

# HOJA TÉCNICA

*“Acondicionamiento de lodos residuales por medio del uso de polímeros solubles en agua”*



Área Funcional Investigación Aplicada

UEN Investigación y Desarrollo

INSTITUTO COSTARRICENSE DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS



**Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados  
Centro de Documentación e Información  
UEN Investigación y Desarrollo**



**AUTORIZACIÓN INSTITUCIONAL PARA PUBLICAR TESIS, ESTUDIOS,  
ARTÍCULOS Y/O INFORMES PROPIEDAD INTELECTUAL DE AyA EN  
EL REPOSITORIO DIGITAL DEL CEDI**

**Yo, Annette Henchoz Castro**

---

**N° Cédula: 1-0725-0409**

---

**Dependencia: Gerencia General**

---

Autorizo como Sub Gerente General y representante legal del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) cédula jurídica 4-000-042138 al Centro de Documentación e Información (CEDI) de la UEN Investigación y Desarrollo la inclusión, publicación y difusión en su Repositorio Digital, Catálogo en línea (OPAC) y la intranet institucional de la documentación incluida en la lista adjunta.

Se trata de estudios y documentos cuyos derechos intelectuales y de uso son exclusivos de nuestra institución.

**E-mail:** [centrodoc@aya.go.cr](mailto:centrodoc@aya.go.cr) **N° Teléfono:** 2242-5487

Annette  
Henchoz Castro

Firmado digitalmente por  
Annette Henchoz Castro  
Fecha: 2019.11.25 16:07:20  
-06'00'

**Firma:** \_\_\_\_\_



## **ACONDICIONAMIENTO DE LODOS RESIDUALES POR MEDIO DEL USO DE POLÍMEROS SOLUBLES EN AGUA**

### **1. Estado de la situación**

A lo largo de la historia el ser humano ha valorado el recurso hídrico como uno de los más importantes para satisfacer sus necesidades esenciales. Es por esta razón que, a lo largo de la historia, se han desarrollado operaciones y procesos unitarios enfocados a generar agua potable y a producir agua residual tratada apta para la disposición final correspondiente. Dos de los procesos más útiles para una gran diversidad de calidades de agua son: coagulación y floculación.

Existe una gran diversidad de agentes químicos que se pueden emplear para tratamiento de aguas. Según Berzosa (2018), desde el año 2000 A.C., se inició el uso de sustancias vegetales como medios de clarificación para el agua de consumo humano. El insumo empleado fueron las semillas de moringa. Posteriormente, después del año 1500 A.C., los egipcios descubrieron el principio de la coagulación, incluso con la aplicación de alúmina a las partículas en suspensión, para sedimentarlas.

Ya más adelante, durante la década de los años sesenta, se aprobó el primer polímero orgánico sintético no-tóxico para el tratamiento y potabilización de aguas municipales en Estados Unidos (Berzosa, 2018). En el presente documento se desarrollan los conceptos relacionados con polímeros y otros agentes químicos para tratamiento de aguas, según la operación unitaria a la que se aplican. Estos conceptos constituyen una línea base teórica para la planificación de etapas de experimentación, pilotaje y escalamiento final.

### **2. Polímeros**

Un gran grupo de componentes que se emplean en gestión de aguas y lodos residuales son los polímeros. Según Arboleda (2000), un polímero se puede definir como una sustancia formada por una cantidad de unidades básicas llamadas monómeros, unidas por enlaces covalentes que se repiten sucesivamente. Su grado de polimerización está dado por el número de monómeros que conforman su cadena polimérica.

El término polielectrolito se utiliza para hacer referencia a polímeros con múltiples grupos funcionales activos, con cargas determinadas (Crittenden, 2012). Es decir, el polielectrolito se puede considerar con un polímero con grupos monoméricos iónicos. Según Letterman (1999), las unidades monoméricas pueden tener sitios de con carga positiva o negativa. Aquellos con preponderancia de sitios negativos se llaman aniónicos, mientras que los predominantemente positivos son los catiónicos. Por otra parte, los que no tienen sitios cargados o tienen apenas una ligera

tendencia a una carga específica, son los no-iónicos. Los llamados anfolíticos son los que tienen sitios tanto positivos como negativos.

