GRUPO C1:** Aguas con conductividad eléctrica entre 100 y 250  $\mu\text{S/cm}$ . Este tipo de aguas se consideran como de “Baja Salinidad” y son por lo tanto, útiles para el riego de cualquier cultivo, en cualquier tipo de suelo, con baja o nula probabilidad de generar salinidad en los suelos. Pueden existir problemas sólo en suelos de muy baja permeabilidad.

**GRUPO C2:** Aguas con conductividad eléctrica entre 250 y 750  $\mu\text{S/cm}$ . Este tipo de aguas se consideran como de “Salinidad Media”; pueden usarse para el riego de cultivos, a condición de que exista cuando menos, un lavado moderado de los suelos. La mayoría de cultivos, resisten esta agua, sin prácticas especiales de control.

**GRUPO C3:** Aguas con conductividad eléctrica entre 750 y 2250  $\mu\text{S/cm}$ . Este tipo de aguas se consideran como de “Altamente Salinas” y solamente deben usarse en suelos con buen drenaje y/o en cultivos altamente resistentes a las sales.

**GRUPO C4:** Aguas con conductividad eléctrica mayor a 2250  $\mu\text{S/cm}$ . Este tipo de aguas se consideran como de “Salinidad Extrema” y en general, no son recomendables para el riego de ningún tipo de cultivos, en ningún tipo de suelos, con excepción de las zonas costeras.

**GRUPO C5:** Agua de salinidad excesiva, que sólo debe emplearse en casos muy contados, extremando todas las precauciones apuntadas anteriormente.

**GRUPO C6:** Agua de salinidad excesiva, no aconsejable para riego.

El muestreo del efluente de salida total de la planta de tratamiento de aguas residuales, PTAR, para los meses de Mayo a Diciembre para el parámetro de conductividad eléctrica, arrojó valores entre 800 y 1700  $\mu\text{S/cm}$ , valores de conductividades esperados para aguas residuales tratadas en plantas integradas de pulpa/papel, donde la salinidad se debe principalmente a

caciones cuya concentración esta expresada en mg/L (Kemer Frank, 1989). De esta manera el efluente de la salida total se clasificó dentro del grupo C3 (tabla 46), lo que indicaría que es posible utilizarlo para riego en suelos ácidos desde muy fuerte hasta ligeramente ácidos con buen drenaje.

**Tabla 46. Valores de conductividad eléctrica para el efluente salida total de la PTAR**

| Fecha           | Conductividad eléctrica $\mu\text{S/cm}$ |
|-----------------|--|
| Mayo 18/04      | 1517                                     |
| Mayo 19/04      | 895                                      |
| Mayo 20/04      | 1334                                     |
| Junio 8/04      | 1341                                     |
| Junio 11/04     | 1249                                     |
| Julio 8/04      | 1292                                     |
| Julio 9/04      | 1420                                     |
| Julio 22/04     | 1126                                     |
| Julio 23/04     | 1258                                     |
| Noviembre 10/04 | 1304                                     |
| Noviembre 11/04 | 1269                                     |
| Noviembre 17/04 | 1450                                     |
| Noviembre 18/04 | 1669                                     |
| Diciembre 1/04  | 922                                      |
| Diciembre 2/04  | 1528                                     |

### 9.2.2 Criterio de la relación de adsorción de sodio, RAS

El sodio se mide generalmente teniendo en cuenta el tipo de uso de la misma. Para su uso agrícola y especialmente en irrigación, un elevado contenido de sodio puede degradar la estructura del suelo y afectar el crecimiento de las plantas. La relación de adsorción de sodio (RAS) se usa con el objeto de evaluar la conveniencia del agua para propósitos de irrigación. La relación estima el grado al cual el sodio será adsorbido por el suelo. Valores altos de RAS implican que el sodio en el agua de irrigación puede reemplazar el calcio y el magnesio en el suelo, con lo cual se produce un daño en la estructura del suelo. El RAS para las aguas de irrigación se define como sigue:

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

La importancia de medir el RAS radica en que el ion sodio tiene por característica, una fuerte tendencia a desestabilizar las arcillas, taponando con ello los poros del suelo, y coadyuvando a los fenómenos de anorexia en las plantas. Adicionalmente, el sodio y el cloruro acumulado en el perfil del suelo, ocasiona problemas de tipo osmótico en los tejidos vegetales.

En relación con el valor RAS, las aguas también se clasifican en cuatro grupos:

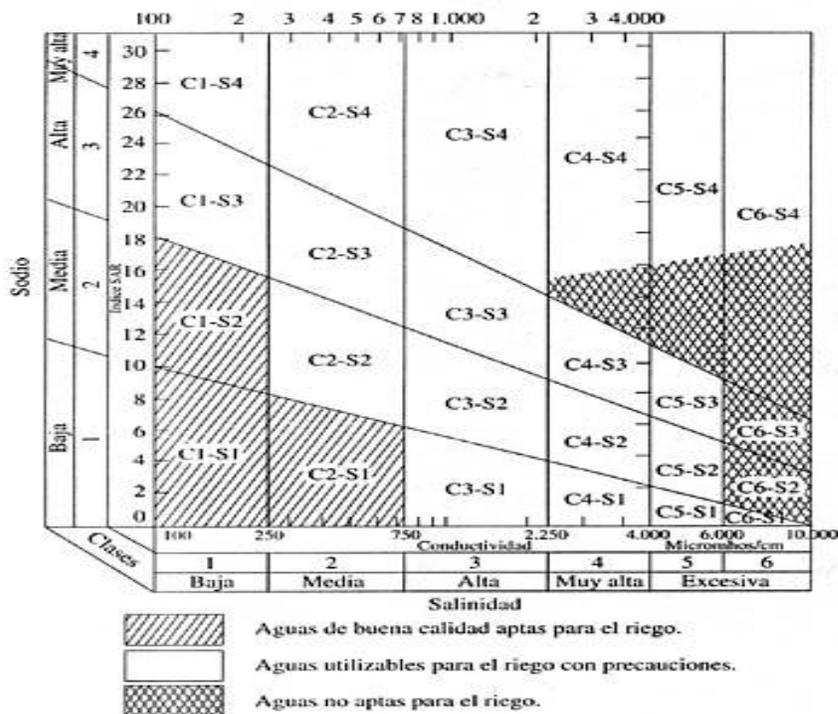
**GRUPO S1:** Valor RAS entre 0 y 10. Son aguas de bajo contenido en sodio, útiles para el riego de la mayoría de suelos y cultivos. Sin embargo, pueden presentarse problemas con cultivos muy sensibles al sodio.

**GRUPO S2:** Valor RAS entre 10 y 18. Son aguas de mediano contenido en sodio, útiles para el riego de suelos de textura gruesa o de suelos orgánicos con buena permeabilidad. Deben vigilarse las condiciones físicas del suelo y especialmente el nivel de sodio cambiante, corrigiendo en caso necesario.

