

## **Determinación de la Velocidad de Sedimentación de SST en Aguas Residuales de una Planta de Tratamiento Primario de una Industria Papelera**

### **Determination of the sedimentation rate of SST in a Wastewater Primary Treatment Plant of Paper Industry**

**Quispe Mamani, Erick José**  
Makno Ingenieros

Recibido 18 de octubre del 2014 - Aceptado 12 de mayo del 2015

---

#### **Resumen**

El objetivo de esta investigación fue determinar la velocidad de sedimentación de Sólidos Suspendidos Totales (SST) en aguas residuales de una industria papelera, para dimensionar unidades de sedimentación que logren concentraciones menores de 100 mg/L SST en los efluentes. Se utilizó el diseño factorial 3<sup>2</sup> más 3 puntos centrales, las muestras utilizadas fueron el agua residual de la papelera. La dosis de coagulante sulfato de aluminio en concentraciones de 20, 25 (dosis actual) y 30 mg/L, y concentración inicial de SST en muestras con 2480 (concentración actual), 1680, y 1240 mg/L. La velocidad de sedimentación actual es de 0.981 m/seg la cual requiere una superficie de 18.2 m<sup>2</sup> y 1.7 m de profundidad mínima. Mejores velocidades de sedimentación como 1.801, 1.124 y 1.31 m/s, se obtuvieron en la muestra con 1680 mg/L de SST y dosis de 20, 25 y 30 mg/L respectivamente.

**Palabras clave:** Velocidad de sedimentación, columna de sedimentación, unidades de sedimentación, diseño factorial 3<sup>2</sup>, dosis de coagulante, concentración inicial de SST.

#### **Abstract**

The objective of this research was to determine the sedimentation rate Total Suspended Solids (TSS) in wastewater from a paper industry, sedimentation for sizing units achieve concentrations less than 100 mg / L TSS in effluent, factorial design 3<sup>2</sup> plus 3 central points was used, the samples used were the wastewater from the trash. The dose of coagulant aluminum sulfate at concentrations of 20, 25 (current dose) and 30 mg / L, and initial concentration of samples with SST in 2480 (current concentration), 1680, and 1240 mg / L. Current sedimentation speed is 0981 m / s which requires an area of 18.2 m<sup>2</sup> and 1.7 m minimum depth. Best sedimentation rates as 1.801, 1.124 and 1.31 m / s, were obtained in the sample with 1680 mg / L SST and doses of 20, 25 and 30 mg / L respectively.

**Keywords:** Sedimentation rate, sedimentation column, sedimentation units, factorial design 3<sup>2</sup>, coagulant dosage, initial concentration of SST.

### Introducción

El tratamiento primario de aguas residuales tiene como objetivo la remoción, por medios físicos o mecánicos, del material sedimentable o flotante (sólidos suspendidos del efluente), y con esto una fracción importante de la carga orgánica que puede representar entre el 25% y el 40% de la Demanda Biológica de Oxígenos (DBO) (Rojas 2002). Cánepa (2004) añade que el tratamiento primario se logra principalmente por efecto gravitacional de los sólidos suspendidos en las aguas residuales. Para que éste fenómeno físico llamado sedimentación alcance su mayor eficacia, se puede adicionar coagulantes como sulfato de *aluminio* y *cloruro férrico* a fin de obtener mayor sedimentación de sólidos suspendidos, muy favorable para el proceso en el tratamiento primario (Moreno, 2010).

Maldonado (2005) y Reynolds (2002) señalan que el desarrollo tecnológico e industrial, el incremento de producción industrial y crecimiento de las poblaciones conllevan a generar mayor volumen, carga, concentración y diversidad de residuos líquidos que si no son tratadas para su disposición final en cuerpos superficiales de agua (ríos, lagos, lagunas, etc.) pueden traer impactos y efectos, como generar contaminación y efectos nocivos en las formas de vida presente en estas corrientes, rompe el equilibrio biológico, altera cada uno de los componentes del ciclo biodinámico, y llega a causar muerte y enfermedades en seres humanos. En tanto Moreno (2010) coinciden con Metcalf y Eddy (1995) señalando que para minimizar estos impactos y efectos es necesario tratar los efluentes en sistemas de tratamiento.