Un segundo criterio de clasificación a considerar es la naturaleza del producto (figura 1). En este punto es importante resaltar que no siempre los productos denominados orgánicos corresponden a aquellos que ofrece la naturaleza. Hay sustancias orgánicas tanto de origen natural como de origen sintético.



**Figura 1** Tipos de polímeros según su naturaleza (Berzosa, 2018)

Otro criterio para organizar los tipos existentes de polímeros es el uso específico para el cual están hechos. En ese sentido, una de las variables más importantes es la del peso molecular. Según este criterio, es posible seleccionar su aplicación, tal y como se muestra en la figura 2.

De esta manera, y de acuerdo con lo indicado por Letterman (1999), los coagulantes son aquellos con peso molecular relativamente bajo (< 500 000 Dalton). Mientras tanto, los floculantes se presentan con pesos moleculares ligeramente altos, usualmente 10 veces el peso de los coagulantes típicos. Estos son los productos más empleados para mejora de calidad de aguas.

Por otra parte, con los menores pesos moleculares, existen los dispersantes; para ellos, una aplicación muy común es la de acondicionamiento de aguas para calderas, por su efecto de inactivación de sales de calcio y magnesio. Los espesantes se emplean comúnmente para incrementar la viscosidad del agua. Esta propiedad se

emplea comúnmente para mejorar el rendimiento de la extracción de pozos petroleros.

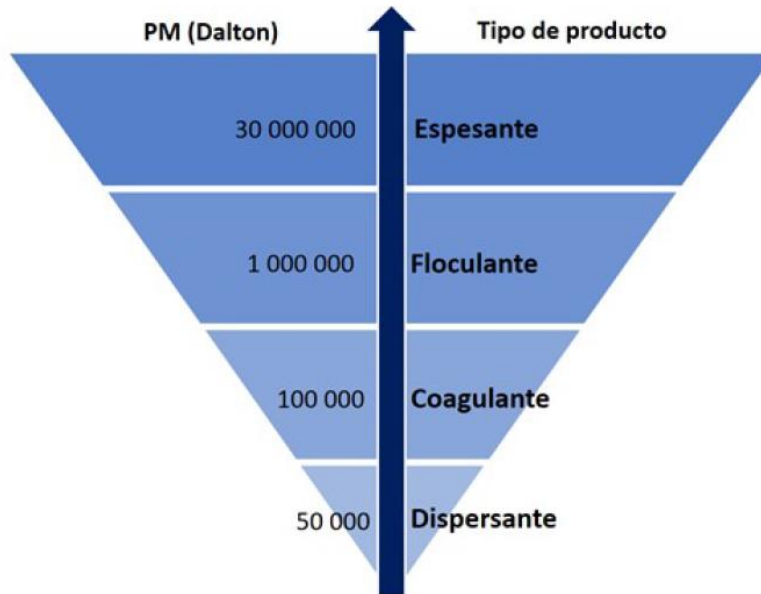


Figura 2 Tipos de polímeros según su peso molecular (Berzosa, 2018)

### 3. Coagulantes

De acuerdo con Letterman (1999), la coagulación es un proceso que busca incrementar la tendencia de pequeñas partículas a agregarse entre sí en una suspensión acuosa, o bien favorecer la agregación sobre superficies específicas. Se presenta una desestabilización de las partículas de tamaño coloidal que antes estaban estabilizadas por fuerzas electrostáticas repulsivas, las cuales dominan sobre la fuerza gravitacional (Arboleda, 2000). Los principales mecanismos de desestabilización son los siguientes:

- *Compresión de doble capa (Letterman, 1999)*: se presenta por adición de un electrolito simple. En ese caso, los iones que cuentan con signo opuesto a la carga neta superficial de las partículas ingresan a la capa difusa que rodea a cada partícula. Si se agrega suficiente cantidad de iones contrarios, la capa difusa se comprime, reduciendo la energía requerida para mover partículas con la misma carga. El mismo Letterman (1999) no recomienda este mecanismo para tratamiento de agua, pues la cantidad de sal requerida para estos procesos puede llegar a ser muy alta.
- *Adsorción y neutralización de carga superficial (Letterman, 1999)*: se busca reducir la carga neta superficial de las partículas en la suspensión. Conforme este fenómeno ocurre, el espesor de la capa difusa que rodea las partículas



también disminuye y la energía requerida para poner las partículas en contacto se reduce.