**GRUPO S3:** Valor RAS entre 18 y 26. Son aguas de alto contenido en sodio y gran peligro de acumulación de sodio en el suelo. Son aconsejables aportaciones de materia orgánica y empleo de yeso para corregir el posible exceso de sodio en el suelo. También se requiere un buen drenaje y el empleo de volúmenes copiosos de riego. No son útiles para el riego de cultivos altamente sensibles al sodio, como lo son la mayoría de frutales.

**GRUPO S4:** Valor RAS mayor de 26. Son aguas de muy alto contenido en sodio, prácticamente inadecuadas para el riego de la mayoría de suelos y cultivos, excepto en caso de baja salinidad y tomando todas las precauciones apuntadas. (OMS, 1989)

A partir de los datos de conductividad eléctrica, CE y la relación de adsorción de sodio, SAR se establece la clasificación preliminar del agua del efluente de la salida total de la PTAR según las normas Riverside (gráfica 23), en el grupo C3S1, que corresponde a aguas utilizables para riego con precauciones.



**Gráfica 23-**Normas de Riverside para evaluar la calidad de las aguas de riego.(U.S. Soil Salinity Laboratory). Fuente: Blasco y de la Rubia (Lab. de suelos IRYDA,1973)

En la tabla 47, para el efluente de la salida total de la PTAR, se observan valores de RAS muy bajos, que clasifican a este efluente en el grupo S1, indicando que la salinidad no proviene principalmente del sodio sino de otros cationes, lo que favorece su aplicación en suelos no magnésicos o en suelos ácidos. Además el valor de pH de aproximadamente 7,5 de estas aguas en el efluente de la salida total, no es probable que tengan aluminio en forma soluble y por esto se podrían utilizar para riego en suelos ácidos, pero no podrían utilizarse para riego de cultivos intensivos.

**Tabla 47. Valores de RAS para el efluente salida total de la PTAR**

| Fecha           | Concentraciones en meq/L |                          |                          | RAS     |
|-----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------|
|                 | (Na <sup>+</sup> )       | (Ca <sup>+2</sup> )      | (Mg <sup>+2</sup> )      |         |
| Mayo 18/04      | 5,216 X 10 <sup>-4</sup> | 7,432 X 10 <sup>-2</sup> | 9,324 X 10 <sup>-3</sup> | 0,0026  |
| Mayo 19/04      | 6,541 X 10 <sup>-3</sup> | 0,3214                   | 4,458 X 10 <sup>-2</sup> | 0,0152  |
| Mayo 20/04      | 7,327 X 10 <sup>-4</sup> | 3,215 X 10 <sup>-2</sup> | 5,976 X 10 <sup>-3</sup> | 0,0053  |
| Junio 8/04      | 3,569 X 10 <sup>-5</sup> | 1,456 X 10 <sup>-3</sup> | 3,561 X 10 <sup>-4</sup> | 0,0012  |
| Junio 11/04     | 2,112 X 10 <sup>-3</sup> | 0,1238                   | 2,412 x 10 <sup>-2</sup> | 0,0078  |
| Julio 8/04      | 8,679 X 10 <sup>-5</sup> | 4,567 X 10 <sup>-3</sup> | 6,236 x 10 <sup>-4</sup> | 0,0017  |
| Julio 9/04      | 5,569 X 10 <sup>-4</sup> | 2,421 X 10 <sup>-2</sup> | 5,779 x 10 <sup>-3</sup> | 0,0046  |
| Julio 22/04     | 2,543 X 10 <sup>-5</sup> | 1,274 X 10 <sup>-3</sup> | 3,881 x 10 <sup>-4</sup> | 0,0001  |
| Julio 23/04     | 1,030 X 10 <sup>-5</sup> | 1,123 X 10 <sup>-2</sup> | 5,350 X 10 <sup>-3</sup> | 0,00001 |
| Noviembre 10/04 | 1,329 x 10 <sup>-2</sup> | 8,219 x 10 <sup>-2</sup> | 6,438 X 10 <sup>-3</sup> | 0,0631  |
| Noviembre 11/04 | 5,668 x 10 <sup>-2</sup> | 9,458 x 10 <sup>-2</sup> | 8,432 X 10 <sup>-3</sup> | 0,250   |
| Noviembre 17/04 | 3,432 x 10 <sup>-2</sup> | 0,1067                   | 6,779 X 10 <sup>-2</sup> | 0,116   |
| Noviembre 18/04 | 0,1339                   | 0,2346                   | 9,461 x 10 <sup>-2</sup> | 0,330   |
| Diciembre 1/04  | 9,214 x 10 <sup>-2</sup> | 0,1152                   | 8,901x 10 <sup>-2</sup>  | 0,288   |
| Diciembre 2/04  | 8,987 x 10 <sup>-2</sup> | 0,1096                   | 9,239 x 10 <sup>-2</sup> | 0,283   |

## 9.2.3 Contenido de elementos tóxicos para las plantas

### 9.2.3.1 Contenido de cloruros

Concentraciones elevadas de cloruro en el agua de riego pueden producir problemas de toxicidad en los cultivos. Los frutales suelen ser bastante sensibles y su sensibilidad depende en gran parte del portainjerto empleado. Así, por ejemplo, las variedades de cítricos injertadas sobre patrón de mandarina Cleopatra resisten un 50% más cloruro que los injertados sobre naranjo amargo y más del doble que los injertados sobre citrange Troyer. (OMS, 1989)

Como se observó anteriormente, la concentración de cloruros para el efluente de la salida total de la PTAR, se encuentra en promedio en 208,7 mg/L que al compararlos con los niveles críticos de calidad de aguas para riego (Ramos C, 1996) (anexo 6), el riesgo de toxicidad para las plantas es bajo (70 – 345 mg/L).

### 9.2.3.2 Contenido de elementos traza

El contenido de elementos traza en las aguas residuales suele ser más elevado que en las aguas normales. Concentraciones excesivas de algunos elementos como el boro, cobre, hierro

y cinc, pueden presentar problemas de toxicidad para las plantas. Por ejemplo, concentraciones de boro superiores a 1 mg/l pueden ser perjudiciales para el riego de cítricos, melocotonero, ciruelo, vid, cebolla y fresa (Pescod, 1992).

Otros elementos traza como el cadmio, cobre, molibdeno, níquel y cinc pueden ser tóxicos para las personas y animales (Page *et al.*, 1981).

En general, los aportes de metales con el agua de riego no suelen ser preocupantes, excepto en los casos en que estas aguas recojan los efluentes de industrias con altos contenidos de estos metales.

Para el caso del efluente de salida total de la PTAR, la concentración de elementos traza no presentarían riesgo de toxicidad a las plantas por aluminio, plomo, zinc, cromo y cadmio al comparar los datos recopilados por Propal planta II del primer semestre de 2004 (anexo 7) con los niveles críticos de estos elementos para aguas de riego (Ramos C, 1996) (anexo 6). Sin embargo si podría presentar riesgo de toxicidad por arsénico y mercurio, por lo que se recomienda realizar un muestreo de estos dos elementos para determinar su comportamiento y procedencia ya que estos dos metales son altamente tóxicos y de presentar concentraciones por encima de las establecidas podrían acumularse en el suelo y por ende en las plantas.

