

Tratamiento Primario Avanzado: El Paradigma Moderno de Tratamiento de Aguas Residuales Sanitarias

Tratamento Primário Avançado: O Paradigma Moderno do Tratamento de Esgotos Sanitários

2ª de 3 partes

por Ricardo Y. Tsukamoto, Ph.D.

Español

Resumen: El panorama mundial del tratamiento de aguas residuales sanitarias está siendo revolucionado mediante el uso del proceso físico-químico conocido como "Tratamiento Primario Avanzado" (CEPT*-TPA). Las razones que han llevado a dicho cambio se mencionan en esta segunda parte del artículo, acerca del proceso físico-químico que describe las distintas etapas de tratamiento y compara la eficiencia de esta nueva estrategia con la de los tratamientos convencionales (bacterianos).

El proceso CEPT-TPA consiste en precipitar simultáneamente las diversas clases de contaminantes de aguas residuales sanitarias, atrapados en flóculos fáciles de eliminar del agua. Este proceso proporciona elevadas tasas de depuración en una sola etapa de tratamiento. A pesar de su uso en nuevas plantas de tratamiento de aguas residuales, la versatilidad del proceso permite duplicar la capacidad y la eficiencia de las plantas pre-existentes—prácticamente sin la necesidad de obras civiles. Esta es una estrategia que combina la eficiencia de tratamiento requerida en el mundo entero con el presupuesto disponible en los países en vías de desarrollo.

Etapas del proceso

Los principios de coagulación y floculación universalmente adoptados en el tratamiento de agua potable fueron adaptados al proceso CEPT-TPA. En el caso de aguas residuales, se desarrollaron conceptos avanzados de dichos principios para adecuar los parámetros de tratamiento a las características de las aguas residuales. Las etapas del proceso de tratamiento son las siguientes:

1. **Coagulación:** La adición de 5 a 50 miligramos por litro (mg/L) de una sal inorgánica de hierro (clorato o sulfato férrico) o de aluminio (sulfato o policlorato de aluminio) provoca la coagulación inmediata de las aguas residuales. Los sólidos suspendidos, la materia coloidal y los organismos patógenos son precipitados en forma de micro-flóculos. El fosfato, los metales pesados y el gas sulfídrico son insolubilizados en los micro-flóculos.

2. **Floculación:** La adición de 0.1 a 0.5 mg/L de un compuesto orgánico de tipo polielectrolito aniónico, genera una red de microfilamentos adhesivos dispersos en el agua residual. Esos microfilamentos forman una red que captura los micro-flóculos y causa su agregación progresiva, generando flóculos de mayor tamaño que son eliminados más fácilmente. El objetivo específico del proceso CEPT-TPA es generar flóculos que tengan una mayor capacidad de capturar contaminantes, y que al mismo tiempo sean estructuralmente resistentes y densos para facilitar su separación del agua.

Português

Resumo: O cenário mundial de tratamento do esgoto sanitário está sendo revolucionado pelo processo físico-químico conhecido como Tratamento Primário Avançado (CEPT*-TPA). As razões para tal mudança estão nesta segunda parte do artigo sobre o processo físico-químico, que apresenta as etapas do tratamento, e compara a eficiência desta nova estratégia com a dos tratamentos convencionais (bacterianos).

O processo CEPT-TPA consiste em precipitar simultaneamente as diversas classes de poluentes do esgoto sanitário, aprisionando-as em grumos ou flocos fáceis de remover da água. Proporciona elevadas taxas de depuração num único estágio de tratamento. Além do uso em novas plantas de tratamento de esgoto, a versatilidade do processo permite duplicar a capacidade e a eficiência de plantas pré-existentes—praticamente sem obras civis. É uma estratégia que combina a eficiência de tratamento requerida no mundo globalizado ao orçamento disponível nos países em desenvolvimento.

Etapas do processo

Os princípios de coagulação e floculação universalmente adotados no tratamento de água potável foram adaptados ao processo CEPT-TPA. No caso do esgoto, foram desenvolvidos conceitos avançados daqueles princípios para adequar os parâmetros do tratamento às características do esgoto. As etapas do processo de tratamento são as seguintes:

1. **Coagulação:** A adição de 5 a 50 miligramas por litro (mg/L) de um sal inorgânico de ferro (cloreto ou sulfato férrico) ou de alumínio (sulfato ou policloreto de alumínio) provoca a coagulação imediata do esgoto. Os sólidos suspensos, a matéria coloidal e os organismos patógenos são precipitados sob a forma de microflocos. O fosfato, os metais pesados e o gás sulfídrico são insolubilizados nos microflocos.