- *Adsorción y puente químico (Crittenden, 2012)*: en este caso la sustancia las cadenas de sustancias como los polímeros se adsorben sobre la superficie de las partículas, en uno o más sitios sobre la cadena, como resultado de: interacciones de Coulomb, interacción de dipolos, puentes de hidrógeno y fuerzas de van der Waals. Propiamente el puente se presenta debido a que la cadena polimérica no adsorbida, entra en acción sobre área superficial disponible de otras partículas, creando un puente entre ellas.
- *Precipitación e incorporación o barrido (Crittenden, 2012)*: usualmente para el caso de sales de hierro o aluminio, las formas insolubles de estas sales hidratadas precipitan y las partículas presentes son atrapadas por esos precipitados amorfos. Típicamente, conlleva una hidrólisis y polimerización de los iones metálicos, luego una adsorción de estos productos sobre la interfase de las partículas, para finalizar con una neutralización de cargas. Este mecanismo presenta la desventaja de producir concentraciones residuales muy significativas de los metales en medio acuoso.

### 3.1 Coagulantes inorgánicos

Los coagulantes inorgánicos se pueden dividir en dos grandes grupos, según su naturaleza (cuadro 1). En el caso de las sales inorgánicas, es importante destacar que la efectividad del proceso de coagulación mejora conforme mayor es el estado de oxidación del catión. Esto por cuanto mejor será el efecto de neutralización de cargas.

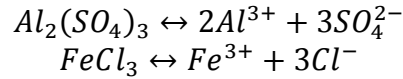
**Cuadro 1** Principales coagulantes inorgánicos (Berzosa, 2018)

Sales	Polímeros
Sulfato de aluminio	Policloruro de aluminio (PAC)
Cloruro de aluminio	Clorhidrato de aluminio (ACH)
Sulfato férrico	-
Sulfato ferroso	-
Cloruro férrico	-
Aluminato de sodio	-

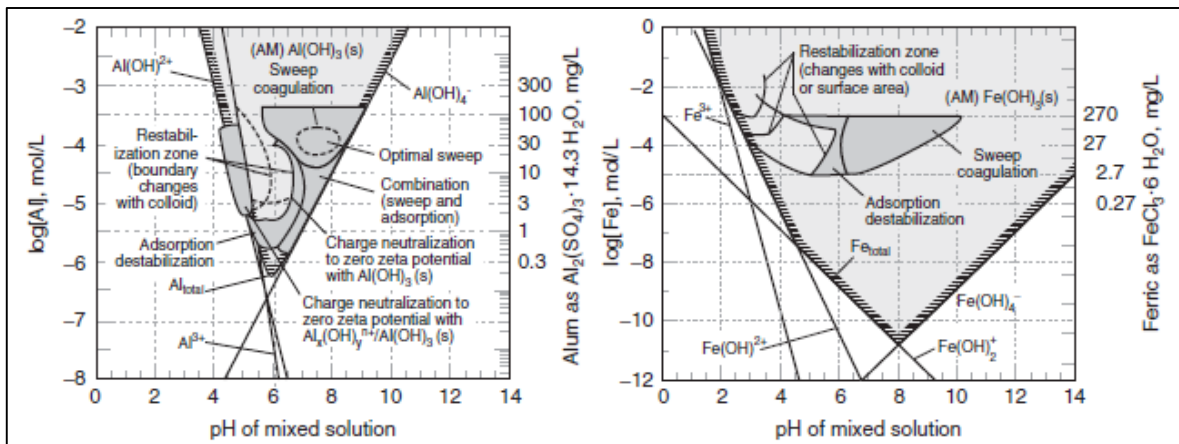
#### 3.1.1 Sales metálicas simples

En el caso de las sales de hierro y aluminio en medio acuoso, en el momento en que se adicionan las sales metálicas al agua, se produce una disociación del

aluminio y el hierro trivalente, según corresponda. De acuerdo con Crittenden (2012), este proceso implica la separación del anión y el catión:



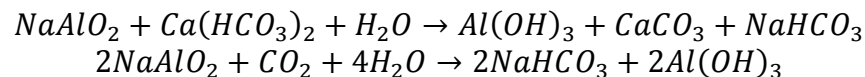
Posteriormente, los iones trivalentes se hidratan para formar complejos metálicos acuosos. Se forman enlaces fuertes con los átomos de oxígeno de las moléculas de agua, hasta tal nivel que el enlace entre oxígeno e hidrógeno se debilita. Por lo tanto, los átomos de hidrógeno son liberados al medio (Letterman, 1999). Durante este proceso, conocido como hidrólisis, es importante considerar la solubilidad de los hidróxidos metálicos según el pH del agua, para procurar el mejor desempeño. Esto permite minimizar la concentración residual de estos elementos.



