

ESTRATEGIAS DE MEJORA CONTINUA EN PLANTAS POTABILIZADORAS VENEZOLANAS

MARÍA VIRGINIA NAJUL¹, HENRY A. BLANCO S²

Planta Experimental de Tratamiento de Aguas, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela

¹ e-mail: mvnajul@gmail.com, ² e-mail: henryalbertob@gmail.com

Recibido: febrero 2013

Recibido en forma final revisado: diciembre 2013

RESUMEN

El deterioro de las plantas potabilizadoras incide negativamente en la calidad del agua producida y constituye un riesgo para la salud de los consumidores. Los diagnósticos comúnmente reportan diseños inapropiados, equipos deteriorados, bajas velocidades de lavado de filtros, dosificación empírica de sustancias químicas, ausencia de política de mantenimiento, deficiente preparación del personal, entre otros. Sobre la base de los principios de Gestión de la Calidad, en el presente trabajo se proponen estrategias de mejora continua, en el marco de las buenas prácticas, apoyado en la experiencia recopilada en cuatro plantas potabilizadoras, representativas de los arreglos existentes en Venezuela. A partir del análisis detallado del diseño, operación y control, se determinaron los parámetros que fueron comparados con los recomendados en la literatura; se identificaron las prácticas comunes, relativas a variables estructurales, funcionales/operacionales y organizacionales, y se propusieron medidas que incidieran positivamente en su eficiencia y eficacia. La integración de las metodologías de evaluación utilizadas, constituye un instrumento de apoyo para el análisis sistematizado de las plantas potabilizadoras, que puede ser replicado en otros sistemas y que resulta requisito indispensable para la determinación de puntos críticos de control en las metodologías de Análisis de Peligros y Puntos Críticos (HACCP por sus siglas en inglés) y Planes de seguridad del Agua (PSA). Esta experiencia demuestra que los cambios propuestos, algunos elementales, pueden aplicarse en el corto y mediano plazo, a bajo costo, especialmente los asociados con las variables funcionales/operacionales y organizacionales y constituyen la solución a muchos de los grandes problemas en las plantas evaluadas.

Palabras clave: Plantas potabilizadoras, Buenas prácticas, Herramientas de evaluación, Evaluación de plantas potabilizadoras, Mejora continua.

CONTINUOUS IMPROVEMENT STRATEGIES IN VENEZUELAN TREATMENT PLANTS

ABSTRACT

The deterioration of water treatment plants adversely affects the quality of water produced and constitutes a risk to consumer health. In general, diagnoses report inappropriate designs, damaged equipments, low speed filter washing, empirical chemical dosing, lack of maintenance policy, poor staff training, among others causes. Based on the principles of Quality Management, this work proposes continuous improvement strategies within the framework of good practice, supported by the experience gathered in four water treatment plants, representing existing layouts in Venezuela. From the detailed analysis of the design, operation and control, the parameters were compared with those recommended in the literature. Common practices relating to functional/operational and organizational structural variables were identified, and procedures having a positive impact in its efficiency and effectiveness were proposed. The integration of the assessment methodologies used, are considered as a support tool for the systematic analysis of the treatment plants, which can be extended in other systems and is essential for the determination of critical control points in Hazard Analysis and Critical Control points (HACCP) methodologies and Water Safety Plans (WSP) requirement. This experience shows that the proposed changes, some simple, can be applied in the short and medium term, at low cost, especially those related to the functional / operational and organizational variables and are the solution to many of the major problems in the plants evaluated.

Keywords: Water treatment plants, Best practices, Assessment tools, Evaluation of water treatment plants, continuous improvement.

INTRODUCCION

Una planta potabilizadora puede asimilarse a cualquier proceso productivo, en el cual el agua cruda o agua proveniente de alguna fuente de abastecimiento es la materia prima que se transforma a través de un conjunto de unidades, donde se llevan a cabo operaciones y procesos con la incorporación de sustancias químicas, para la elaboración de un producto: agua potable.

El deterioro de la calidad de la materia prima o de alguna de las unidades que la conforman, trae como consecuencia ineficacia por incumplimiento de los requerimientos de calidad del agua potable o ineficiencia del proceso, por la necesidad de incrementar los insumos para cumplirlos.

La experiencia de los autores en las actividades de inspección y evaluación de plantas potabilizadoras venezolanas lo confirma, así como trabajos realizados tanto en Venezuela (Amundaray *et al.* 1990; García & Tortolano, 1991; Bracho *et al.* 2012), como en otros países latinoamericanos (Pantaleão *et al.* 2012; Cobucci *et al.* 2006; Bastos *et al.* 2006; Milani & Gomes, 2008).

Entre los principales aspectos reportados en los diagnósticos realizados desde las décadas finales del siglo pasado hasta el presente, destacan los diseños no apropiados de acuerdo con la calidad del agua cruda o discrepancias entre lo diseñado y lo construido; la inadecuada ubicación de los puntos de inyección de sustancias químicas; los equipos de agitación deteriorados o fuera de servicio; los problemas hidráulicos en unidades de sedimentación, causados por la operación con caudales mayores a los de diseño, pantallas de entrada deterioradas, vertederos desnivelados; la dosificación de sustancias químicas en forma empírica, sin realizar pruebas de jarro; las bajas velocidades de lavado de filtros y en consecuencia baja expansión del lecho filtrante; la escasa sistematización de los datos recopilados, lo que dificulta evaluar el desempeño; la inexistencia de una política de planificación en relación al mantenimiento de los sistemas de tratamiento; la deficiente preparación técnica y ausencia de entrenamiento del personal. (Amundaray *et al.* 1990; García & Tortolano, 1991; Bracho *et al.* 2012; Pantaleão *et al.* 2012, Cobucci *et al.* 2006; Bastos *et al.* 2006; Milani & Gomes, 2008).

Cuando el deterioro de las unidades llega a niveles extremos, se requiere tomar decisiones coyunturales que obligan a una rehabilitación total, lo que implica una elevada inversión de recursos, así como la reducción total o parcial de la producción, lo que obviamente afecta a la población abastecida por la planta. Declaraciones del Ministro del

Ambiente (Telesur, 2012) tales como: “El Gobierno de Venezuela aprobó el financiamiento de 149 millones de dólares para mejorar **todas** las plantas potabilizadoras de agua del país, que será otorgado por la Corporación Andina de Fomento (CAF)”, reflejan tal aseveración.

Si se realizara un abordaje sistemático que permitiera la determinación de las variables de mayor impacto en el proceso, su seguimiento en forma constante y la elaboración de planes de mejora continua, seguramente no habría necesidad de paralizar el servicio e invertir recursos de forma excesiva.