2. **Floculação:** A adição de 0,1 a 0,5 mg/L de um composto orgânico do tipo polieletrólito aniônico, gera uma rede de micro-filamentos adesivos dispersos no esgoto. Tais micro-filamentos formam uma rede, que captura os microflocos e provoca a sua agregação progressiva, gerando flocos maiores e facilmente removíveis. O objetivo específico do CEPT-TPA é gerar flocos que tenham a máxima capacidade de capturar poluentes, e que sejam ao mesmo tempo, estruturalmente resistentes e densos para facilitar a sua separação da água.

3. **Separação sólido-líquido:** Os flocos podem ser removidos da água num dos três níveis: pelo fundo (por sedimentação), pela superfície (por flotação), ou na coluna d'água (por micro-peneiramento). A sedimentação é o processo adotado na maioria dos projetos, por usar a

3. *Separación de sólido-líquido*: Los flóculos pueden ser removidos del agua en uno de tres niveles: en el fondo (por sedimentación), en la superficie (por flotación), o en la columna de agua (por microtamizado). La sedimentación es un proceso adoptado en la mayoría de los proyectos, por utilizar la fuerza de gravedad—que es perpetua, constante y gratuita—de manera distinta a los demás procesos, los cuales dependen de energía eléctrica y equipos más complejos. Las aguas residuales tratadas o efluente, son transparentes debido a la eliminación casi total de sólidos suspendidos, de los organismos patogénicos, y de la mayor parte de DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) y de fósforo de las aguas residuales. El desecho en el medio ambiente es por lo general precedido por una desinfección final del efluente a través de cloro o rayos ultravioleta.

4. *Lodo*: Los sólidos suspendidos y la materia coloidal son eliminados de las aguas residuales en forma de lodo o fango fácil de densificar, desaguar y estabilizar. El lodo estabilizado se conoce como biosólido, y puede ser utilizado como fertilizante agrícola rico en fósforo¹—dicho uso ya es adoptado en los Estados Unidos, Europa, Japón, y Brasil.

Implementación Correcta de las Etapas: El proceso CEPT-TPA es sencillo, eficaz, rápido, utiliza poco equipo y energía, proporcionando bajos costos de capital y de operación. Sin embargo, su implementación correcta requiere un conocimiento técnico especializado para determinar la combinación ideal de los parámetros de tratamiento—los cuales son específicos a cada localidad y a sus aguas residuales. Por ejemplo, el tipo de coagulante y su dosis para las aguas residuales varían de acuerdo a los contaminantes prioritarios que se desean eliminar en cada caso. En forma análoga, el tipo y la dosis de floculante dependen de la interacción entre el tamaño de la molécula del polielectrolito, su densidad de carga eléctrica, y el coagulante utilizado en dichas aguas residuales. Recientemente, se desarrolló el polielectrolito catiónico como coagulante de aguas residuales,² produciendo efectos distintos del coagulante metálico, lo que está ampliando aún más la gama de aplicaciones del tratamiento físico-químico.

Desecho en el Medio Ambiente: El efluente del tratamiento CEPT-TPA puede ser eliminado directamente en el medio ambiente, cumpliendo con los límites locales. Eso ocurre tanto en ciudades pequeñas como en grandes metrópolis del mundo, como en Los Angeles, San Diego, Montreal, Hong Kong, Río de Janeiro y otras ciudades. Además, de necesitarse una mayor remoción de DBO antes del desecho, se puede usar cualquier tipo de tratamiento secundario para “pulir” el efluente de CEPT-TPA. Como forma de reuso de agua, el proceso CEPT-TPA está en fase final de evaluación para tratar las aguas residuales de la metrópolis más grande del mundo, la Ciudad de México, y aprovechar directamente su efluente en el riego agrícola.³ La considerable remoción de fósforo minimiza la eutrofización del ambiente y la propagación de algas tóxicas, especialmente en cuerpos de agua donde se capta agua para consumo humano, propiciando un beneficio ambiental inexistente en el tratamiento secundario.