**Figura 3** Diagrama de solubilidad para el aluminio y el hierro (Crittenden, 2012)

En la figura 3 se muestra la concentración de especies mononucleares a una temperatura de 25 °C. La concentración residual total aproximada de cada metal soluble está representada por la línea sólida. Los hidróxidos metálicos precipitan dentro de las áreas sombreadas. Específicamente, Crittenden (2012) menciona que el intervalo operativo de pH para precipitación de hidróxido de aluminio se encuentra entre 5.5 y 7.7 (solubilidad mínima en 6.2); en el caso del hierro se recomienda el intervalo de 5 a 8.5, con su mínimo de solubilidad cerca de 8. Esto debe ser confirmado con pruebas de campo.

El aluminato de sodio es un coagulante que funciona como posible fuente de alcalinidad, propia de la reacción del compuesto en agua. Según Berzosa (2018) las reacciones principales que ocurren en el medio acuoso son las siguientes:





Una diferencia importante con respecto a otras sales comunes es el hecho de que este compuesto cuenta con un pH elevado, lo cual provoca que los efectos sobre la calidad del agua final, que son diferentes a los de otros agentes coagulantes. De hecho, Letterman (1999) reporta el uso de este producto en combinación con el sulfato de aluminio para tratamiento de aguas con poca alcalinidad. Una dosis de aluminato de sodio de 1 mg Al/l incrementa la alcalinidad en 1.9 mg CaCO<sub>3</sub>/l.

### 3.1.2 Polímeros (sales metálicas pre-hidrolizadas)

En el caso de las sales metálicas simples, éstas se hidrolizan luego de la adición al agua que se desea tratar; en la reacción de hidrólisis se producen iones de hidrógeno que reaccionan con alcalinidad en la solución (Letterman, 1999). Si parte de este ácido es neutralizado con una base cuando se fabrica el coagulante, el producto resultante es una solución de coagulante de una sal metálica pre-hidrolizada.

El grado al cual se realiza la pre-neutralización de los iones producidos por la hidrólisis es llamado basicidad. Según Letterman (1999), el planteamiento de la relación que da origen al concepto es la siguiente:

$$\text{Basicidad (\%)} = \left( \frac{100}{3} \right) \cdot \frac{[OH]}{[M]}$$

En este caso, la relación [OH]/[M] representa la relación molar entre los iones hidróxido y los iones metálicos, para todos los productos de hidrólisis en la solución del coagulante no disuelto. A nivel comercial, la basicidad de soluciones de coagulante varía de -10 (baja pre-hidrólisis) hasta cerca de 83%. Conforme la basicidad se incrementa más allá de 75%, se vuelve cada vez más difícil evitar la precipitación del hidróxido metálico durante el transporte o almacenamiento prolongado de la solución (Letterman, 1999).

Una de las sustancias más comunes es el policloruro de aluminio (PAC), el cual es una sustancia inorgánica cuya fórmula general se expresa como:  $Al_n(OH)_mCl_{3n-m}$ . Según Berzosa (2018), además de la basicidad, las propiedades principales que diferencian a los distintos productos son el contenido de aluminio expresado como  $Al_2O_3$ . A los productos con basicidades superiores al 70% se les conoce como clorhidrato de aluminio o hidroxicloriguro de aluminio (ACH).