La evaluación y el ajuste de una planta potabilizadora comprenden un análisis detallado del funcionamiento y comportamiento hidráulico de cada una de las partes que físicamente la conforman, de su eficiencia y de la forma en que está siendo operada, mantenida y administrada (CEPIS/OPS, 2005). Como resultado de esta evaluación, se obtiene información valiosa para determinar las condiciones que mejoren la eficiencia del sistema, su optimización o ampliación. Es una herramienta importante tanto para el supervisor de una planta como para el proyectista que permite evaluar la planta durante su puesta en marcha, calibrar las unidades e identificar defectos de cualquier tipo que puedan afectar la eficiencia y darles solución inmediata. Considerando que el producto de una planta potabilizadora es agua potable y conocido que el objetivo de la evaluación de la calidad del agua es garantizar la salud y bienestar de los consumidores (Sottolano *et al.* 2004), la identificación de los factores de riesgo adquiere especial relevancia.

Autores como Iriburo *et al.* (2012) y Torres-Lozada *et al.* (2012) introducen la aplicación de los Planes de Seguridad del Agua (PSA), promovidos en la última versión de las Guías de la Organización Mundial de la Salud - OMS (2011), a los sistemas de abastecimiento de poblaciones uruguaya y colombiana, respectivamente. En el primer documento se redactó la metodología para determinación de puntos críticos de control (PCC), así como las fichas de Evaluación de Subsistemas y de Gestión para los distintos PCC y estos autores decidieron trabajar en forma integrada en la gestión de riesgos, los aspectos de calidad y cantidad de agua a distribuir. Mientras que en el segundo trabajo se identificaron 38 eventos peligrosos clasificados en los diferentes componentes del Sistema de Distribución de Agua Potable (redes, tanques de almacenamiento y estaciones de bombeo), así como 11 eventos peligrosos asociados con aspectos organizacionales, financieros, entre otros, de la empresa y a otros factores externos o situaciones de emergencia que podrían comprometer la calidad y cantidad del agua y la continuidad del servicio.

En Venezuela, Acosta *et al.* (2008) propusieron usar la trazabilidad como herramienta de gestión de la calidad en plantas potabilizadoras, aplicaron la metodología de Análisis de Peligros y Puntos Críticos (HACCP) para garantizar el control continuo de la calidad del agua potable en una planta potabilizadora convencional, y concluyeron que las situaciones peligrosas que representaban mayor riesgo para la calidad del agua potable eran la desinfección no efectiva, las variaciones bruscas de caudal del agua cruda y las fallas de dosificación de coagulante.

El factor común en estos estudios es la sistematización de la información, aplicación de sistemas de medición que permiten hacer el seguimiento en forma continua y la incorporación del personal encargado de la operación en la elaboración de planes de mejora.

Considerando la planta potabilizadora como un proceso productivo, tal como se mencionó anteriormente, su gestión está básicamente definida en términos económicos, tecnológicos (diseño, operación y mantenimiento) y organizacionales (Pirela, 1996), de modo que las alteraciones que ocurran en alguno de ellos dificultan la producción de agua apta para consumo humano, superando los valores máximos permitidos en las normas sanitarias de calidad del agua potable (GORV, 1998).

La mejora continua, incluida en los principios de Gestión de la Calidad, definidos en las Normas ISO 9000:2000 e ISO 9004:2000 de Sistemas de Gestión de la Calidad, es una herramienta aplicable a cualquier proceso de manufactura o servicio, que permite el crecimiento y optimización de factores importantes de la empresa, que mejoran su rendimiento en forma significativa (COVENIN, 2000).

Como consecuencia de su aplicación, se tendrá:

1. Un proceso documentado que permite que el personal relacionado con el proceso lo conozca y lo aplique de la misma manera cada vez.
2. La adquisición de algún tipo de sistema de medición que permita determinar el logro de los resultados esperados (indicadores de gestión).
3. La participación del personal relacionado con el proceso.

Más recientemente, la serie de Normas ISO 24500 se orientan a proporcionar guías de procedimiento para las actividades relacionadas con los servicios de agua potable y aguas residuales. La serie completa se compone de las siguientes normas: ISO 24510: Directrices para la evaluación y la mejora del servicio a los usuarios; ISO 24511: Directrices para la gestión de las entidades prestadoras de servicios

de agua residual y para la evaluación de los servicios de agua residual; ISO 24512: Directrices para la gestión de las entidades prestadoras de servicios de agua potable y para la evaluación de los servicios de agua potable (Drault, 2008). La aplicación de las Normas ISO 24512 incluye los siguientes pasos: Identificar los componentes físicos y de gestión; Definir los objetivos para el servicio; Gestionar y operar la entidad prestadora de servicios aplicando las directrices para la gestión de las entidades prestadoras de servicios de agua; Definir criterios de evaluación; Evaluar indicadores de desempeño vs objetivos.

En Venezuela se conoce la existencia de 144 plantas potabilizadoras (Hidroven, 2007), a las cuales se les realiza “tratamiento completo”, coagulación-floculación, sedimentación, filtración y desinfección.

A pesar de que sólo el 25% de ellas tiene configuración convencional, en donde los procesos mencionados se realizan en unidades de sección rectangular, consecutivas e independientes, procesan el 65% de las aguas que reciben tratamiento. El resto de las plantas son modulares, compactas o no convencionales, en las cuales todos o parte de los procesos mencionados, se realizan en unidades cilíndricas y concéntricas. Las Figuras 1 y 2 muestran esquemas típicos de estas plantas convencionales y modulares.

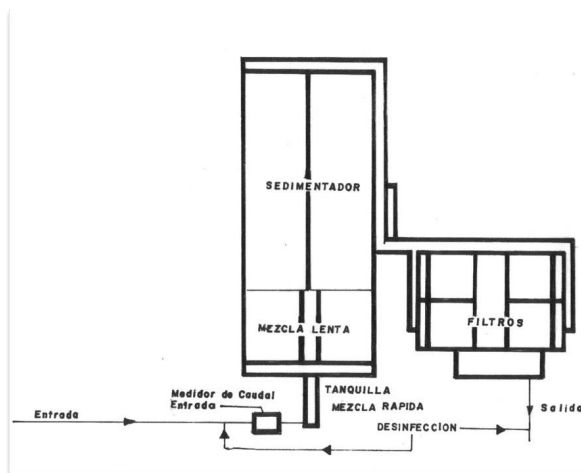


Figura 1. Esquema de una planta convencional (Adaptado de Amundaray *et al.* 1990)

La Tabla 1 muestra el resultado del procesamiento de la información suministrada por HIDROVEN (2007), que permite conocer el predominio de las plantas convencionales en los grupos con capacidad mayor a 3000 l/s y aquellas con capacidad entre 1000 y 3000 l/s, tratando más del 80% y 55% del caudal total incluido en el respectivo renglón; mientras que en las que tratan entre 300 y 1000 l/s y menos que 300 l/s, predomina el arreglo no convencional.