Por ejemplo el arsénico en los suelos puede ser disuelto y adsorbido/absorbido por las arcillas o la materia orgánica y el mercurio una vez depositado el  $Hg^{2+}$  puede formar complejos con la materia orgánica de los suelos (ácido fúlvico y/o húmico).

**Tabla 48. Niveles críticos de elementos traza para aguas de riego**

| Parámetro | Grado de restricción de alto mg/L |
|-----------|-----------------------------------|
| Aluminio  | 5                                 |
| Plomo     | 0.1                               |
| Zinc      | 2                                 |
| Cromo     | 0.1                               |
| Cadmio    | 0.01                              |
| Arsénico  | 0.1                               |

### 9.2.3.3 Contenido de compuestos orgánicos

Los compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales suelen degradarse en el suelo. Además de los compuestos orgánicos fácilmente biodegradables, también existen muchos productos orgánicos de origen sintético, de los cuales unos se descomponen en el suelo bajo condiciones aeróbicas, otros en condiciones anaeróbicas y otros no se descomponen. La conclusión es que, sólo cuando las aguas residuales contienen compuestos orgánicos de origen industrial de difícil degradación como, por ejemplo, los hidrocarburos halogenados, se pueden presentar problemas de contaminación de las aguas subterráneas al regar con estas aguas,

sobre todo si los suelos son arenosos, ya que el poder de retención de los compuestos orgánicos por estos suelos es bajo (Bouwer y Idelovitch, 1987).

En relación a algunos compuestos orgánicos de muy lenta degradación, como los hidrocarburos policíclicos aromáticos (benzopireno, fluoreno y antraceno), no hay mucha información sobre su transporte hacia los acuíferos y sus efectos sobre el suelo y las plantas, pero parece razonable exigir para el riego sin restricción un contenido máximo en estos compuestos similar al requerido para el agua potable en España este valor es 0,2 mg/m<sup>3</sup> (Bouwer y Idelovitch, 1987).

De acuerdo (Bravo Isabel, 2002), estos compuestos orgánicos pueden formar en el suelo compuestos organominerales con su fracción inorgánica, dando estabilidad por su influencia en la formación de la bioestructura.

Para el caso del efluente de la salida total de la PTAR, se encontró una relación DBO<sub>5</sub>/DQO entre 0,1 - 0,2, debido a que estos parámetros disminuían por su remoción a través del tratamiento primario y secundario, que podría calificar a este efluente como biodegradable. También aportaría una alta cantidad de materia orgánica, ya que los valores de DBO<sub>5</sub> para este efluente son altos, en promedio 63,60 mg/L.

#### **9.2.3.4 Contenido de nitrógeno amoniacal, nitratos y sulfatos**

Los valores de nitrógeno amoniacal para el efluente de la salida total de la PTAR, presentan baja toxicidad a las plantas (10 – 40 mg/L) (anexo 6), ya que se encuentran en promedio una concentración de 10,63 mg/L.

Igualmente los nitratos no presentan ningún riesgo de toxicidad a las plantas (<50 mg/L), ya que se encuentran en promedio en 0,3273 mg/L.

En el caso de los sulfatos, para las plantas y los vegetales, estos aniones parecen ser menos tóxicos que los cloruros, de ahí que para fines agrícolas Scotfiel da los ejemplos de los límites permisibles de sulfatos para aguas de irrigación:

Excelente – menos de 192 mg/L

Buena – 192 – 336 mg/L

Aceptable – 336 - 576 mg/L

Dudosa – 576 – 960 mg/L

Inapropiada – más de 960 mg/L

Para el efluente de la salida total, los valores de concentraciones de sulfatos se encuentran en promedio de 2,589 mg/L, con la cual se podría catalogar a este efluente como agua de riego de calidad excelente.

## **9. 3 PROPUESTA PRELIMINAR PARA VIABILIZAR EL SISTEMA INTEGRADO DE LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS PROCEDENTES DE PROPAL PLANTA 2**

Como un paso preliminar para aplicar posibles soluciones a algunos problemas que se están presentando en la planta de tratamiento de aguas residuales, PTAR, uso de aguas residuales y verificación de su eficiencia, se presenta la siguiente propuesta teniendo en cuenta los datos recopilados durante siete meses tanto de calidad fisicoquímica como de agua de riego para tres efluentes (entrada al clarificador, salida del clarificador y salida total).

### **9.3.1 Desarrollo de la propuesta de integración**

#### *9.3.1.1 Determinación de las fortalezas y limitaciones del sistema existente*

##### **1. Fortalezas:**

- Mejoras en el mantenimiento de la planta. Se le da mantenimiento a las áreas verdes, aireadores y Parshall.
- Mejoras en el control de los parámetros. Se le da mantenimiento a los tomamuestras y se realizan intercalibraciones mensuales.
- Mejoras en la calidad del efluente de la salida total de la PTAR, por los altos tiempos de retención del efluente a través del tratamiento secundario y aplicación de microorganismos a través de cultivo en bioreactores.

##### **2. Debilidades:**

- No existe monitoreo permanente de algunos parámetros fisicoquímicos a excepción de temperatura, pH, sólidos, DBO<sub>5</sub> y DQO.
- No existen análisis biológicos que complementen el análisis físico y químico para hacer una recomendación adecuada para riego de cultivos.

#### *9.3.1.2 Estructura del Sistema integrado: propuesta*

Esta propuesta considera los criterios para maximizar las ventajas y dar posibles soluciones a los principales impactos negativos del manejo de las aguas residuales de la zona de estudio, incluyendo las mejoras que deben llevarse a cabo en el tratamiento del efluente final, antes de su descarga al Río Palo, así como el uso eficiente y sanitario de sus efluentes.

##### *9.3.1.2.1 Mejoras que deben llevarse a cabo en el tratamiento del efluente final*

En el análisis preliminar de la calidad fisicoquímica de los tres efluentes en estudio, se identificaron algunos problemas en la planta de tratamiento de aguas residuales PTAR, a los cuales se les podrían dar las siguientes soluciones:

- Uno de los problemas identificados fue la variación drástica de pH a través del tratamiento primario que podría estar afectando la eficiencia del tratamiento secundario de la PTAR, en

cuanto a procesos químicos y biológicos que se estén llevando a cabo. Se recomienda neutralizar las aguas residuales antes de pasar al tratamiento secundario con lodos de cal.

**Mezcla del efluente pre-neutralizado con lodos de cal.** Se suele llamar cal pura al óxido de calcio (cal viva), que al ser tratada con agua forma el hidróxido de calcio (cal apagada). El grado de neutralización dependerá del tipo de cal utilizada. Si hay una fracción magnésica, la reacción de neutralización es muy rápida y llega a pH bajo 4,2. El diseño depende de la curva de titulación de la cal a utilizar.

La reacción de la cal se acelera como muchas otras por calor y por agitación física. En sistemas altamente reactivos, se requieren unos diez minutos. La cal se utiliza en lodos al 8 a 15 %.