Comparación de estrategias

La estrategia convencional de tratamiento de aguas residuales tiene el objetivo principal de depurar DBO de las aguas residuales, por medio de su transformación a través de bacterias. En contraste, la estrategia avanzada depura rápida y simultáneamente las varias clases de contaminantes en las aguas residuales, por medio de un proceso físico-químico. De ser necesario, dicho proceso puede ser complementado por un tratamiento bacteriano de pequeñas dimensiones para eliminar más DBO. Como la DBO que queda en el efluente consiste de sustancias orgánicas disueltas, que son fácilmente asimiladas por las bacterias, el

força da gravidade—que é perpétua, constante e gratuita—em contraste aos outros processos, que dependem de energia elétrica e de equipamentos mais complexos. O esgoto tratado ou efluente é transparente, devido à remoção da quase totalidade dos sólidos suspensos, dos organismos patogênicos, além da maior parte da DBO e do fósforo do esgoto. O descarte no ambiente é geralmente precedido de uma desinfeção final do efluente por cloro ou por raios ultra-violeta.

4. *Lodo*: Os sólidos suspensos e o material coloidal são removidos do esgoto sob a forma de um lodo fácil de ser adensado, desaguado e estabilizado. O lodo estabilizado é denominado biosólido, e pode ser utilizado como fertilizante agrícola rico em fósforo¹—tal uso já é efetuado nos EE.UU., na Europa, no Japão e no Brasil.

Implementação Correta das Etapas: O processo CEPT-TPA é simples, eficaz, rápido, usa pouco equipamento e energia, proporcionando baixos custos de capital e de operação. Contudo, a sua implementação correta requer conhecimento técnico especializado para determinar a combinação ideal dos parâmetros do tratamento—os quais são específicos a cada local e ao seu esgoto. Por exemplo, o tipo de coagulante e sua dosagem ao esgoto variam conforme os poluentes a remover prioritariamente em cada caso. De forma análoga, o tipo e dosagem do floculante dependem da interação entre o tamanho da molécula de polieletrólito, a sua densidade de carga elétrica, e o coagulante usado naquele esgoto. Recentemente, desenvolveu-se o polieletrólito catiônico como coagulante do esgoto,² produzindo efeitos distintos do coagulante metálico, o que está ampliando ainda mais a gama de aplicações do tratamento físico-químico.

Descarte no Meio Ambiente: O efluente do tratamento CEPT-TPA pode ser descartado diretamente no meio ambiente, obedecendo aos limites locais. Isso ocorre desde pequenas cidades até grandes metrópoles do mundo, como em Los Angeles, San Diego, Montreal, Hong Kong, Rio de Janeiro e outras. Ademais, caso seja necessária uma remoção maior de DBO antes do descarte, pode-se usar qualquer tipo de tratamento secundário para “polir” o efluente do CEPT-TPA. Como forma de reuso de água, o processo CEPT-TPA está em fase final de avaliação para tratar o esgoto da maior metrópole do mundo, a Cidade do México, e aproveitar diretamente o seu efluente em irrigação agrícola³. A considerável remoção de fósforo minimiza a eutrofização do ambiente e a propagação de algas tóxicas, especialmente em corpos d’água onde se capta água para consumo humano, propiciando um benefício ambiental inexistente no tratamento secundário.

Comparação das estratégias

A estratégia convencional de tratamento de esgoto tem o objetivo principal de depurar a DBO do esgoto, por meio da sua transformação por bactérias. Em contraste, a estratégia avançada depura rápida e simultaneamente, as várias classes de poluentes do esgoto por meio de um processo físico-químico. Caso necessário, tal processo pode ser complementado por um tratamento bacteriano de pequenas dimensões para remover mais DBO. Como a DBO restante no efluente consiste de substâncias orgánicas dissolvidas, facilmente assimiladas por bactérias, o tratamento secundário terá apenas uma fração do tamanho daquele que seria necessário num processo convencional, propiciando considerável economia.

Para comparar as estratégias convencional e avançada de tratamento, vamos analisar a remoção de três dos principais parâmetros do esgoto. Supondo que o esgoto tratado será descartado em um ambiente sensível, consideremos a meta de remover 90% da DBO, 85% dos sólidos suspensos totais (SST) e 90% do fósforo (P) do esgoto. A forma como cada um destes parâmetros é depurada está graficamente ilustrada nas Figuras 1 a 3, respectivamente. Estas figuras apresentam cada estratégia de tratamento como uma barra:

tratamiento secundario tendrá solamente una fracción del tamaño del que sería necesario en un proceso convencional, resultando en considerables ahorros económicos.