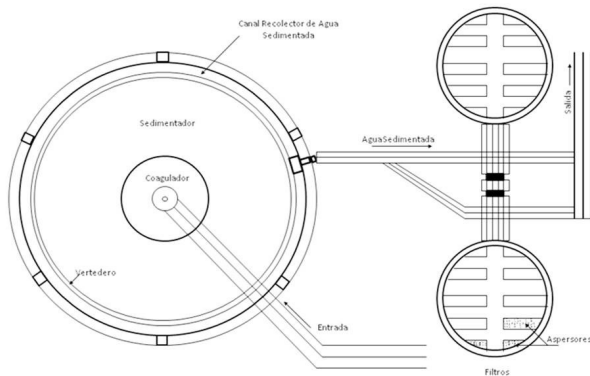


Figura 2. Esquema de una planta modular
(Adaptado de Amundaray et al. 1990)

Tabla 1. Distribución porcentual del agua tratada en plantas convencionales y no convencionales en función de su capacidad

Tipo de Planta	Capacidad (l/s)			
	> 3000	1000 - 3000	300 - 1000	< 300
Convencional	80,6%	55,8%	50,9%	7,1%
No convencional	19,4%	44,2%	49,1%	92,9%

Con el propósito de apoyar la eficacia y eficiencia de los procesos de producción de agua potable en las plantas potabilizadoras, en este trabajo se proponen estrategias de mejora continua, en el marco de las buenas prácticas, para el corto y mediano plazo, sustentadas en la experiencia recopilada en plantas potabilizadoras venezolanas, típicas de los arreglos existentes en Venezuela.

MÉTODO

Con el propósito de buscar la representatividad del estudio y su posibilidad de abarcar la mayor parte de las plantas existentes en el país, se seleccionaron cuatro (4) casos que incluyen dos (2) plantas convencionales cuyos caudales de diseño son de 4500 l/s (Acosta, 2008) y 2200 l/s (Ayala, 2009), y dos plantas no convencionales, tipo modular, con caudales de diseño: 150 l/s (Chourio & Cabrera, 2012) y 400 l/s (Alayón & Randelli, 2011). En ellas se identificaron prácticas comunes en el diseño, operación y control, para luego proponer medidas que incidieran positivamente en su eficiencia y eficacia, verificables mediante el registro de las variables de mayor impacto en el proceso, seguimiento y control.

A continuación se integran las metodologías utilizadas en los cuatro estudios, lo que permite proponer un marco metodológico para el análisis, organizado en tres etapas:

Etapa 1. Identificación de parámetros de diseño, operación y control

Para ello, se realizaron las siguientes actividades:

- Revisión de memorias descriptivas y/o fichas técnicas de las plantas: a partir de ello se obtiene la descripción detallada de cada unidad de tratamiento, así como los principios que sustentan su funcionamiento, de acuerdo con las condiciones originales del proyecto (HIDROVEN, 2012).
- Reconocimiento de las instalaciones: mediante observación directa y medición de las dimensiones de las unidades existentes.
- Cálculo de los parámetros de diseño: utilizando las dimensiones reales y las ecuaciones típicas de diseño de las unidades que constituyen cada planta potabilizadora: volumen de las unidades, tiempos de retención, gradientes de velocidad, tasas de desbordamiento superficial, carga unitaria sobre vertederos, velocidad de filtración, tasa de filtración, tasa de lavado, expansión y granulometría de lechos filtrantes (CEPIS/OPS, 2005; Arboleda, 2000; Romero, 1999; AWWA-ASCE, 2004).
- Comparación entre los parámetros característicos en las plantas estudiadas y los recomendados en la literatura (CEPIS/OPS, 2005; Arboleda, 2000; Romero, 1999; AWWA-ASCE, 2004).

Etapa 2. Caracterización del funcionamiento

- Análisis de caudal y calidad del agua: se procesó la información existente en la planta de al menos tres años, constituida por los valores de caudal y características físico-químicas del agua cruda, sedimentada y tratada. Se realizaron gráficos para su interpretación e histogramas de frecuencia para caudales de operación.
- Análisis de la dosificación de sustancias químicas: se procesó la información existente de consumo de sustancias químicas, se realizaron ensayos de pruebas de jarro adaptados a las condiciones de la planta; es decir, ajustando las velocidades de agitación para reproducir los gradientes de velocidad y determinar las dosis óptimas de coagulante. Para ello se utilizaron los equipos de prueba de jarros existentes en cada planta (Jar

Test Marca Phipps&Bird de 6 puestos con velocidad de agitación regulable), en algunos casos con recipientes cilíndricos de 1 litro de capacidad y en otros con recipientes de sección cuadrada de 2 litros de capacidad. Igualmente se realizaron ensayos de demanda de cloro, siguiendo la metodología estándar (APHA *et al.* 2000)

- Determinación del comportamiento hidráulico: se utilizó la técnica de trazadores, empleando cloruro de sodio (sal común) como trazador mediante inyección instantánea y el análisis de resultados a través del método de Wolf-Resnick que, apoyado con los resultados de la curva C, permitieron determinar los parámetros hidráulicos para caracterizar los flujos predominantes en las unidades de mezcla y sedimentación (CEPIS/OPS, 2005).
- Determinación de los parámetros característicos de la operación de dosificadores, unidades de filtración: tasas de filtración, tasas de lavado, expansión de lecho filtrante durante el lavado, aplicando métodos convencionales (CEPIS/OPS, 2005), así como de las unidades de desinfección: funcionamiento de evaporadores, cloradores y eficiencia de la cloración mediante el cálculo del parámetro $C \cdot t$. (CEPIS/OPS, 2005, Arboleda, 2000).
- Comparación entre los parámetros de operación determinados en los ensayos específicos con las dosis aplicadas en planta: para ello se realizaron histogramas de frecuencia y gráficos tipo “cotizaciones” de parámetros de calidad, en la mayoría de los casos, con datos de no menos de tres (3) años, que permitieron visibilizar el comportamiento temporal de estas plantas potabilizadoras.
- Identificación de prácticas operacionales: mediante observación directa, orientados con las Buenas Prácticas Operacionales
- Identificación de las principales desviaciones que inciden en el buen funcionamiento de la planta, con respecto a lo recomendado en la literatura, en el marco de las buenas prácticas.

Etapas 3. Proposición de medidas de mejora

- Organización de la información: para ello se diseñaron tablas o cuadros comparativos, destacando las prácticas comúnmente observadas, las consecuencias indeseables y las propuestas de mejora, agrupadas según su incidencia en aspectos estructurales, operacionales/funcionales y organizacionales.

- Jerarquización de las medidas propuestas: los criterios utilizados fueron:
 - o importancia de la medida: prioritaria o deseable, según ejerzan cambio directo en la calidad del agua producida,
 - o tiempo requerido para la ejecución: corto, mediano y largo plazo,
 - o costos: considerados cualitativamente; alto -grandes inversiones de dinero de manera puntual o continua, medios -inversiones puntuales y bajos -asociada con modificaciones de conductas del personal sin mayor inversión.

RESULTADOS

La Tabla 2 resume los parámetros de diseño característicos de las plantas estudiadas, calculados y comparados con los recomendados en la literatura.

En términos generales, los caudales de operación difieren entre 10% - 40% por debajo del caudal de diseño, excepto en la planta III, en la cual el caudal de operación supera hasta un 30% el de diseño. En el primer caso, las causas que señalan los operadores son variadas: baja capacidad de la fuente de abastecimiento, incapacidad de alcanzar los niveles de calidad deseados por limitaciones de la planta; pero, en definitiva, la producción de agua potable es menor a la esperada. En el segundo caso, la planta opera por encima de su capacidad, lo que tiene consecuencias en la calidad del agua producida.