Con la utilización de cal, también se puede remover el fósforo, para prevenir o reducir la eutrofización mediante su precipitación química:



También mediante la aplicación de lodos de cal que lograría la neutralización del pH, se lograría remover el nitrógeno amoniacal ya que se favorecen los procesos biológicos ligados a este nutriente (nitrificación/desnitrificación). Además se lograría una mayor transformación y mineralización de la materia orgánica ( $\text{DBO}_5$ ), con lo cual se reduciría la cantidad de ésta en el efluente de la salida total y se lograría la insolubilización del aluminio para evitar problemas de acidez en aplicación al suelo.

- Por último, se encontraron cantidades altas de sulfuros que están ocasionando en la PTAR problemas de malos olores y una posible solución es aumentar la biodegradación oxidativa, mediante sistemas de aireación más eficientes.

#### 9.3.1.2.2 Implementación del sistema de reuso

Teniendo en cuenta el análisis preliminar de la calidad del efluente de la salida total para agua de riego, ésta tiene las siguientes características:

El efluente de la salida total de la planta de tratamiento de aguas residuales de la PTAR, de PROPAL planta 2, se clasifica como agua altamente salina (C3) con un alto contenido de cloruros, no siendo apta para suelos salinos cuyo drenaje es deficiente, lo cual involucra un adecuado manejo del suelo y la elección de especies o forrajes tolerantes a la salinidad; el agua es baja en sodio teniéndose poca probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable, igualmente por la baja relación de adsorción de sodio, RAS.

El contenido de elementos tóxicos analizados como los sulfatos, nitratos, nitrógeno amoniacal y metales pesados (aluminio, plomo, zinc, cromo y cadmio), no representan riesgo de toxicidad para las plantas debido a sus bajas concentraciones.

Teniendo en cuenta esta clasificación preliminar, un posible cultivo para riego sería la caña de azúcar ya que como se observa en la tabla 2, la mayoría de los suelos cercanos a la planta de

tratamiento de aguas residuales PTAR, de PROPAL planta 2, están siendo utilizados para la siembra de ésta y además están siendo regados con agua del Río Palo, aguas abajo de la descarga del sistema lagunar.

#### *9.3.1.2.2.1 Evaluación agrícola del área con reuso probable*

El aprovechamiento racional y planificado del recurso hídrico es condición esencial para el éxito del sistema integrado de tratamiento y uso de las aguas residuales, por lo que el planeamiento de la producción agraria será consistente con el de tratamiento. Para ello se llevarían a cabo las siguientes actividades:

- ❖ Caudal de agua residual tratada que se dispone para el riego agrícola, caudal efluente, área de riego y su aporte a la demanda actual.
- ❖ Utilización del agua residual tratada en forma directa o combinada con el agua del Río Palo.
- ❖ La calidad del suelo donde se localiza la siembra de caña de azúcar que va a ser regada con aguas residuales.
- ❖ Evaluación de la calidad de las aguas subterráneas del área de riego.

Como información general acerca de las actividades anteriores se tiene lo siguiente:

#### ➤ *Características generales de los suelos de la zona*

De acuerdo a información del Instituto Colombiano Agropecuario, ICA, el tipo de los suelos de la zona es Andisoles; se caracterizan por ser formaciones sedimentarias; el pH es bajo en estos suelos con contenidos de aluminio relativamente altos. También presentan altos contenidos de materia orgánica, pero con cantidades de nitrógeno bajo aprovechables para las plantas, además bajos niveles de fósforo disponible y de potasio. (Ramirez, 1988)

#### ➤ *Diferencias de productividad y costos por el riego con aguas residuales*

Para establecer las diferencias de productividad y costos en el cultivo de la caña de azúcar en el área de estudio, es necesario conocer los factores que más contribuyen en el aumento del rendimiento de la caña, cultivo que requiere altas dosis de fósforo y potasio regularmente.

Se recomienda siempre y cuando se practique un análisis biológico para evitar contaminación por microorganismos patógenos.

### **9.3. 2 Criterios para la mitigación de los impactos existentes y potenciales**

Con respecto a los impactos ambientales significativos identificados, se indican las medidas de mitigación correspondientes:

- Reducción o eliminación de la contaminación de los cuerpos receptores, generada por las descargas directas de aguas residuales tratadas, y el uso parcial o total de sus efluentes en la actividad del cultivo de la caña de azúcar.

- Control de la contaminación de los productos agrícolas regados con aguas residuales, por el adecuado tratamiento previo y selección de cultivos.
- Control riguroso de las operaciones de la planta de tratamiento (caudales), para evitar procesos anaerobios que generen olores desagradables.
- Limpieza de la vegetación que prolifera en los taludes internos de las lagunas de estabilización y renovación del agua para evitar la proliferación de mosquitos.
- Control semestral del estado de salud de los trabajadores de la planta de tratamiento y de los agricultores de la zona de riego con aguas residuales.
- Campañas informativas acerca de los resultados de la gestión del proyecto respecto a la calidad de los efluentes de la planta de tratamiento y de los productos regados con éstos, a fin de mantener un nivel adecuado de información y propiciar buena imagen institucional.
- Monitoreo cerca del área de riego mediante un pozo testigo con el fin de darle seguimiento a la calidad del agua subterránea.

## 10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- En general se puede decir que la eficiencia de la planta de tratamiento de aguas residuales, PTAR de PROPAL, planta 2 es adecuada para los parámetros establecidos para aguas de vertido ya que la mayoría de ellos cumplen con la Norma Colombiana mediante el Decreto 1594/84.
- El fósforo soluble podría presentar problemas de eutrofización a largo plazo con valores cercanos a 2 mg/L (con respecto al rango 2-7 mg/L), referenciado por Araujo, 1993 para aguas residuales domésticas tratadas por medio de lagunas de estabilización.
- También se encontraron cantidades altas de sulfuros (1,7 mg/L) comparadas con el valor admisible para aguas superficiales (0,0002 mg/L) que están ocasionando en la PTAR problemas de malos olores y una posible solución es aumentar la biodegradación oxidativa, mediante sistemas de aireación más eficientes.
- La relación DBO<sub>5</sub>/DQO, indica que el efluente de la salida total de la PTAR es biodegradable y su riesgo de contaminación por acumulación de sustancias contaminantes es bajo.
- Se identificó como uno de los problemas de mayor impacto en la eficiencia de la PTAR, los cambios de pH a través del tratamiento primario debidos posiblemente a los altos tiempos de retención del clarificador que generan la mayoría de las veces valores de pH ácido que podrían estar afectando directamente los procesos químicos y biológicos en el tratamiento secundario dando origen a reacciones de tipo anaeróbico.
- Los valores de pH ácido podrían estar directamente relacionados con las altas concentraciones de sulfuros y materia orgánica (DBO<sub>5</sub>).
- Con respecto a la materia orgánica (DBO<sub>5</sub>), es el único parámetro que no cumple la meta establecida por la Corporación Regional del Cauca, CRC ya que el efluente de la salida total vierte al Río Palo 2237 Kg/día. Razón por la cual se debe prestar especial atención a este parámetro y la urgencia de transformar o utilizar esta gran cantidad de materia orgánica para disminuir su impacto sobre el cuerpo de agua.
- El efluente de la salida total de la planta de tratamiento de aguas residuales de la PTAR, de PROPAL planta 2, se clasifica inicialmente como agua altamente salina (C3) que podría deber su salinidad a la concentración de cationes principalmente calcio y magnesio expresada su concentración en mg/L, no siendo apta para suelos salinos cuyo drenaje es deficiente, lo cual involucra un adecuado manejo del suelo y la elección de especies o forrajes tolerantes a la salinidad; el agua es baja en sodio teniéndose poca probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable, igualmente por la baja relación de absorción de sodio, RAS. El contenido de elementos tóxicos analizados como los sulfatos,

nitratos y nitrógeno amoniacal, no representan riesgo de toxicidad para las plantas debido a sus bajas concentraciones.