Para comparar la estrategia convencional de tratamiento con la avanzada, vamos a analizar la eliminación de tres de los principales parámetros de aguas residuales. Suponiendo que las aguas residuales serán desechadas en un ambiente sensitivo, consideremos la meta de eliminar 90% del DBO, 85% de los sólidos suspendidos totales (SST) y 90% del fósforo (P) de las aguas residuales. La forma en que se depura cada uno de estos parámetros aparece gráficamente ilustrada en las Figuras 1 a 3, respectivamente. En estas figuras se usan barras para presentar cada estrategia de tratamiento:

Barra A—Convencional I: Corresponde a los tratamientos convencionales sin un tratamiento primario tradicional previo. En este caso, toda la depuración requerida en los parámetros de aguas residuales debe hacerse integralmente a través del tratamiento biológico. Aquí se incluyen las lagunas de estabilización, algunas variaciones de lodos activados (por aireación prolongada; en lote; “deep shaft”; con oxígeno puro), los digestores anaeróbicos (UASB, filtros), y otros.

Barra B—Convencional II: Corresponde a los tratamientos convencionales en los cuales el tratamiento biológico es precedido por un tratamiento primario tradicional, como por ejemplo, el tratamiento por lodos activados del tipo convencional.

Barra C—Avanzada: Consiste del tratamiento avanzado, en el cual la depuración principal de las aguas residuales se realiza a través del proceso CEPT-TPA, seguido por una “pulida” de su efluente por medio de un tratamiento biológico.

Remoción de DBO (ver Figura 1): En la estrategia Convencional I, el tratamiento biológico debe obtener una depuración del 90% de DBO (1A), una meta difícil de obtener para las lagunas de estabilización, e imposible para los tratamientos anaeróbicos. En la estrategia Convencional II, el tratamiento primario tradicional remueve 35% de DBO, y el tratamiento biológico debe remover 55% de DBO (1B). Tal condición es alcanzada por los lodos activados, pero está sujeta a una oscilación de eficiencia que depende de los parámetros de flora microbiana (cantidad de masa biológica, edad en días de la población microbiana, contaminación por bacterias filamentosas, disponibilidad de oxígeno, temperatura, etc.). En contraste, en la estrategia avanzada, el proceso CEPT-TPA remueve 65% de DBO (1C) seguido por la “pulida” de su efluente a través de un pequeño tratamiento biológico que remueve 25% de DBO de las aguas residuales, alcanzando la meta.

Remoción de SST (ver Figura 2): Por la estrategia convencional, la meta de remover 85% de los SST solamente puede ser alcanzada al final del tratamiento secundario. Para ciertos tipos de tratamiento, como lagunas de estabilización y procesos anaeróbicos (2A), la meta resulta imposible. Los lodos activados y sus variaciones (2A y 2B) cumplen de por sí la meta, si están bien equilibrados y no existen factores dañinos (bacterias filamentosas, arrastre de lodo, etc.). En contraste, la estrategia avanzada alcanza la meta tan solo con CEPT-TPA (2C), aún en el nivel primario y eximiendo el secundario.

Remoción de fósforo (ver Figura 3): La estrategia convencional elimina una pequeña cantidad de P de las aguas residuales (3A y 3B), 30% al máximo, o sea, 70% del P es desechado en el medio ambiente. Tratamientos secundarios convencionales han sido introducidos en Latinoamérica, pero lamentablemente éstos no evitan la eutrofización del ambiente, perpetuando el grave problema de envenenamiento del agua a través de algas tóxicas. Asimismo, es imposible alcanzar la meta usando

Barra A—Convencional I: Corresponde aos tratamentos convencionais sem prévio tratamento primário tradicional. Neste caso, toda a depuração requerida nos parâmetros do esgoto deve ser feita integralmente pelo tratamento biológico. Estão aqui incluídas as lagoas de estabilização, algumas variantes de lodos ativados (por aeração prolongada; em batelada; “deep shaft”; com oxigênio puro), os digestores anaeróbios (UASB, filtros), e outros.

Barra B—Convencional II: Corresponde aos tratamentos convencionais nos quais o tratamento biológico é precedido por um tratamento primário tradicional, como por exemplo, o tratamento por lodos ativados convencional.

Barra C—Avançada: Consiste do tratamento avançado, no qual a depuração principal do esgoto é realizada pelo processo CEPT-TPA, seguido de um “polimento” do seu efluente por meio de um tratamento biológico.