Con el apoyo de los histogramas de frecuencia, se determinó el caudal más frecuente de entrada y salida, así como las importantes diferencias entre ellas, que pudieran tener origen en mediciones erradas (por defecto o ausencia de dispositivos de medición) o por pérdidas de agua en la planta (pases de válvula, elevada frecuencia de lavado de filtros). La Figura 3 permite visibilizar la experiencia en la planta III, en la cual el caudal más frecuente de entrada se encuentra en el intervalo 550- 600 l/s, mientras que el de salida más frecuente está entre 450 – 500 l/s.

Observando los parámetros, calculados tanto para el caudal de diseño como para el caudal de operación más frecuente, las unidades de mezcla rápida y lenta en los cuatro casos estudiados, se encuentran en el intervalo de valores recomendados en la literatura, excepto en la planta II, en la cual los valores de gradiente de velocidad en la mezcla lenta son muy inferiores. En el caso de la planta IV, la agitación rápida se da tanto en la tubería de entrada como en el cilindro interior de la unidad.

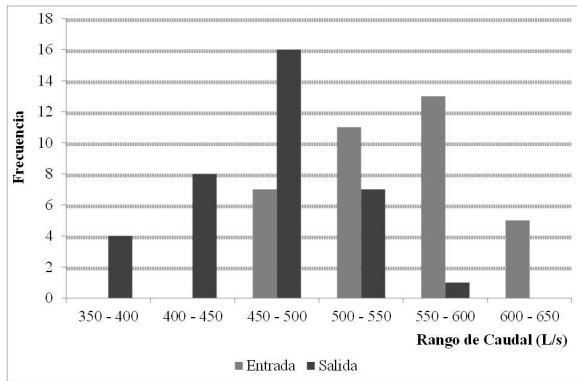


Figura 3. Histograma de frecuencia de caudal: Planta III

Las unidades de sedimentación operan con tiempos de retención en el extremo inferior o muy por debajo del intervalo recomendado, asociado con tasas de

desbordamiento superficial en el extremo superior o muy superiores a los valores recomendados, como en el caso de las plantas I y III.

Los filtros operan con tasas de filtración relativamente bajas aunque dentro del intervalo recomendado, excepto la planta III que, como se mencionó anteriormente, opera con un caudal superior al de diseño y el medio filtrante es arena, para el cual el intervalo de tasas de filtración es menor que el de medios mixtos.

Ello implica que, independientemente del estado actual de las instalaciones, existen factores estructurales que deben afectar el funcionamiento de la planta, específicamente la calidad del agua de salida de los sedimentadores, por los valores extremos en las tasas de desbordamiento superficial, lo que incide negativamente en las carreras de filtración.

Tabla 2. Resumen de parámetros de diseño característicos de las plantas estudiadas

Planta Potabilizadora	I - Convencional >3000 l/s		II - Convencional 1000 – 3000 l/s	III - No Convencional 300 – 1000 l/s	IV - No Convencional < 300 l/s
Aspecto					
Caudal de diseño (Q_{dis}) y operación más frecuente (Q_{op})	Q_{dis} : 4300 l/s Q_{op} : 3700 - 4100 l/s Conformada por dos plantas: A y B		Q_{dis} : 2200 l/s Q_{op} : 1300 -1400 l/s	Q_{dis} : 400 l/s Q_{op} : 500 -600 l/s	Q_{dis} : 150 l/s Q_{op} : 120 -130 l/s
Breve descripción de la planta potabilizadora Número entre paréntesis indica el número de cámaras en cada unidad	Planta A. MR (2); ML (2) con agitación mecánica. S (2) de sección cuadrada, flujo horizontal con barrelos. F (6) mixtos arena-antracita	Planta B. MR (1, con 3 agitadores); ML (3) con agitación mecánica. S (3) de flujo horizontal con barrelos. F (12) mixtos arena-antracita	MR (1, con 4 agitadores); ML (3) con agitación mecánica. S (3) de flujo horizontal con barrelos. F (8) mixtos arena-antracita	Acelator tipo "IS". MR y ML con agitación mecánica. MR, ML y S (2 módulos) en unidades concéntricas, de sección cilíndrica. S de flujo ascendente y manto de lodo. Filtros (6) de arena	MR y ML con agitación hidráulica. MR. ML y S (1 módulo) concéntrico, de sección cuadrada. S de flujo ascendente. F (4) mixtos arena-antracita
Mezcla Rápida Tiempo retención Θ (s) (20 – 180) Gradiente G (s^{-1}) (400 – 3000)	Θ_{dis} : 30 Θ_{op} : 37 G_{dis} : ND G_{op} : ND	Θ_{dis} : 21 Θ_{op} : 23 G_{dis} : 600 G_{op} : 482	Θ_{dis} : 15 Θ_{op} : 24 G_{dis} : 700 G_{op} : 703	Θ_{dis} : 132 Θ_{op} : 96 G_{dis} : 148 G_{op} : 247	Θ_{dis} : 69 Θ_{op} : 86 G_{dis} : 140-800 G_{op} : 139-579
Mezcla Lenta Tiempo retención: Θ (min) (10 – 60) Gradiente: G(s^{-1}) (10 – 100)	Θ_{dis} : 25 Θ_{op} : 30 G_{dis} : ND G_{op} : ND	Θ_{dis} : 23 Θ_{op} : 26 G_{dis} : ND G_{op} : 24	Θ_{dis} : 20 Θ_{op} : 29-43 G_{dis} : 2,3-9,4 G_{op} : 1,7-9,4	No aplica porque este proceso forma parte del ACCELATOR tipo "IS"	Θ_{dis} : 12 Θ_{op} : 14 G_{dis} : 86 G_{op} : 61
Sedimentación Tiempo retención: Θ (2 – 4 h) Tasa de Desbordamiento Superficial: TDS (20 – 60 m^3/m^2-d)	Θ_{dis} : 1,8 Θ_{op} : 2,2 TDS_{dis} : 60 TDS_{op} : 49	Θ_{dis} : 1,7 Θ_{op} : 1,9 TDS_{dis} : 65 TDS_{op} : 58	Θ_{dis} : 1,3 Θ_{op} : 2,1 TDS_{dis} : 59 TDS_{op} : 36	Θ_{dis} : 1,5 Θ_{op} : 0,9 TDS_{dis} : 62 TDS_{op} : 115	Θ_{dis} : 2,0 Θ_{op} : 2,6 TDS_{dis} : 60 TDS_{op} : 48
Filtración Tasa de Filtración: TF (120 – 230 m^3/m^2-d rápido arena) (230 – 600 m^3/m^2-d rápido mixto)	TF_{dis} : 360 TF_{op} : 288	TF_{dis} : 220 TF_{op} : 220	TF_{dis} : 326 TF_{op} : 200	TF_{dis} : 326 TF_{op} : 200	TF_{dis} : 231 TF_{op} : 246 (un filtro fuera de servicio)

MR: mezcla rápida; ML: mezcla lenta; S: sedimentadores; F: filtros.