En este sentido, es necesario considerar a la industria papelera, que por las características de su procesos de producción requiere un importante volumen de agua, que después de su uso, son evacuados como efluentes líquidos industriales que necesitan ser tratados (Co-rochano, 2006).

El tratamiento primario típico comprende unidades de mezcla y coagulación, clarificador y el sedimentador (figura 1).

Cánepa (2004) y Rojas (2002) señalan que el objetivo de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) es tener efluentes no contaminantes, especificando que la sedimentación debe reducir los sólidos suspendidos totales presentes en las aguas residuales. Con el fin de prevenir, controlar y mitigar la contaminación ambiental, el (DS-003-2002 PRODUCE) indica que las industrias de manufactura que utilizan agua y generan residuos líquidos deben asegurarse de no exceder los Límites Máximos Permisibles (LMP) para efluentes líquidos descargados en aguas superficiales o alcantarillado (Reynolds 2002). Metcalf y Eddy (1995) afirman que luego del tratamiento primario, los SST deben estar en concentraciones por debajo de los LMP antes de su descarga en aguas superficiales o en la red de Alcantarillado (Tabla 1).

En casos frecuentes donde se tiene problemas con la remoción de SST, Cánepa (2004) y Moreno (2010) manifiestan que es necesario evaluar el sistema de sedimentación de la PTAR, para encontrar las posibles deficiencias y corregirlas.

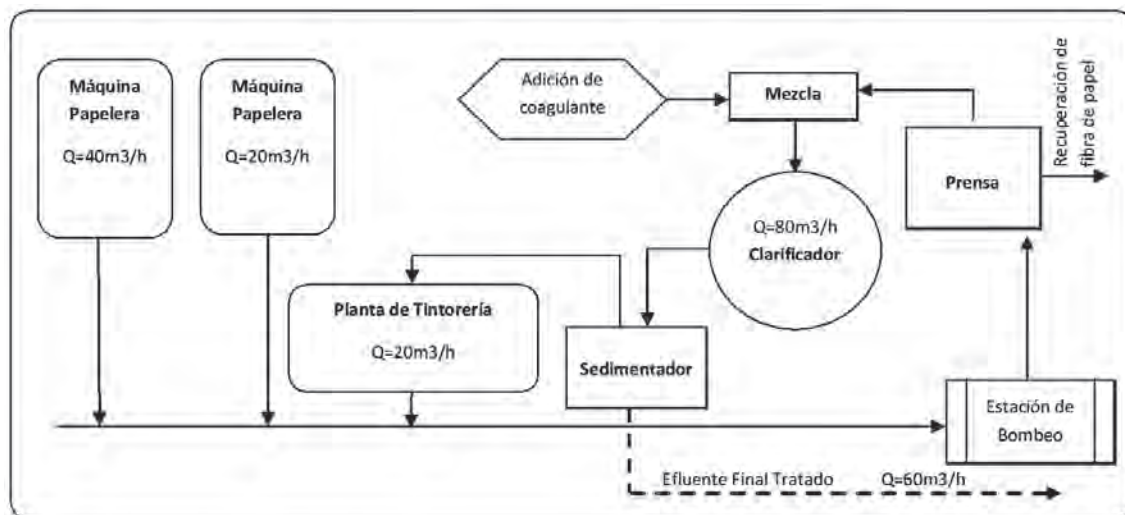


Figura 1 - Diagrama del Tratamiento Primario Clásico en Industria Papelera

La evaluación de una planta de tratamiento de aguas tiene múltiples fines (Cánepa 2004), en el Perú, Balboa y Fustamante (2003) realizaron una evaluación del comportamiento hidráulico de la PTAR de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) para conocer la eficiencia de la laguna facultativa, encontrando un tiempo de retención real de 69%, este resultado fue mayor al esperado. Los efluentes de la PTAR pueden servir para riego de áreas verdes.