Remoção de DBO (ver Figura 1): Na estratégia Convencional I, o tratamento biológico tem que obter a depuração de 90% da DBO (1A), uma meta difícil para lagoas de estabilização, e impossível para tratamentos anaeróbios. Na Convencional II, o tratamento primário tradicional remove 35% da DBO, e o biológico deve remover 55% da DBO (1B). Tal condição é alcançada pelos lodos ativados, mas fica sujeita à oscilação de eficiência em consequência dos parâmetros da flora microbiana (quantidade de biomassa, idade em dias da população bacteriana, contaminação por bactérias filamentosas, disponibilidade de oxigênio, temperatura, etc.). Em contraste, na estratégia avançada, o processo CEPT-TPA remove 65% da DBO (1C) seguido do “polimento” do seu efluente por um pequeno tratamento biológico que remove 25% da DBO do esgoto, completando a meta.

Remoção de SST (ver Figura 2): Pela estratégia convencional, a meta de remover 85% dos SST só pode ser alcançada ao final do tratamento secundário. Para certos tratamentos, como lagoa de estabilização e processos anaeróbios (2A), tal meta é impossível. Já os lodos ativados e suas variações (2A e 2B) cumprem a meta, se estiverem bem equilibrados, e sem fatores deletérios (bactérias filamentosas, arraste de lodo, etc.). Em contraste, a estratégia avançada alcança a meta já no CEPT-TPA (2C), ainda em nível primário e dispensando o secundário.

Remoção de fósforo (ver Figura 3): A estratégia convencional remove uma pequena quantidade de P do esgoto (3A e 3B), 30% no máximo, ou seja, 70% do P é descartado no meio ambiente. Tratamentos secundários convencionais vêm sendo implantados na América Latina, mas lamentavelmente, estes não evitam a eutrofização do ambiente, perpetuando o grave problema de envenenamento da água por algas tóxicas. Assim, é impossível atingir a meta pela estratégia convencional. Em contraste, a estratégia avançada utiliza baixas concentrações do coagulante metálico para remover ca. 75% do P do esgoto (3C); caso necessário, tal remoção pode ser elevada pelo aumento da dosagem de coagulante. A estratégia avançada alcança efeitos ao nível terciário de tratamento do esgoto ao adotar a estrutura de tratamento primário.

Conclusão

Para atender às metas de depuração de nosso exemplo, a estratégia convencional seria eficaz para remover DBO, porém teria dificuldade para remover SST, e não atenderia à remoção de P. Em contraste, a estratégia avançada seria eficaz para atender às três metas, com maior confiabilidade e rapidez (ver Figuras 4 e 5). Estudos europeus mostram que a estratégia avançada tem menor custo⁴ e consome menos energia^{4,5} por DBO removido, além de ser mais compacta⁵ do que a estratégia convencional.

* Por suas siglas em inglês.

la estrategia convencional. De manera distinta, la estrategia avanzada utiliza bajas concentraciones de coagulante metálico para eliminar cerca del 75% del P de las aguas residuales (3C); de ser necesario, dicha remoción puede ser elevada aumentando la dosis de coagulante. La estrategia avanzada alcanza efectos a un nivel terciario de tratamiento de aguas residuales, al adoptar la estructura de tratamiento primario.

Conclusión

Para satisfacer las metas de depuración de nuestro ejemplo, la estrategia convencional sería eficaz para remover DBO, pero tendría dificultad en remover SST, y no serviría para la remoción del P. Por otro lado, la estrategia avanzada sería eficaz para satisfacer las tres metas, con una mayor confiabilidad y rapidez (ver Figuras 4 y 5). Estudios realizados en Europa muestran que la estrategia avanzada es de menor costo⁴ y consume menos energía^{4,5} por DBO que se remueve, además de ser más compacta⁵ que la estrategia convencional.

* Por sus siglas en inglés.