Los intervalos presentados en los parámetros de diseño corresponden a los valores extremos de los criterios de diversos autores (Arboleda, 2000; ASCE-AWWA-ASCE, 2004; CEPIS/OPS, 2005; Romero, 1999)

La Tabla 3 refleja las condiciones de las plantas en el momento cuando se realizó la evaluación. Por observación directa se confirmó el deterioro de los equipos de agitación (motores, paletas, cadenas) y unidades de barrelos que, en muchos de los casos, se encontraban fuera de servicio.

Tabla 3. Resumen de parámetros característicos de operación de las plantas estudiadas

Planta Potabilizadora / Aspecto	I - Convencional >3000 l/s	II - Convencional 1000 – 3000 l/s	III - No Convencional 300 – 1000 l/s	IV - No Convencional < 300 l/s
Condiciones generales de operación y funcionamiento	Algunos equipos de agitación y todos los barrelos fuera de servicio. Proceso supervisado con cierto grado de control	La dosificación de coagulantes no se realiza en el punto de máxima agitación. Muchas de las paletas de la mezcla lenta están deterioradas. Baja supervisión y control del proceso	La planta no es operada con los principios de funcionamiento de un acelerador. Unidades de agitación fuera de servicio. Baja supervisión y control del proceso	Se suspende la operación con turbiedades elevadas en el agua cruda. Una unidad de filtración fuera de servicio. Baja supervisión y control del proceso
Turbiedad del agua cruda	Promedios mensuales entre 50 y 200 UNT con picos hasta 1600 UNT	Promedios mensuales entre 50 y 200 UNT con picos hasta 1000 UNT	Promedios mensuales entre 2 y 5 UNT con picos hasta 10 UNT incrementado en los últimos años	Promedios mensuales entre 10 y 100 UNT con picos de 1000 UNT
Calidad del agua potable: Turbiedad (T), Cloro residual libre (Cl _{libre}), Aluminio residual (Al), Coliformes Fecales (CF)	T: 1 y 2 UNT- Muy eventual > 5UNT Cl _{libre} : 1,5 – 2 mg/l Al: 0,05 mg/l CF ausente, determinaciones frecuentes (diarias)	T: 2 y 4 UNT. En ocasiones >5 UNT Cl _{libre} : 1 – 2 mg/l Al: 0,15 mg/l CF ausente, determinaciones poco frecuentes (quincenales)	T: 1 y 2 UNT. En ocasiones >5UNT Cl _{libre} : 1,5 – 2 mg/l pero en los últimos años < 1 mg/l, asociado con el deterioro de la calidad del agua cruda. Al: no se determina CF ausente, determinaciones poco frecuentes (quincenales)	T: 1 y 2 UNT. En ocasiones > 5 UNT Cl _{libre} : 1 – 2 mg/l Al: no se determina CF ausente, determinaciones poco frecuentes (quincenales)
Consumo sulfato de aluminio (coagulante fundamentalmente usado)	Entre 80 y 650 t/mes, con una relación aparente con la turbiedad agua cruda	Entre 100 y 300 t/mes, con algunos consumos mensuales no relacionados con la turbiedad agua cruda	Entre 2 y 12 t/mes, sin relación con la turbiedad del agua cruda ni tendencia alguna	Entre 0 y 8 t/mes, sin relación con la turbiedad del agua cruda ni tendencia alguna

En las plantas convencionales (I y II), se presenta una alta variabilidad en la turbiedad del agua cruda alcanzando valores extremos, pero la turbiedad del agua de salida se mantiene por debajo del valor máximo permisible (5 UNT), observándose un mejor comportamiento en la planta I que en la II. Resulta pertinente destacar que no se logran turbiedades menores a 1 UNT, que es el valor deseable.

Las concentraciones de aluminio residual no superan el máximo permisible, pero se observa mayor control en la planta I que en la II, tanto por los valores de aluminio residual, como por la mejor relación del consumo de sulfato de aluminio con la turbiedad del agua cruda. La concentración de cloro residual libre en el agua tratada en ambas plantas, es siempre superior a 1 mg/l y no se reporta presencia de coliformes fecales. Se reitera el mayor control en la planta I que en la II, por la frecuencia de realización de análisis bacteriológicos (diaria en la primera y quincenal en la segunda).

En las plantas no convencionales, operadas con bajos caudales, el agua cruda en la planta III puede calificarse como de baja turbiedad. La planta IV presenta alta variabilidad en la turbiedad del agua cruda, alcanzando valores extremos que obligan a suspender la producción. En ambos casos no se observó relación alguna entre la dosificación de coagulante y la turbiedad del agua cruda, tal como se visibiliza en la Figura 4. La turbiedad del agua producida se mantiene por debajo del valor máximo permisible (5 UNT), pero no inferior al valor deseado (1 UNT). En general, el cloro residual a la salida supera el valor máximo permisible, aunque en la planta III se observó su disminución en los últimos años a valores menores a 1 mg/l, producto del cambio en la calidad del agua cruda y las dificultades para incrementar las dosis en el sistema de cloración. La no determinación de aluminio residual y la baja frecuencia en la realización de análisis bacteriológicos, reflejan las limitaciones para la supervisión y control del proceso.

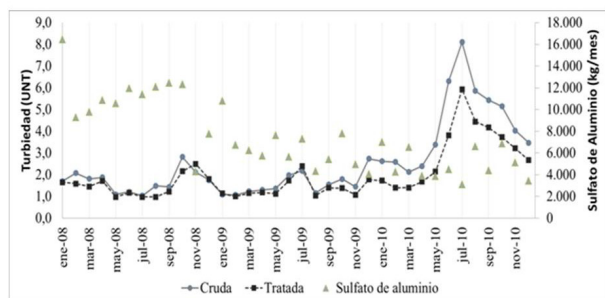


Figura 4. Relación turbiedad – consumo de coagulante. Planta III

Se observó que las unidades filtrantes, dispuestas en estas plantas como unidades de pulimento, operan como “cajas negras”, es decir, sin considerar los múltiples parámetros que es necesario registrar para garantizar una mejor calidad en el agua clarificada: tasas de filtración y lavado, expansión del lecho, granulometría del material filtrante y, en especial, la evaluación de un lavado efectivo de estas unidades de clarificación.

La determinación de estos parámetros durante las evaluaciones realizadas, permitió detectar velocidades de lavado inadecuadas con expansiones de lecho muy bajas o altas, así como composiciones inadecuadas del material filtrante que impiden una mejor clarificación del agua sedimentada y por tanto la producción mejorada de agua

filtrada con valores cercanos o por debajo de 1 UNT de turbiedad.