**Tabla 1**  
Límites Máximos Permisibles para Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Parámetro	LMP para descarga en:		Unidad
	Agua superficial	Alcantarilla	
SST	100	1000	mg/L

La evaluación realizada a la planta de filtración rápida para tratamiento de agua potable de la ciudad de Moyobamba (San Martín) por Cánepa (1999) reporta que la remoción total de la turbiedad es sólo de 40 % siendo necesario la ampliación y modificación de la planta evaluada.

En Colombia, se hicieron evaluaciones de PTARs, Benavides (2006) propone mejorar la calidad de efluentes líquidos provenientes de un camal modificando el sistema de tratamiento primario el cual presentó deficiencias en el sistema de rejillas y mantenimiento.

Orozco (2005) evaluó el sistema de tratamiento biológico integrado para el tratamiento de aguas residuales del procesamiento del café, en México, obteniendo una remoción del 94 a 99 % de los contaminantes biológicos y de metales pesados, vertiendo efluentes “limpios”, recomendando esta PTAR integrada para industrias similares abundantes en su región.

El objetivo de esta investigación es determinar la velocidad de sedimentación de SST en aguas residuales de una planta de tratamiento primario de una industria papelera; con la cual se podrá determinar la superficie y altura mínima de las unidades de sedimentación para reducir la concentración de SST a 80 mg/L. (menores de 100mg/L.). Para comparar las condiciones de trabajo óptimos encontrados con los de una PTAR de una industria papelera en funcionamiento, y con esto formular acciones encaminadas al mejoramiento del sistema de sedimentación que pueda tener efluentes con concentraciones de SST aceptables (menor

que 100 mg/L.) evitando la contaminación ambiental y cumpliendo con la normatividad nacional correspondiente a este sector (DS-003-2002 PRODUCE).

## Materiales y métodos

### Lugar de ejecución

Los análisis de la muestra y los ensayos experimentales se realizaron en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura (FIA) de la Universidad Peruana Unión (UPeU). Las muestras de agua residual fueron recolectadas de una industria papelera en actividad.

### Materia prima e insumos

Se realizaron los ensayos con la muestra de agua residual (efluentes crudos) del proceso productivo de papel, antes de realizar la mezcla con el coagulante.

Como coagulantes para aumentar la velocidad de sedimentación de los SST, en los ensayos se utilizó *sulfato de aluminio*, en cristales con contenido de aluminio expresado como  $Al_2O_3$  al 17% *mínimo*.

### Equipos y materiales

Para la toma y transporte de muestras se utilizaron:

- Ocho Botellas de plástico (PVC) de 1 L y un cooler para mantener la temperatura, recomendada por EPA (2003).

Para caracterización inicial de la muestra se analizó:

- PH y temperatura con un Ph-metro marca Hanna Instruments y modelo HI 9025, y
- SST, utilizando papel filtro de fibra de vidrio, un crisol Gooch de 25 ml., una estufa marca Memment Modelo S 10, un desecador de vidrio, y una balanza analítica marca Ohaus modelo V264C; indicados en los Métodos estándares APHA (1992).

Para los ensayos de columna de sedimentación el método de Metcalf y Eddy (1995) requiere:

- Dos Probetas de plástico transparente de 1000 ml, dos pipetas de 10 ml, una balanza analítica marca Ohaus modelo V264C, un cronómetro marca Turner Sport.

Se registraron y procesaron los datos obtenidos en los ensayos de la prueba columna de sedimentación; se procesaron en el software estadístico STATISTICA

7.1, siendo necesario materiales de oficina y computadora personal.

### Métodos

Para la toma de muestras y el análisis de efluentes se siguieron los “Métodos para la Recolección y Análisis de Agua y Residuos” (EPA 2003), y los “Métodos Estándares para el Examen de Agua y aguas Residuales” (APHA 1992).