Figura 1. Remoción de DBO conforme a la estrategia de tratamiento

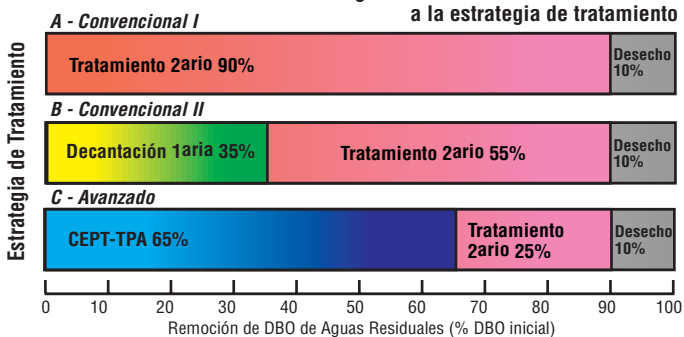


Figura 2. Remoción de SST conforme a la estrategia de tratamiento

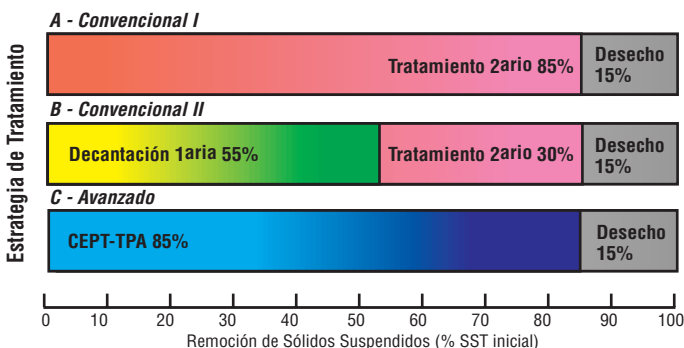
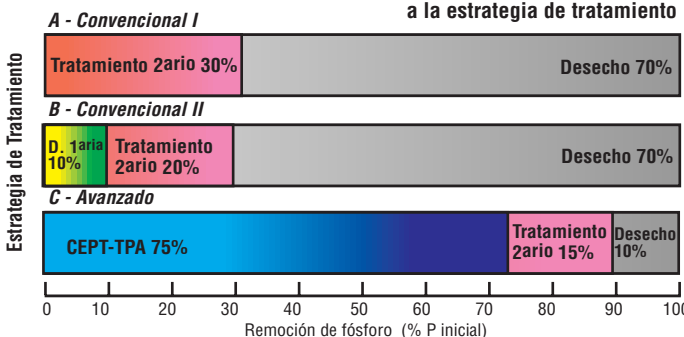


Figura 3. Remoción de fósforo conforme a la estrategia de tratamiento



Acerca del Autor

Ricardo Y. Tsukamoto, Ph.D., es director técnico de Bioconsult Ltda., consultoría especializada en tratamiento de agua y aguas residuales en Brasil. Con 21 años de experiencia profesional, el Sr. Tsukamoto ha estado asociado desde hace 8 años con el Dr. Donald Harleman, Catedrático del MIT (Massachusetts Institute of Technology), EE.UU., para promover e implementar el CEPT-TPA en Latinoamérica. Contacto: bioconsu@uol.com.br

Referencias:

- Balmér, P. "Chemical treatment—consequences for sludge biosolids handling", En Klute, R. & Hahn, H.H. (Eds.), *Chemical Water and Wastewater Treatment, 3: Proc. 6th Gothenburg Symp.*, Springer-Verlag, Berlin. p. 319-327, 1994.
- Mels, A.R., y A.F. van Nieuwenhuijzen, "Cationic organic polymers for flocculation of municipal wastewater—experiments and scenario study", En Hahn, H.H., Hoffmann, E., y Odegaard, H. (Eds.), *Chemical Water and Wastewater Treatment, 6: Proc. 9th Gothenburg Symp.*, Springer-Verlag, Berlin, p. 23-33, 2000.
- Jimenez-Cisneros, B.E., et al., "The elimination of helminth ova, fecal coliforms, salmonella and protozoan cysts by various physicochemical processes in wastewater and sludge", *Water Science & Technology*, 43(12): 179-182, 2001.
- Odegaard, H., y I. Karlsson, "Chemical wastewater treatment—value for money", En Klute, R. & Hahn, H.H. (Eds.), *Chemical Water and Wastewater Treatment, 3: Proc. 6th Gothenburg Symp.*, Springer-Verlag, Berlin, p. 191-209, 1994.
- van Nieuwenhuijzen, A.F., et al., "Identification and evaluation of wastewater scenarios, based on physical-chemical pretreatment", En Hahn, H.H.; Hoffman, E., y Odegaard, H. (Eds.), *Chemical Water and Wastewater Treatment, 5: Proc. 8th Gothenburg Symp.*, Springer-Verlag, Berlin, p. 351-362, 1998.

Figura 4. Aguas residuales sanitarias brutas, antes del tratamiento CEPT-TPA



Figura 5. Efluente clarificado de tratamiento CEPT-TPA