En las cuatro plantas analizadas, se observó la realización de ensayos tradicionales de pruebas de jarro y demanda de cloro, pero no de forma sistemática, ni asociados con el funcionamiento real de la planta; tampoco sus resultados se utilizaban para la dosificación de las sustancias químicas. Los operadores alegaban que no se correspondían con la realidad observada en la planta y no se alcanzan los parámetros de calidad requeridos en el efluente.

En el caso de la prueba de jarros, los parámetros tradicionalmente utilizados para intensidad y tiempo de agitación son: mezcla rápida -100 rpm y 1 minuto-, mezcla lenta -40 rpm y 20 minutos-, sedimentación -20 minutos-. Para demostrar la aplicabilidad del ensayo en la fijación de las dosis de coagulantes, en algunas de las plantas se realizaron los ensayos, ajustando los valores a los gradientes de velocidad y tiempos de retención en las unidades de mezcla rápida y lenta, así como la tasa de desbordamiento superficial en los sedimentadores. La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos en uno de los protocolos realizados de la prueba de jarros modificada en la planta IV, en la cual la mezcla rápida ocurría entre la tubería de aducción y el cilindro concéntrico. Actualmente este material forma parte de los documentos de operación de la planta.

Tabla 4. Protocolo de la prueba de jarros modificada de acuerdo a los parámetros en la planta IV. Jarros de sección cuadrada, capacidad 2 litros

Caudal (l/s)	Mezcla rápida tubería			Mezcla rápida cilindro			Mezcla Lenta			Sedimentador Tiempo para captar muestra (min)
	Tiempo agitación (s)	G (s ⁻¹)	RPM	Tiempo agitación (min y s)	G (s ⁻¹)	RPM	Tiempo agitación (min)	G (s ⁻¹)	RPM	
85	16	345	190	1'46"	83	70	20	37	42	4
90	15	376	210	1'40"	90	79	19	40	44	4
95	15	408	220	1'35"	98	80	18	43	47	4
100	14	440	235	1'30"	106	85	17	47	50	4
105	13	474	250	1'26"	114	86	16	50	52	4
110	13	508	260	1'22"	122	90	16	54	53	3
115	12	543	270	1'19"	130	94	15	58	57	3
120	12	579	280	1'15"	139	96	14	61	59	3
125	11	616	290	1'12"	148	100	14	65	62	3
130	11	653	310	1'10"	157	110	13	69	65	3

Resulta importante destacar que estos protocolos fueron generados una vez que se demostró que las pruebas de jarros reproducían el comportamiento de la planta; es decir, que la turbiedad del agua sedimentada coincidiera

con la obtenida en la prueba de jarro modificada. También se pudo demostrar en algunos casos la posibilidad de disminuir la dosis de sulfato de aluminio, en un 30 y 60% aproximadamente.

De manera similar, la aplicación de los resultados de los ensayos de demanda de cloro, demostraron la posibilidad de reducir hasta 40% la cantidad de cloro añadido, buscando satisfacer en la etapa de pre cloración la demanda asociada con la presencia de agentes reductores y protección microbiológica de los filtros y en la de post cloración, para asegurar el cloro residual libre deseado en el efluente.

Se observó que los sistemas de dosificación de cloro en la mayoría de las plantas analizadas, tienen diseños rígidos que no permiten modificar significativamente las cantidades que se aplican en las etapas de pre y post cloración.

El cálculo del parámetro C*t en la planta II, permitió conocer la distribución de agua a la población, sin haberse alcanzado una desinfección efectiva, según el criterio de remoción de 99,9% de Giardias, para las condiciones de operación más frecuentes en la planta.

Como apoyo al análisis del funcionamiento de las unidades, en las plantas II (convencional) y IV (no convencional) se realizaron ensayos de trazadores con el propósito de identificar las principales tendencias en el comportamiento hidráulico.

La Tabla 5 muestra los resultados, para un caudal total de operación en cada planta de 1350 l/s y 120 l/s, respectivamente.

Las tres líneas paralelas que conforman la planta II

deberían tener un comportamiento hidráulico similar, puesto que tienen las mismas dimensiones; sin embargo, la distribución desigual del caudal, tanto por asentamiento del terreno como por la imposibilidad de las válvulas existentes para regular el caudal de acceso a las unidades. En consecuencia, los tiempos de retención son muy distintos en cada una de ellas. Las unidades de mezcla lenta en serie, deberían tener un comportamiento también similar y tendiente a flujo pistón. Si bien ésta es mayor que la de flujo no pistón, la mala distribución del caudal y deterioro de los tabiques que separan los compartimientos contribuyen al comportamiento hidráulico diferente en las tres unidades, sin siquiera relación alguna con los respectivos caudales. Ello se acentúa en los sedimentadores, en los cuales si bien el flujo predominante tiende a flujo pistón, las importantes fracciones de volumen muerto reducen sustancialmente el tiempo de retención.

En la planta IV resalta la tendencia predominante de flujo no pistón en el sedimentador (72%), lo que confirma las limitaciones que presentan este tipo de unidades de sección cuadrada e incluso las cilíndricas, para adaptarse a la variabilidad de las características del agua cruda, que obligan a suspender la producción de la planta al incrementar la turbiedad del agua.

Todo ello evidencia la importancia de analizar el comportamiento hidráulico en la evaluación de las plantas potabilizadoras, ya que no sólo la correcta dosificación de las sustancias químicas garantiza su buen funcionamiento.

Tabla 5. Comportamiento hidráulico. Principales tendencias

	Planta II			Planta IV
Caudal real por unidad (l/s)	351	472	527	120
Mezcla lenta				
Θ teórico (min)	43	32	29	20
Θ real (min)	38	27	22	57
% flujo pistón	68	55	86	9
% flujo no pistón	32	45	14	91
%volumen muerto	12	13	24	-
Sedimentador				
Θ teórico (min)	159	118	106	206
Θ real (min)	92	91	89	120
% flujo pistón	77	78	68	28
% flujo no pistón	23	22	32	72
%volumen muerto	42	23	16	28
Velocidad horizontal (cm/s)	0,6	0,8	0,9	No aplica

Θ: tiempo de retención

En cuanto a las prácticas operacionales, a continuación se destacan algunas de las observadas, adicionales a las ya mencionadas:

- En la mayoría de los casos las prácticas operacionales no están dirigidas a la evaluación del funcionamiento ni orientadas a determinar aspectos que permitan un mejor funcionamiento y operación de las plantas potabilizadoras.
- Las rutinas de operación se dirigen fundamentalmente al registro de parámetros de calidad del agua cruda, sedimentada y filtrada, datos que sólo son acumulados en planillas, pero no utilizados como información que les permita evaluar el comportamiento temporal y espacial de los sistemas de tratamiento, así como analizar posibilidades de mejoras.
- Incertidumbre en los valores reportados de la medición de caudales, bien sea por falla o inexistencia de los equipos, así como la no adaptación y uso de los ensayos de pruebas de jarros y demanda de cloro, lo que trae como consecuencia que la dosificación de sustancias químicas se realice considerando sólo el cumplimiento de los valores máximos permitidos en las normas de

calidad del agua potable (GORV, 1998). Esta práctica en la dosificación impide realizar ajustes tendientes a las mejoras, en particular a la optimización y ahorro en las sustancias químicas utilizadas en el tratamiento.