La prueba de columna de sedimentación se desarrolló con la metodología descrita por Rojas (2004). Los análisis de los resultados se realizaron siguiendo la teoría de Talgadre y Fich (citados por Metcalf y Eddy 1995).

### Variables

Para determinar la velocidad de sedimentación de las partículas (velocidad inicial), expresado en metros por segundo (m/s), se realizaron ensayos prueba columna de sedimentación, se tomaron en cuenta las variables:

- La dosis de coagulante, medido en gramos de *Sulfato de Aluminio*, y
- La concentración inicial de SST, medido en % de dilución de la muestra inicial.

Una vez determinada la velocidad de sedimentación de las partículas, se analizó los resultados de cada ensayo con el método de Talgadre y Fich, (citados por Metcalf y Eddy 1995) encontrando la velocidad de descenso de interface y el tiempo necesario de sedimentación de SST para llegar a determinada concentración, en el análisis de la curva velocidad y tiempo de sedimentación obtenidos en los ensayos de columna de sedimentación.

Con el tiempo necesario de sedimentación calculamos el área y la superficie necesarias para la sedimentación de las muestras (Moreno, 2010).

### Diseño experimental

Cada variable independiente presenta 3 niveles diferentes mostrados en la tabla 2, estas han sido distribuidas según el diseño factorial 3<sup>2</sup> (9 experimentos) más 3 puntos centrales realizando entonces 12 ensayos experimentales, en forma aleatoria, como se presenta en la tabla 3 (Matos, 2010).

**Tabla 2**

*Niveles de los factores de estudio*

Factor	Niveles		
	-1	0	+1
Dosis de Coagulante	Menor: 20 mg/L	Actual: 25 mg/L	Mayor: 30 mg/L
Concentración Inicial de SST	Mayor: 2480 mg/L	Intermedia: 1680 mg/L	Menor: 1240 mg/L

**Tabla 3**

*Distribución de ensayos del Diseño Factorial*

Número de ensayo	Dosis	Concentración inicial (SST)
1	-1	-1
2	0	-1
3	+1	-1
4	-1	0
5	0	0
6	+1	0
7	-1	+1
8	0	+1
9	+1	+1
10	0	0
11	0	0
12	0	0

### Resultados y discusión

La muestra de agua residual cruda presentó una concentración de SST de 2480 mg/L. los otros parámetros analizados exigidos por la norma se presentan en la tabla 4, comparados con los valores encontrados en el mismo lugar, por una consultara a la cual llamaremos “Company” el 2008.

**Tabla 4**

*Distribución de ensayos del Diseño Factorial*

Parámetro	Resultado 2010	Company 2008	Unidad
PH	7.1	7.7	-
Temperatura	23.8	19.1	°C
SST	2480	2758	mg/L
Aceites y grasas	-	20	mg/L

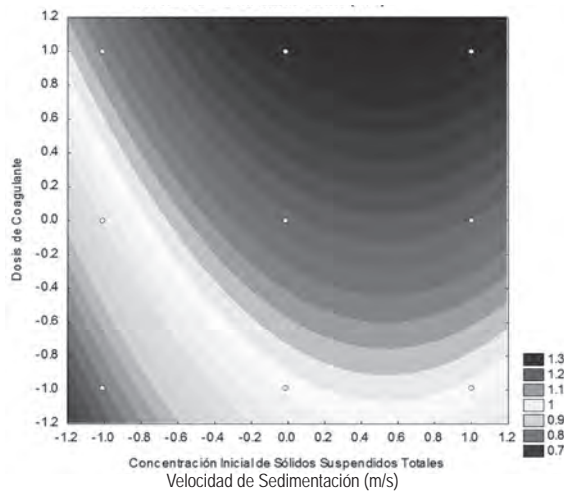
El análisis de varianza del diseño experimental se presenta en la tabla 5, que indica la influencia de los factores concentración inicial de SST (C.I.SST) y la Dosis de coagulante aplicado en cada ensayo.