- A partir de los datos de conductividad eléctrica, CE y la relación de absorción de sodio, RAS se establece la clasificación preliminar del agua del efluente de la salida total de la PTAR según las normas Riverside corresponde al grupo C3S1, que corresponde a aguas utilizables para riego con precauciones.
- Teniendo en cuenta los datos recopilados, se realiza una propuesta de reuso del agua del efluente de la salida total de la PTAR, para el riego del cultivo de caña y otros cultivos, agregando que para futuras investigaciones se debe contar con una evaluación fisicoquímica del efluente de mínimo un año, adicionando nueva información como los indicadores biológicos de coliformes fecales, coliformes totales, organismos patógenos y contaminantes orgánicos como hidrocarburos halogenados y aromáticos policíclicos.
- Se recomienda un muestreo del parámetro de cloruros en la planta de proceso de Propal II, aunque su concentración no representa riesgo, para determinar en cual de los efluentes se esta presentando una mayor concentración de éste y de esta manera disminuir en parte su concentración antes de llegar a la PTAR, ya que mediante los tratamientos biológicos su remoción es mínima.
- Debido a la alta temperatura del efluente que sale del clarificador (promedio 40,83 °C), que podría estar afectando el correcto funcionamiento de la laguna de oxidación, se recomienda una recirculación de efluente de la salida total (promedio 26,83 °C) hacia éste para disminuir la temperatura a la entrada de la laguna.
- Se recomienda el análisis de los compuestos denominados dioxinas (cancerígenos), ya que éstos se pueden estar formando debido al uso como materias primas tanto de compuestos aromáticos como de compuestos con cloro (etapa de blanqueamiento) en la fabricación de papel.

## BIBLIOGRAFIA

AGENDA AMBIENTAL: Municipio de Villa Rica. CRC. 2002. Pág. 17, 21, 25-27.

AGENDA AMBIENTAL: Municipio de Puerto Tejada. CRC. 2002. Pág. 15, 19, 23, 24.

AUSTIN T, George. Manual de procesos químicos en la industria. Tomo III. McGraw-Hill. México. 1988. Pág 719-740.

ARAÚJO, A.L.C. Comportamiento de formas de fósforo en sistemas de lagunas de estabilización en escala piloto, tratando residuos domésticos, Campina Grande, 1993. Departamento de ingeniería civil – Universidad Federal de Paraíba, Campus II, 1993.

BLASCO y de la Rubia. Normas de Riverside para evaluar la calidad de aguas de riego. 1973.

BRAVO R, Isabel y otros. Manual de prácticas de química agrícola. Universidad del Cauca. Popayán (Cauca). 2002. Pág 2-7, 20-32, 42-73.

BOUWER, H. y IDELOVITCH, E. Quality requirements for irrigation with sewage water. J. Irrig. & Drainage Eng. 1987. Pág 113, 516-535.

CENTRO REGIONAL DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA, CVC Y MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Nueva industria: producción más limpia y competitividad. 2003. pág 32.

CONIL Philippe. Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR): unas herramientas de desarrollo local. BIOTEC. Universidad de Bruselas. 1996. Pág. 1-25.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE RISARALDA. Tratamiento de aguas residuales: una necesidad inaplazable. Serie medio ambiente. 1995. pág 7, 9, 42, 43.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CAUCA. Informe de avance N° 4. 2003.

CRITES, R. y TCHOBANOGLIOUS, G. Tratamiento de aguas residuales: en pequeñas poblaciones. Editorial Mc-Graw Hill. 2000. Pág 21-97, 169-220.

CUSHING, Merchant L. Pulp and paper chemistry and chemical technology. Vol. 3. Wiley and Sons. 3<sup>rd</sup> ed. New York. 1981. Pág. 13-14.

Disponible en Internet : [www.estrucplan.com.ar/efluentes\\_liquidos.htm](http://www.estrucplan.com.ar/efluentes_liquidos.htm)

Disponible en Internet: [www.globe.com](http://www.globe.com)

Disponible en Internet: [www.us.es/grupotar/tar/formacion/laboratorio/protocolos/sulfuros.htm](http://www.us.es/grupotar/tar/formacion/laboratorio/protocolos/sulfuros.htm).

Disponible en Internet : [www.propal.co.com/\\_palcalino.htm](http://www.propal.co.com/_palcalino.htm)

Disponible en Internet : [www.gem.es](http://www.gem.es)

Disponible en internet:

[www.ingenieroambiental.com/newinformes/aspectoslagunasestabilizacion.pdf](http://www.ingenieroambiental.com/newinformes/aspectoslagunasestabilizacion.pdf)

ERIKSON, R.S. The concentrations of nitrates and nitrites in waste water and the occurrence of acute toxic methemoglobinemias. Department of Hygiene and Ecology, Collegium Medicum, Jagiellonian University, Krakow. Poland. 1985.

HERNANDEZ Muñoz Aurelio. Depuración de aguas residuales. Colección SEINOR Nº 9. Cuarta edición. Escuela de ingenieros de caminos, canales y puertos. Madrid. 1998.

METCALF y EDDY. Wastewater Engineering - Treatment, Disposal, Reuse. Tercera edición. McGraw-Hill. 1991.

KEMER FRANK y JHON MCCALLION. Manual de aguas: su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. Nalco Chemical Company. McGraw-Hill. 1998. Pág 117-134.

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y TRANSPORTES. Depuración por lagunaje de aguas residuales: Manual de operadores. 1991. Pág. 121-148.

MINISTERIO DE SALUD. Usos del agua y residuos líquidos: Decreto 1594 de 1984.

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en agricultura y acuicultura. Informe Técnico 778. OMS, Ginebra. 1989.

OROZCO Jaramillo Alvaro y SALAZAR Arias Alvaro. Tratamientos biológicos de las aguas residuales. Medellín – Colombia. 1985.

PAGE, A.L., CHANG, A. C., SPOSITO, G. y MATTIGOD, S. Trace elements in wastewater: Their effects on plant growth and composition and their behavior in soils. En: Modeling wastewater renovation. Land treatment. I.K. Iskandar (ed) John Wiley & Sons. 1981.