- Los dosificadores de sustancias químicas en algunos casos, tienen antigüedades que superan los 20 años, aspecto que, asociado con la deficiencia del mantenimiento, se traduce en falta de calibración y fallas frecuentes que ocasionan su salida de servicio. Adicionalmente no existen rutinas de medición y ajuste de las cantidades aplicadas, lo que aunado al desconocimiento del caudal, atenta contra la eficiencia en la operación de la planta.

Sobre la base de estos y otros aspectos que han sido identificados, una vez culminada la evaluación de las plantas en estudio, se presentan las Tablas 6, 7 y 8 en las cuales se señalan los problemas o prácticas inadecuadas coincidentes en los sistemas, las consecuencias que ocasionan, las medidas propuestas orientadas en las buenas prácticas de operación, así como la importancia, tiempo y los costos cualitativos para su aplicación, de acuerdo a su clasificación en estructurales, funcionales/operacionales y organizacionales, respectivamente.

Tabla 6. Propuestas de mejoras en las plantas potabilizadoras - variables estructurales

Problema detectado o práctica observada	Consecuencia indeseable	Propuesta de mejora	Importancia	Tiempo	Costo
Ausencia de dispositivos de medición de caudal	Desconocimiento de la producción e imprecisión en la dosificación de sustancias químicas	Colocar medidores de caudal	Prioritario	Mediano plazo	Medio
Ausencia de dispositivos para captación de muestras del agua y piezómetros en cada unidad filtrante	Imposibilidad de conocer la calidad físico-química y la pérdida de carga en cada unidad filtrante por separado	Colocar dispositivos para captar muestras de agua a la salida de cada filtro e instalación de piezómetros	Deseable	Mediano plazo	Medio
Desconocimiento de la condición del lecho filtrante	Imposibilidad de verificar su incidencia en la calidad del agua producida	Realizar ensayos granulométricos y presencia de bolas de barro en el medio filtrante para detectar sus condiciones	Deseable	Mediano plazo	Medio
Rigidez en las instalaciones para la dosificación de cloro a aplicar en la pre y postcloración	Posible consumo excesivo de cloro sin posibilidad de distribuir adecuadamente las dosis entre la pre y post cloración	Realizar cambios en el sistema de distribución entre pre y postcloración que permita flexibilidad en el flujo de dosificación	Deseable	Mediano plazo	Alto

Tabla 7. Propuestas de mejoras en las plantas potabilizadoras - variables funcionales/operacionales

Problema detectado o práctica observada	Consecuencia indeseable	Propuesta de mejora	Importancia	Tiempo	Costo
Ensayo de demanda de cloro, realizado eventualmente, no se aplica para la dosificación de cloro ni para su distribución entre la pre y post cloración	Imposibilidad de tener los valores teóricos de la demanda de cloro, mayor consumo de cloro, específicamente en la precloración	Realizar a diario la curva de demanda de cloro bajo el método estándar y distribuir la dosis entre las etapas de pre y post cloración de acuerdo con sus resultados.	Prioritario	Corto plazo	Bajo
Poca frecuencia en la realización de determinaciones bacteriológicas, en particular en las plantas pequeñas y medianas	Desconocimiento de la calidad bacteriológica del agua potable y el cumplimiento con la normativa	Incrementar la frecuencia de análisis bacteriológicos en al menos una vez por semana	Prioritario	Corto plazo	Medio
Dosificación de coagulantes sobre la base de la experiencia de los operadores, considerando la turbiedad del agua cruda y no en los resultados de la prueba de jarros	Posible uso excesivo y no necesario de los coagulantes, sin posibilidades de optimizar la dosis a aplicar	Realizar diariamente la prueba de jarros ajustada a las condiciones de agitación, tiempos de retención y tasa de desbordamiento superficial de la planta	Prioritario	Corto plazo	Bajo
No se realiza medición asociada con la operación de los filtros, específicamente en el lavado	Imposibilidad de identificar posibles fallas operacionales, realizar control sobre los filtros y en las rutinas de lavado	Realizar mensualmente medición y registro de los parámetros básicos de operación de los filtros, específicamente en el lavado	Prioritario	Corto plazo	Bajo

Tabla 8. Propuestas de mejoras en las plantas potabilizadoras - variables organizacionales

Problema detectado o práctica observada	Consecuencia indeseable	Propuesta de mejora	Importancia	Tiempo	Costo
El grado de instrucción del personal de la planta, en ocasiones no es el requerido	Imposibilidad de implementar rutinas y criterios para el funcionamiento adecuado de la planta	Generar y aplicar políticas de capacitación y revisar la buena ejecución de las actividades	Prioritario	Mediano plazo	Medio
Ausencia de manuales y documentos de generación de información a partir de los datos medidos	Imposibilidad de acometer mejoras en la planta sobre la base del historial y condiciones de operación y mantenimiento	Generar manuales y planillas que permitan transformar los datos medidos a diario en gráficos y tablas resumen	Deseable	Mediano plazo	Medio
No existe una política organizacional real y efectiva para la mejora continua	Dificultades para implementar mejoras en la calidad del agua	Establecer mecanismos que permitan aplicar una política organizacional de mejora continua	Deseable	Mediano plazo	Medio
No existen auditorías externas	Dificultades para implementar mejoras por falta de retroalimentación externa	Utilizar las auditorías externas como mecanismo de revisión para la mejora continua	Deseable	Mediano plazo	Medio

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La experiencia de la evaluación realizada en las cuatro plantas, representativas de plantas potabilizadoras venezolanas, demuestra que los cambios propuestos que parecen elementales, además de poder aplicarse en el corto y mediano plazo, de bajo costo, especialmente los asociados con las variables funcionales/operacionales y organizacionales, constituyen la solución a muchos de los grandes problemas en las plantas evaluadas.

Las propuestas de tipo estructural se asocian con la instalación de medidores de caudal y cambios en las unidades que permitan mejorar la dosificación de sustancias químicas, el funcionamiento y seguimiento de las unidades de filtración y flexibilizar el sistema de cloración.

La revisión detallada del funcionamiento de los dosificadores, una rutina de ejecución de pruebas de jarro ajustada a las condiciones de funcionamiento de la planta y de la curva de demanda de cloro, así como el conocimiento del caudal real de operación pueden reducir significativamente el consumo de sustancias químicas.

Las propuestas operacionales se orientan a la incorporación de tareas en las rutinas de operación, las cuales pueden lograrse en el corto plazo, a costo bajo y medio.

Los aspectos organizacionales, en la mayoría de los casos estudiados, reflejan la falta de capacitación, entrenamiento y actualización del personal relacionado con la operación de la planta, lo que dificulta el emprender acciones dirigidas a tener buenas prácticas operacionales, así como iniciativas y acciones tendientes a la mejora continua.

Las propuestas organizacionales están dirigidas a modificar la conducta en los diferentes niveles de la organización, basadas en los principios de la mejora continua.