**Tabla 5**  
*Análisis de Varianza*

Factor	SS	df	Ms	F	P
Concentración Inicial SST	0.100870	2	0.050435	13.27374	0.004150
Dosis de coagulante	0.149788	2	0.074894	19.71107	0.001331
Error	0.026597	7	0.003800		
Total SS	0.280961	11			

En la figura 2 muestra la superficie de respuesta de la velocidad de sedimentación promedio en base a la concentración inicial de SST y la dosis de coagulante.

Se encontró que para mejorar el tiempo promedio de sedimentación, variable respuesta, se puede y disminuir la concentración de SST antes del tratamiento de aguas residuales en unidades de sedimentación, de la figura 2 se afirma que a menor concentración de SST en la muestra, se requiere menor dosis de Coagulante para encontrar la misma velocidad; y cuando la concentración de SST en el efluente es mayor y con la dosis actual de coagulante la velocidad de sedimentación será menor.



*Figura 2.* Superficie de Respuesta de la Velocidad promedio de Sedimentación de SST.

Por otra parte, en la tabla 6 muestra la velocidad de descenso de Interface de SST en la sedimentación, encontrada para cada ensayo, donde también se presentan los cálculos del tiempo de sedimentación, el área superficial y profundidad mínima de las unidades de sedimentación, necesarios para que la concentración de SST del efluente sea removido hasta 80 mg/L, el área superficial y profundidad mínima de las unidades de Sedimentación.

Con los resultados de la tabla 6, y la figura 2; se puede afirmar que la mejor velocidad de sedimentación se obtiene con una concentración inicial de sólidos totales suspendidos de 1680 mg/L, y la mejor dosis de coagulante es de 20 a 25 mg/L.

El área superficial mínima para lograr remover los SST hasta 80 mg/L. es de 22.2 m<sup>2</sup> con una profundidad de 3.69 m y tiempo de retención de 0.11 horas (6.6 min.), resultados del ensayo 6, ensayo que alcanzó velocidad de sedimentación de 1.31 m/seg obtenidos la muestra con una concentración inicial de 1680 mg/L de SST adicionada con 25 mg/L de coagulante.

Ensayo N°	Velocidad de sedimentación Interface de SST (m/seg)	Tiempo de sedimentación Necesario (horas)	Área Superficial Mínima (m <sup>2</sup> )	Profundidad Mínima (m)
1	0.819	0.23	51.852	1.54
2	0.981	0.22	48.148	1.66
3	1.060	0.22	48.148	1.66
4	1.801	0.12	25.926	3.09
5	1.124	0.13	29.63	2.70
6	1.310	0.11	22.222	3.60
7	0.918	0.28	62.963	1.27
8	1.209	0.21	44.444	1.80
9	1.396	0.12	25.926	3.09
10	1.151	0.13	29.63	2.70
11	1.155	0.15	33.333	2.40
12	1.175	0.13	29.63	2.70

*Figura 2.* Superficie de Respuesta de la Velocidad promedio de Sedimentación de SST

Pérez (1984) indica que la velocidad encontrada ésta en el rango de 0.2 a 70 m/seg, correspondiente a muestras de agua residual donde la sedimentación de SST está influenciada por el diámetro, peso y forma de las partículas. Metcalf y Eddy (1995) añaden que por las características de sedimentación este tipo de partículas son de sedimentación discreta y floculenta, y una menor parte pertenecen a sedimentación retardada y de compresión.

Para esto se presentan opciones con los resultados en los ensayos 5 y 6, que por menor profundidad en las unidades de sedimentación, se elegiría el ensayo 6, con profundidad mínima de 2.7 m, que haría mas fácil un posible aprovechamiento de lodos. Si se trata de ahorrar costos al máximo, la adición menor de coagulantes del ensayo 4 es la mejor opción, con un área de 25.926 m<sup>2</sup> y profundidad de 3.09 m. como mínimo en un tiempo de retención de 0.12 horas (7.2 min.).