PLAN DE MANEJO AMBIENTAL. Planta productora de papeles S.A Propal II. 2003. Pág 12-26, 31-34.

PESCOD, M.M. FAO Irrigation & Drainage. Roma, 1992.

POHJOLAINEN Tuija y ALCALA-GALIANO Alfonso. Gestión del agua en la industria papelera. Ingeniería Química, Abril 1998. Pág. 2-14.

RAMIREZ Velásquez Alonso y RAMIREZ Ortiz Gloria. Uso y manejo de los suelos de la meseta de Popayán. ICA. Palmira. 1988. Pág 10-14.

RAMOS, C. El riego con aguas residuales. Generalitat valenciana. 1996. Pág 49 – 63.

ROJAS Romero, Jairo. Acuíquímica. Escuela Colombiana de Ingeniería. Santafé de Bogotá. 1996. Pág. 108-134,147.

ROMERO, J.A. Acuítratamiento por lagunas de estabilización. Editorial escuela colombiana de ingeniería. Bogotá. 1998.

SANS Fonfría Ramón. Ingeniería ambiental: Contaminación y tratamientos. Alfaomega marcombo. Barcelona. 1999.

TEBBUTT. Fundamentos de control de la calidad del agua. Editorial Limusa. México. 1995. Pág 19-26, 33-39, 75-89.

W.H.O: WORLD HEALTH ORGANIZATION. Waster stabilizations ponds: Principles of planning and practice. WHO EMRO Technical publication N° 10. Alejandría. 1987.

# ANEXOS

## ANEXO 1. ANALISIS DE VARIANZA ANOVA

### ANOVA

|                             |                | Sum of Squares | df | Mean Square | F        | Sig. |
|-----------------------------|----------------|----------------|----|-------------|----------|------|
| Temperatura                 | Between Groups | 3063,293       | 2  | 1531,647    | 2578,850 | ,000 |
|                             | Within Groups  | 39,199         | 66 | ,594        |          |      |
|                             | Total          | 3102,492       | 68 |             |          |      |
| SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES | Between Groups | 12679884       | 2  | 6339941,819 | 37,728   | ,000 |
|                             | Within Groups  | 4873277        | 29 | 168044,043  |          |      |
|                             | Total          | 17553161       | 31 |             |          |      |
| SOLIDOS SEDIMENTABLES       | Between Groups | 27412,942      | 2  | 13706,471   | 237,619  | ,000 |
|                             | Within Groups  | 2884,129       | 50 | 57,683      |          |      |
|                             | Total          | 30297,072      | 52 |             |          |      |
| PH                          | Between Groups | 23,180         | 2  | 11,590      | 22,726   | ,000 |
|                             | Within Groups  | 33,660         | 66 | ,510        |          |      |
|                             | Total          | 56,840         | 68 |             |          |      |
| DQO                         | Between Groups | 4158745        | 2  | 2079372,599 | 96,442   | ,000 |
|                             | Within Groups  | 646828,6       | 30 | 21560,953   |          |      |
|                             | Total          | 4805574        | 32 |             |          |      |
| DBO5                        | Between Groups | 44285184       | 2  | 22142591,85 | 48,910   | ,000 |
|                             | Within Groups  | 13581713       | 30 | 452723,776  |          |      |
|                             | Total          | 57866897       | 32 |             |          |      |
| CLORUROS                    | Between Groups | 216,355        | 2  | 108,178     | ,102     | ,903 |
|                             | Within Groups  | 70223,057      | 66 | 1063,986    |          |      |
|                             | Total          | 70439,412      | 68 |             |          |      |
| N AMONICAL                  | Between Groups | 2,542          | 2  | 1,271       | ,055     | ,946 |
|                             | Within Groups  | 1513,628       | 66 | 22,934      |          |      |
|                             | Total          | 1516,170       | 68 |             |          |      |
| NITRATOS                    | Between Groups | ,145           | 2  | ,072        | 2,644    | ,083 |
|                             | Within Groups  | 1,149          | 42 | ,027        |          |      |
|                             | Total          | 1,294          | 44 |             |          |      |
| NITRIOS                     | Between Groups | ,004           | 2  | ,002        | 4,376    | ,017 |
|                             | Within Groups  | ,031           | 63 | ,000        |          |      |
|                             | Total          | ,035           | 65 |             |          |      |
| SULFATOS                    | Between Groups | 65,641         | 2  | 32,820      | 15,651   | ,000 |
|                             | Within Groups  | 88,072         | 42 | 2,097       |          |      |
|                             | Total          | 153,713        | 44 |             |          |      |
| SULFUROS                    | Between Groups | 4,096          | 2  | 2,048       | 2,163    | ,123 |
|                             | Within Groups  | 62,499         | 66 | ,947        |          |      |
|                             | Total          | 66,595         | 68 |             |          |      |
| MATERIA ORGANICA            | Between Groups | ,004           | 2  | ,002        | 2,788    | ,070 |
|                             | Within Groups  | ,040           | 55 | ,001        |          |      |
|                             | Total          | ,044           | 57 |             |          |      |
| FOSFORO                     | Between Groups | 5,137          | 2  | 2,568       | 1,753    | ,181 |
|                             | Within Groups  | 96,713         | 66 | 1,465       |          |      |
|                             | Total          | 101,849        | 68 |             |          |      |

**ANEXO 2.**

**TABLAS ANALISIS DE CORRELACION DE PEARSON (PRUEBA PARAMETRICA)**

| CORRELACIONES                  |   | PH                                |
|--------------------------------|---|-----------------------------------|
| PH                             | Correlación de Pearson<br>Sig. (bilateral)<br>N | 1<br><br>23                       |
| SOLIDOS SUSPENDIDOS<br>TOTALES | Correlación de Pearson<br>Sig. (bilateral)<br>N | -0,179931306<br>0,596525462<br>11 |
| SOLIDOS SEDIMENTABLES          | Correlación de Pearson<br>Sig. (bilateral)<br>N | <br><br>23                        |
| DQO                            | Correlación de Pearson<br>Sig. (bilateral)<br>N | 0,28103419<br>0,402512347<br>11   |
| DBO5                           | Correlación de Pearson<br>Sig. (bilateral)<br>N | 0,135504183<br>0,69118356<br>11   |
| CLORUROS                       | Correlación de Pearson<br>Sig. (bilateral)<br>N | -0,23269723<br>0,285296354<br>23  |
| N AMONICAL                     | Correlación de Pearson<br>Sig. (bilateral)<br>N | -0,026551458<br>0,904280377<br>23 |
| NITRATOS                       | Correlación de Pearson<br>Sig. (bilateral)<br>N | -0,006667513<br>0,981185332<br>15 |
| NITRITOS                       | Correlación de Pearson<br>Sig. (bilateral)<br>N | -0,022984749<br>0,919131308<br>22 |
| SULFATOS                       | Correlación de Pearson<br>Sig. (bilateral)<br>N | -0,106582366<br>0,70538592<br>15  |
| SULFUROS                       | Correlación de Pearson<br>Sig. (bilateral)<br>N | -0,088232032<br>0,688912794<br>23 |
| MATERIA ORGANICA               | Correlación de Pearson<br>Sig. (bilateral)<br>N | -0,10586943<br>0,666205929<br>19  |
| FOSFORO                        | Correlación de Pearson<br>Sig. (bilateral)<br>N | 0,12244069<br>0,577828244<br>23   |