La integración de la metodología de evaluación utilizada en cuatro plantas, representativas de las plantas potabilizadoras venezolanas, constituye un instrumento de apoyo para el análisis sistematizado de cada una de las etapas que la conforman, que puede ser replicado en otros sistemas y es requisito indispensable para la determinación de puntos críticos de control en las metodologías de HACCP y PSA.

Se recomienda dirigir acciones tendientes a establecer buenas prácticas operacionales en términos de acciones de inmediato y corto plazo que permitan visibilizar las mejoras en el funcionamiento de las plantas, para luego implementar las modificaciones estructurales y organizacionales.

Se recomienda diseñar indicadores de gestión para medir los avances o logros en la aplicación de medidas, a partir de análisis causa-efecto.

REFERENCIAS CONSULTADAS

ACOSTA, I. (2008). Uso de la Trazabilidad como Herramienta de Gestión de Calidad en una Planta de Tratamiento de Agua Potable. Trabajo Especial de Grado Facultad de Ingeniería-Universidad Central de Venezuela.

ACOSTA, I., NAJUL, M., BLANCO, H. (2008). Gestión de la calidad utilizando la trazabilidad en plantas convencionales para potabilización de aguas. Memorias del XXXI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. AIDIS, Santiago, Chile. p. 8

ALAYÓN, D. & RANDELLI, M. (2011). Estudio de oportunidades de mejoras de la planta potabilizadora Sistema Aislado Camatagua. Trabajo Especial de Grado Facultad de Ingeniería-Universidad Central de Venezuela.

AMUNDARAY, C., AVILA, B., BLANCO, H. (1990). Diagnóstico y Análisis de Costos de Sistemas de Tratamiento para Potabilización de Aguas Existente en Venezuela. Trabajo Especial de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Central de Venezuela. Caracas, p. 192.

APHA, AWWA, WEF. (2000). Standard Methods for the examination of water and wastewater. 20th edition.

ARBOLEDA, J. (2000). Teoría y práctica de la purificación del agua. 3ra edición. Bogotá: McGraw-Hill. p. 793.

AWWA-ASCE. (2004). Water Treatment Plant Design. Edward E. Baruth Technical Editor. 4th Edition. McGraw Hill, NY.

AYALA, R. (2009). Evaluación del Desempeño de la Planta de Potabilización de Agua Los Teranes, Estado Carabobo. Trabajo Especial de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Caracas, p. 194.

BASTOS, R., COBUCCI, D., GALVÃO, A., DO NASCIMENTO, L. (2006). Avaliação de desempenho de uma estação de tratamento de água antes e depois de intervenções de melhoria. Memorias del XXX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental". AIDIS, Punta del Este, Uruguay. p. 8

- BRACHO, N., MEJÍAS, O., SÁNCHEZ, K., BOSCÁN, S., SUÁREZ, H. (2012). Evaluación del proceso de clarificación de la Planta Alonso de Ojeda (Planta C), Maracaibo – Venezuela. Memorias del XXXIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental”. AIDIS, Salvador de Bahía, Brasil. p. 8
- CEPIS/OPS. (2005). Teoría, Diseño y Control de los Procesos de Clarificación de Agua. Versión digital. Editorial del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Lima-Perú.
- CHOURIO, M. & CABRERA, M. (2011). Posibilidades de mejoramiento de una planta potabilizadora No Convencional. Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.
- COBUCCI, D., BASTOS, R., BATISTA, N., DE PAULA, J., DO NASCIMENTO, L. (2006). Avaliação de desempenho de filtros rápidos de fluxo descendente: a importancia da adequada operação. Memorias del XXX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental”. AIDIS, Punta del Este, Uruguay. p. 8
- COVENIN. (2000). Sistemas de Gestión de la Calidad: Fundamentos y Vocabulario. Norma Venezolana COVENIN-ISO 9000:2000. Fondonorma. Venezuela.
- DRAULT, N. (2008). Herramientas de Normalización para la Gestión del Agua. Hydria. 2008; año 4, Nº 17. pp. 10-11
- GARCÍA, M. & TORTOLANO, S. (1991). Planificación del Mantenimiento en Plantas de Potabilización de Agua. Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería, Universidad de Central de Venezuela. Caracas.
- HIDROVEN. (2007). Inventario de plantas potabilizadoras en Venezuela. (no publicado)
- HIDROVEN. (2012). Fichas técnicas de plantas potabilizadoras en Venezuela. (no publicado).
- IRIBURO, A., GUARNIERI, M., SAINZ, L., PESSI, M., URETA, A. (2012). Planes de seguridad de agua; articulando el nuevo paradigma. Sistema de abastecimiento. Ciudad de Dolores/Uruguay. Memorias del XXXIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental”. AIDIS, Salvador de Bahía, Brasil. p. 8.
- MILANI M. & GOMES, O. (2008). Otimização de uma estação de tratamento de água através da dosagem ótima de coagulante e cálculo dos gradientes de velocidade. Memorias del XXXI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental”. AIDIS, Santiago, Chile. p. 4.
- PANTALEÃO, E., DE SOUZA, F., CARDOSO, A. (2012). Avaliação da gestão operacional das estações de tratamento de água do programa nacional de saneamento rural em comunidades de pequeno porte no interior do estado do Espírito Santo. Memorias del XXXIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental”. AIDIS, Salvador de Bahía, Brasil. p. 5
- Pirela, A. (1996). Cultura empresarial en Venezuela. La industria química y petroquímica. Fundación Polar – CENDES, Caracas.
- REPÚBLICA DE VENEZUELA – GORV. (1998). Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable. Gaceta Oficial Nº 36.395. Caracas.
- ROMERO, J. (1999). Potabilización del agua. 3ra. Edición. México D.F.: Alfaomega. 327p.
- SOTTOLANO, J., NAJUL, M., CARRASQUERO, N., SÁNCHEZ, R. (2004). Un Nuevo Enfoque para Evaluación de la Calidad de Agua Potable. Revista de la Facultad de Ingeniería de la UCV, Vol. 19, #3, pp. 15-20.
- TELESUR. (2012). Venezuela mejorará plantas potabilizadoras de agua. Nota de prensa, miércoles 28 de marzo de 2012. Recuperado el 23 de octubre de 2013 de: <http://www.telesurtv.net/articulos/2012/03/28/presidente-de-venezuela-asigna-recursos-para-mejorar-plantas-potabilizadoras-de-agua>.
- TORRES-LOZADA, P., AMÉZQUITA-MARROQUÍN, P., PÉREZ-VIDAL, A. ESCOBAR-RIVERA, J., CRUZ-VÉLEZ, C., DELGADO-CABRERA, L. (2012). Evaluación del riesgo en sistemas de distribución de agua potable enmarcado en un plan de seguridad del agua. Memorias del XXXIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental”. AIDIS, Salvador de Bahía, Brasil. p. 8.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO (2011). Guidelines for drinking water quality. 4th ed. Recuperado el 23 de octubre de 2013 de: http://whqlibdoc.who.int/publications/2011/9789241548151_eng.pdf.