Según Metcalf y Eddy (1995) los resultados indican que en la sedimentación encontrada interfieren los fenómenos de sedimentación de partículas discretas y floculentas, que deben ser removidas en tanques de sedimentación primaria, respaldando los resultados y el dimensionamiento de sus unidades.

### Conclusiones

La concentración inicial de SST que actualmente presenta la muestra de agua residual con la adición actual de dosis de coagulante, presentado en el ensayo 2, presenta una velocidad de 0.981 m/seg, un tiempo de sedimentación (tiempo de retención) de 0.22 horas (13.2 min.) en una unidad de sedimentación con superficie mínima de 48.148 m<sup>2</sup> y profundidad de 1.66 m.

Estas características mínimas tienen que ser cumplidas para que teóricamente, el agua residual de esta industria obtenga una concentración de SST menores a 100 mg/L en los efluentes de una planta primaria de tratamiento de agua residual.

La velocidad de sedimentación actual 0.981 m/s, causa arrastre del material sedimentable (Moreno, 2010), lo cual es bueno, obteniendo mejor remoción de SST en el tratamiento, pero con velocidades mayores Metcalf y Eddy (1995) indican que se podrá incluso remover contaminantes químicos de gran tamaño.

### Recomendaciones

Se recomienda realizar este tipo de investigaciones para un diseño, o mejoramiento de una planta de tratamiento primario de aguas residuales provenientes de industrias papeleras.

Se recomienda repetir este ensayo con muestras de la misma industria, para comparar los resultados obtenidos en esta investigación.

Pérez (1984) recomienda realizar plantas piloto, antes de unidades de sedimentación en plantas de tratamiento de aguas, para consolidar los diseños teóricos.

### Referencias

- APHA (American Public Health Association). 1992. "Métodos Estándar para el Examen de Agua y Aguas Residuales" (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater). Decimo Octava Edición. Washington DC. EEUU.
- Balboa M y Fustamante N. 2003. Evaluación del comportamiento hidráulico de la segunda laguna facultativa de la planta de tratamiento de aguas residuales de la UNITRAR, utilizando trazadores radiactivos. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de ingeniería ambiental - Instituto Peruano de energía nuclear. Recuperado de [www.cienciaperu.org/eci2004v/libroderesumenes.pdf](http://www.cienciaperu.org/eci2004v/libroderesumenes.pdf)
- Benavides, I. 2006. Evaluación de la planta de tratamiento de aguas residuales de la central de sacrificio de Túquerres (Nariño). [Tesis en línea]. [Tesis de Ingeniero ambiental]. Nariño: Universidad Nacional de Colombia, sede Mañizales. Especialización en Ingeniería Ambiental, Área Sanitaria. 50 pp. Recuperado de <http://www.digital.unal.edu.co/dspace/bitstream/10245/1042/1/lilianadel pilarbenavidesbenavides.2006.pdf>
- Cánepa L. 2005. Evaluación de plantas de tratamiento de aguas. CEPIS/ OPS-OMS. Manual de Evaluación de plantas de tratamiento de Aguas. Manual III: 1 – 283 pp. Recuperado de <http://www.cepis.ops-oms.org/metaiah/search.php> OPS/ CEPIS/PUB/04.112.
- Corrochano A. Marzo 2006. La Industria Papelera "Se Moja". Acuerdo entre el ministerio y AS-PAPEL. Madrid. Revista Ambiental: la Revista del Medio Ambiente. 53: 25-31 pp. Recuperado de [http://www.mma.es/secciones/biblioteca\\_publicacion/publicaciones/revista\\_ambienta/n53/pdf/25aspapel532006.pdf](http://www.mma.es/secciones/biblioteca_publicacion/publicaciones/revista_ambienta/n53/pdf/25aspapel532006.pdf) ISSN 15779491
- EPA (Environmental Protection Agency). 2003. "Métodos para la Recolección y Análisis de Agua y Residuos" (Methods for Collection and Analysis of Water and Wastes). Ohio. EE UU. EPA-600/4-79-0120
- Maldonado J. 2002. Sistema de Tratamiento Para Aguas Residuales Industriales en Mataderos. [Artículo científico en línea]. Universidad de Pamplona (Colombia). Revista Ambiental: Agua, Aire y Suelo: 43-74 pp. Recuperado de [http://200.31.20.155/unipamplona/portaIG/home\\_10/recursos/general/pag\\_contenido/publicaciones/revista\\_ambiental/06082010/rev\\_ambiental\\_vol1\\_num1\\_art4.pdf](http://200.31.20.155/unipamplona/portaIG/home_10/recursos/general/pag_contenido/publicaciones/revista_ambiental/06082010/rev_ambiental_vol1_num1_art4.pdf)
- Matos A. 2010. Clase magistral UPEU, Ingeniería Ambiental. Lima Perú.
- Metcalf y Eddy. 1995. *Ingeniería de Aguas Residuales*. Madrid: Editorial McGraw-Hill. 1485 pp.
- Ministerio de la Producción. Octubre 2002. D.S. 003-2002-PRODUCE. Aprueban Límites Máximos Permisibles y Valores Referenciales para las activi-