### TABLAS ANALISIS DE CORRELACION DE PEARSON (PRUEBA PARAMETRICA)

| CORRELACIONES               |                        | MATERIA ORGANICA |
|-----------------------------|------------------------|------------------|
| MATERIA ORGANICA            | Correlación de Pearson | 1                |
|                             | Sig. (bilateral)       |                  |
|                             | N                      | 19               |
| SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES | Correlación de Pearson | 0,180238759      |
|                             | Sig. (bilateral)       | 0,618288324      |
|                             | N                      | 10               |
| SOLIDOS SEDIMENTABLES       | Correlación de Pearson |                  |
|                             | Sig. (bilateral)       |                  |
|                             | N                      | 19               |
| DQO                         | Correlación de Pearson | 0,451190002      |
|                             | Sig. (bilateral)       | 0,190591652      |
|                             | N                      | 10               |
| DBO5                        | Correlación de Pearson | 0,231519036      |
|                             | Sig. (bilateral)       | 0,51983636       |
|                             | N                      | 10               |
| FOSFORO                     | Correlación de Pearson | 0,325500495      |
|                             | Sig. (bilateral)       | 0,173867996      |
|                             | N                      | 19               |
| N AMONICAL                  | Correlación de Pearson | 0,749699051      |
|                             | Sig. (bilateral)       | 0,000219358      |
|                             | N                      | 19               |
| SULFATOS                    | Correlación de Pearson | -0,519102324     |
|                             | Sig. (bilateral)       | 0,101775757      |
|                             | N                      | 11               |
| SULFUROS                    | Correlación de Pearson | 0,168311904      |
|                             | Sig. (bilateral)       | 0,490957551      |
|                             | N                      | 19               |

### TABLAS ANALISIS DE CORRELACION DE PEARSON (PRUEBA PARAMETRICA)

| CORRELACIONES                  |   | SULFATOS                          |
|--------------------------------|---|-----------------------------------|
| SULFATOS                       | Correlación de Pearson<br>Sig. (bilateral)<br>N | 1<br>15                           |
| SOLIDOS SUSPENDIDOS<br>TOTALES | Correlación de Pearson<br>Sig. (bilateral)<br>N | -0,178571433<br>0,701657951<br>7  |
| SOLIDOS SEDIMENTABLES          | Correlación de Pearson<br>Sig. (bilateral)<br>N | 15                                |
| N AMONICAL                     | Correlación de Pearson<br>Sig. (bilateral)<br>N | -0,414656103<br>0,124344759<br>15 |

| CORRELACIONES |   | N amoniacal                      |
|---------------|---|----------------------------------|
| N amoniacal   | Correlación de Pearson<br>Sig. (bilateral)<br>N | 1<br>23                          |
| CLORUROS      | Correlación de Pearson<br>Sig. (bilateral)<br>N | 0,34951946<br>0,102092084<br>23  |
| NITRATOS      | Correlación de Pearson<br>Sig. (bilateral)<br>N | 0,53028994<br>0,04200284<br>15   |
| NITRITOS      | Correlación de Pearson<br>Sig. (bilateral)<br>N | 0,098592861<br>0,662463782<br>22 |

**ANEXO 3. TABLAS ANALISIS DE CORRELACION DE SPEARMAN (PRUEBA NO PARAMETRICA)**

| CORRELACIONES               |                            | PH           |
|-----------------------------|----------------------------|--------------|
| PH                          | Coeficiente de correlación | 1            |
|                             | Sig. (bilateral)           |              |
|                             | N                          | 23           |
| SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES | Coeficiente de correlación | -0,009090909 |
|                             | Sig. (bilateral)           | 0,978836477  |
|                             | N                          | 11           |
| SOLIDOS SEDIMENTABLES       | Coeficiente de correlación |              |
|                             | Sig. (bilateral)           |              |
|                             | N                          | 23           |
| DQO                         | Coeficiente de correlación | 0,300000012  |
|                             | Sig. (bilateral)           | 0,370083094  |
|                             | N                          | 11           |
| DBO5                        | Coeficiente de correlación | 0,190909088  |
|                             | Sig. (bilateral)           | 0,573913217  |
|                             | N                          | 11           |
| CLORUROS                    | Coeficiente de correlación | -0,248640627 |
|                             | Sig. (bilateral)           | 0,252615482  |
|                             | N                          | 23           |
| N AMONICAL                  | Coeficiente de correlación | -0,032624815 |
|                             | Sig. (bilateral)           | 0,882519126  |
|                             | N                          | 23           |
| NITRATOS                    | Coeficiente de correlación | -0,107142858 |
|                             | Sig. (bilateral)           | 0,703900993  |
|                             | N                          | 15           |
| NITRITOS                    | Coeficiente de correlación | -0,06890709  |
|                             | Sig. (bilateral)           | 0,760595322  |
|                             | N                          | 22           |
| SULFATOS                    | Coeficiente de correlación | -0,053571429 |
|                             | Sig. (bilateral)           | 0,849609911  |
|                             | N                          | 15           |
| SULFUROS                    | Coeficiente de correlación | -0,060800791 |
|                             | Sig. (bilateral)           | 0,782867491  |
|                             | N                          | 23           |
| MATERIA ORGANICA            | Coeficiente de correlación | 0,069328658  |
|                             | Sig. (bilateral)           | 0,777928233  |
|                             | N                          | 19           |
| FOSFORO                     | Coeficiente de correlación | 0,177750319  |
|                             | Sig. (bilateral)           | 0,417128056  |
|                             | N                          | 23           |

**TABLAS ANALISIS DE CORRELACION DE SPEARMAN (PRUEBA NO PARAMETRICA)**

| CORRELACIONES               |                            | MATERIA ORGANICA |
|-----------------------------|----------------------------|------------------|
| MATERIA ORGANICA            | Coeficiente de correlación | 1                |
|                             | Sig. (bilateral)           |                  |
|                             | N                          | 19               |
| SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES | Coeficiente de correlación | 0,006060606      |
|                             | Sig. (bilateral)           | 0,986742914      |
|                             | N                          | 10               |
| SOLIDOS SEDIMENTABLES       | Coeficiente de correlación |                  |
|                             | Sig. (bilateral)           |                  |
|                             | N                          | 19               |
| DQO                         | Coeficiente de correlación | 0,515151501      |
|                             | Sig. (bilateral)           | 0,127552882      |
|                             | N                          | 10               |
| DBO5                        | Coeficiente de correlación | 0,24848485       |
|                             | Sig. (bilateral)           | 0,488776296      |
|                             | N                          | 10               |
| FOSFORO                     | Coeficiente de correlación | 0,394032508      |
|                             | Sig. (bilateral)           | 0,095063068      |
|                             | N                          | 19               |
| N AMONICAL                  | Coeficiente de correlación | 0,845614016      |
|                             | Sig. (bilateral)           | 5,12645E-06      |
|                             | N                          | 19               |
| SULFATOS                    | Coeficiente de correlación | -0,554545462     |
|                             | Sig. (bilateral)           | 0,076652333      |
|                             | N                          | 11               |
| SULFUROS                    | Coeficiente de correlación | 0,291355878      |
|                             | Sig. (bilateral)           | 0,22618413       |
|                             | N                          | 19               |