- dades industriales de cemento, cerveza, curtiembre y papel. Publicado en el diario El Peruano. Lima. Recuperado de [http://www.minam.gob.pe/dmdocuments/DS\\_003-2002-PRO-DUCE.pdf](http://www.minam.gob.pe/dmdocuments/DS_003-2002-PRO-DUCE.pdf)
- Moreno J. 2010. Clase magistral UPeU, Ingeniería Ambiental. Lima – Perú.
- Orozco C. 2005. Evaluación de una planta piloto de tratamiento de aguas residuales del procesamiento del café: características químicas. *Revista Higiene y Salud Ambiental*. 5: 123 – 1313. Recuperado de [www.ingenieriaambiental.com/4014/higsand1.pdf](http://www.ingenieriaambiental.com/4014/higsand1.pdf)
- Pérez J. 1984. Sedimentación. [Manual en línea]. CEPIS/ OPS-OMS. Manual de plantas de tratamiento de Aguas. Manual I. Capítulo 3: 1 – 56. Recuperado de <http://www.cepis.ops-oms.org/OPS/CEPIS/PUB/04.112>.
- Reynolds K. 2002. Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica: Identificación del problema. *Revista De la Llave*. 5: 1-4 Recuperado de [www.aguala.tinoamerica.com/docs/pdf/DeLaLaveSepOct02.pdf](http://www.aguala.tinoamerica.com/docs/pdf/DeLaLaveSepOct02.pdf) >
- Rojas R. 2002. *Sistemas de Tratamiento de aguas residuales*. CEPIS/OPS-OMS. Curso Internacional: Gestión Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales. 19 pp. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/e/fulltext/gestion/aguare-si.pdf> > OPS/CEPIS/PUB/04.112.

---

**Revista de Investigación Universitaria**

Editor: Dr. Rodrigo Alfredo Matos Chamorro  
Coeditora: Dra. Mayela Cajachagua Castro

**Diseño y Diagramación de interior:** Doris Sudario Sobrado  
Corrección: Samuel Lostaunau Castro

Impreso en la Editorial Unión, Centro de Aplicación de la  
Universidad Peruana Unión  
Km 19 Carretera Central Lima – Perú  
Teléfono: (01) 618-6300 Fax: (01) 618-6339

Copyright® Universidad Peruana Unión  
Primera edición  
Tiraje: 500 ejemplares  
ISSN: 2312-4253 (Versión impresa)  
ISSN: 2078-4015 (Versión digital)

JOB 20334-16 UNIÓN®  
e-mail: [prerensa@imprensaunion.com](mailto:prerensa@imprensaunion.com)  
Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N.º 2014-04809

Impreso en el Perú  
Printed in Peru