### TABLAS ANALISIS DE CORRELACION DE SPEARMAN (PRUEBA NO PARAMETRICA)

| CORRELACIONES                  |                            | SULFATOS     |
|--------------------------------|----------------------------|--------------|
| SULFATOS                       | coeficiente de correlación | 1            |
|                                | Sig. (bilateral)           |              |
|                                | N                          | 15           |
| SOLIDOS SUSPENDIDOS<br>TOTALES | coeficiente de correlación | -0,138022271 |
|                                | Sig. (bilateral)           | 0,76791158   |
|                                | N                          | 7            |
| SOLIDOS SEDIMENTABLES          | coeficiente de correlación |              |
|                                | Sig. (bilateral)           |              |
|                                | N                          | 15           |
| N AMONIAL                      | coeficiente de correlación | -0,471519556 |
|                                | Sig. (bilateral)           | 0,076006007  |
|                                | N                          | 15           |

| CORRELACIONES |                            | N amoniacal |
|---------------|----------------------------|-------------|
| N amoniacal   | coeficiente de correlación | 1           |
|               | Sig. (bilateral)           |             |
|               | N                          | 23          |
| CLORUROS      | coeficiente de correlación | 0,337617397 |
|               | Sig. (bilateral)           | 0,115134016 |
|               | N                          | 23          |
| NITRATOS      | coeficiente de correlación | 0,243074268 |
|               | Sig. (bilateral)           | 0,382689863 |
|               | N                          | 15          |
| NITRITOS      | coeficiente de correlación | 0,020898052 |
|               | Sig. (bilateral)           | 0,926452875 |
|               | N                          | 22          |

**ANEXO 4.**

**FOTO 1.**



**FOTO 2.**



## ANEXO 5.

### PERFIL LAGUNA DE OXIDACIÓN

FECHA: Septiembre 10 de 2004 Hora: 10:30 am

| PUNTO | pH<br>unid. | TEMP.<br>°C | O <sub>2</sub><br>mg/L | SST<br>ppm | CENIZAS<br>ppm | Volátiles<br>ppm | Relación<br>F/M * | DQO<br>ppm | DBO <sub>5</sub><br>ppm |
|-------|-------------|-------------|------------------------|------------|----------------|------------------|-------------------|------------|-------------------------|
| 1     | 6,63        | 35,0        | 0,01                   | 474        | 136            | 338              | 1,2               | 1230       | 393,9                   |
| 2     | 7,26        | 35,0        | 0,09                   | 566        | 186            | 3380             | 0,1               | 1150       | 265,8                   |
| 3     | 7,27        | 34,5        | 0,08                   | 516        | 158            | 358              | 0,7               | 1005       | 251                     |
| 4     | 7,31        | 34,0        | 0,08                   | 596        | 188            | 408              | 0,5               | 1080       | 209,1                   |
| 5     | 7,44        | 34,0        | 0,10                   | 594        | 200            | 394              | 0,6               | 1005       | 232,1                   |
| 6     | 7,61        | 33,5        | 0,11                   | 466        | 140            | 326              | 0,7               | 930        | 222,9                   |
| 7     | 7,71        | 33,0        | 0,10                   | 494        | 136            | 358              | 0,5               | 885        | 163,2                   |
| 8     | 7,72        | 32,5        | 0,12                   | 432        | 120            | 312              | 0,5               | 795        | 155,4                   |
| 9     | 7,8         | 32,0        | 0,11                   | 450        | 124            | 326              | 0,5               | 860        | 150,3                   |
| 10    | 7,72        | 31,0        | 0,99                   | 562        | 160            | 402              | 0,3               | 815        | 138,8                   |

\*Relación alimento-microorganismo

**ANEXO 6.**

**INTERPRETACION Y NIVELES CRITICOS DE CALIDAD DE AGUAS PARA RIEGO**

RAMOS, C. El riego con aguas residuales. Generalitat valenciana. 1996. Pág 49 – 63.

|  | GRADO DE RESTRICCIÓN |         |         |        |
|---|----------------------|---------|---------|--------|
|   | NINGUNO              | BAJO    | ALTO    | SEVERO |
| <b>RIESGO DE SALINIZACIÓN (Cultivos Intensivos)</b>                               |                      |         |         |        |
| Conductividad Electrica CE (mmho/cm)  | 0.3                  | 0.3-0.7 | 0.7-1.5 | >1.5   |
| Sodificación; Sodio (meq/lt)  | <2                   | 2-3     | 3-10    | >10    |
| <b>DETERIORO DE LA PERMEABILIDAD DEL SUELO</b>                                    |                      |         |         |        |
| Conductividad Electrica CE (mmho/cm)  | <0.5                 | 0.5-1.5 | 1.5-2.0 | >2.0   |
| Relación de Adsorción de Sodio; RAS   | <3                   | 3-9     | 9-12    | >12    |
| <b>RIESGO DE TOXICIDAD A LAS PLANTAS</b>  |                      |         |         |        |
| RAS   | <3                   | 3-9     | >9      |        |
| Cloruros (mg/l)   | <70                  | 70-345  | >345    |        |
| Boro (mg/l)   | <1                   | 1-2     | >2      |        |
| Aluminio (mg/l)   | -                    | -       | >5      |        |
| Arsenico (mg/l)   | -                    | -       | >0.1    |        |
| Cadmio (mg/l)   | -                    | -       | >0.01   |        |
| Zinc (mg/l)   | -                    | -       | >2.0    |        |
| Cromo (mg/l)  | -                    | -       | >0.1    |        |
| Plomo (mg/l)  | -                    | .       | >0.1    |        |
| Sodio (mg/l)  | -                    | -       | >60     |        |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)   | <10                  | 10-40   | >40     |        |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)   | <50                  | 50-150  | >150    |        |
| pH  | -                    | 6.5-8.4 | -       |        |

## ANEXO 7.

### CARACTERIZACIÓN DE VERTIMIENTOS PLANTA 2. METALES PESADOS

| Primer semestre de 2004 |                          |
|-------------------------|--------------------------|
| <b>Parámetro</b>        | <b>Salida Total mg/L</b> |
| Aluminio                | 2.20                     |
| Plomo                   | < 0.12                   |
| Zinc                    | 0.1                      |
| Cromo                   | < 0.04                   |
| Cadmio                  | < 0.01                   |
| Arsénico                | 3.6                      |
| Mercurio                | 1.6                      |