**Cuadro 2** Tipos de policloruros de aluminio (Berzosa, 2018)

Parámetros	PAC 10	PAC 14	PAC 18
Contenido de $Al_2O_3$ (%)	$9.5 \pm 0.3$	$13.6 \pm 0.5$	$17.0 \pm 0.5$
Contenido de cloruros (%)	$11.5 \pm 1.0$	$22.0 \pm 2.0$	$21.0 \pm 2.0$
Basicidad relativa (%)	$41.0 \pm 5.0$	$26.0 \pm 6.0$	$43.0 \pm 5.0$
Contenido de sulfatos (%)	$1.5 \pm 0.5$	$< 0.1$	$< 0.1$
pH (solución al 10%)	$4.0 \pm 0.2$	$3.9 \pm 0.2$	$3.9 \pm 0.2$
Densidad a 20 °C ( $g/cm^3$ )	$1.21 \pm 0.02$	$1.33 \pm 0.03$	$1.36 \pm 0.02$
Viscosidad a 25 °C (cP)	$1.0 \pm 5.0$	$2.5 \pm 5.0$	$40.0 \pm 5.0$

La denominación típica de algunos PAC está relacionada precisamente con el contenido de aluminio. De hecho, en el ejemplo planteado en el cuadro 2, se puede observar la correlación existente entre la denominación genérica de cada PAC y su contenido de ingrediente activo. De manera complementaria, es importante notar el cambio radical que se presenta en la viscosidad de cada producto, conforme se cambia la concentración del mismo ingrediente activo.

Algunas ventajas que promueven las casas comerciales que distribuyen este tipo de productos aún requieren de validación. Esto por cuanto se requiere hacer referencia a la calidad de agua y a los procesos en los cuales se aplican los productos. Como parte de los mitos conceptuales a favor de productos coagulantes como el ACH o el PAC es posible citar:

- Reacción más rápida debido a estructura polimérica.
- Generación de flóculos de mayor tamaño y mejor sedimentabilidad.
- Más efectividad en intervalos más amplios de turbiedad.
- Menor concentración de aluminio residual en el efluente final (ACH principalmente).
- Alargamiento de carreras de filtración.
- Menor consumo de alcalinidad, y mejor control del Ph.
- Dosis inferiores a las de las sales metálicas simples.
- Mayor amplitud de pH para operación y menor producción de lodos.

### 3.2 Coagulantes orgánicos sintéticos

Al referirse a coagulantes orgánicos sintéticos, las dos especies más ampliamente utilizadas (polielectrolitos catiónicos) para tratamiento de aguas son: policloruro de dimetil dialil amonio (POLYDADMAC) y epiclohidrina dimetilamina (poliamina). Según Letterman (1999), ambos productos se comercializan como soluciones acuosas y son clasificados como aminas cuaternarias. La razón para ello es que

cada monómero en la amina cuaternaria contiene un átomo de nitrógeno unido a cuatro átomos de carbono, al mismo tiempo que presenta una carga positiva. Esta última no se ve afectada por cambios en la química de la solución.

Desde el punto de vista químico, la fórmula general del POLYDADMAC se expresa como  $[C_8H_{16}NCl]_n$  mientras que la poliamina corresponde a  $[C_2H_7N^*C_3H_5ClO]_n$ . Según Crittenden (2012), los polímeros orgánicos tienen dos usos principales en tratamiento de agua:

- Coagulante para desestabilización de para desestabilización de partículas.
- Ayudante de filtración para promover la formación de flóculos más grandes y resistentes.

Según Crittenden (2012), en la mayoría de los casos estos productos no necesariamente se emplean como coagulantes primarios, sino que se implementan una vez que las partículas han sido desestabilizadas. El mismo autor indica que comúnmente los polímeros orgánicos sintéticos son más baratos que aquellos obtenidos de fuentes naturales, y eso repercute significativamente en su uso extendido. El proceso de fabricación de este tipo productos puede ser manipulado para producir polímeros con características muy variadas:

- Tamaño (peso molecular): ver figura 2.
- Grupos de carga.
- Número de grupos de carga por cadena polimérica (densidad de carga).
- Estructura: linear, ramificada o reticulada.

De acuerdo con lo expuesto por Berzosa (2018) cada producto comercial tiene su formulación específica, según la cual se logra un balance entre variables tales como: peso molecular, contenido de activo y grado de ramificación. Esto también implica que, conforme se modifica alguna variable, las otras también sufrirán cambios, por lo cual es necesario realizar un proceso de selección apropiado, siguiendo las calidades de productos disponibles en el mercado. Es decir, esto se convierte en un proceso que necesariamente requiere de insumo comercial para poder optimizar ciertos procesos unitarios. En el caso particular de los POLYDADMACS entra en juego incluso otra variable, como lo es el contenido de sólidos en solución.

#### 4. Flocculantes

La floculación es el fenómeno por medio del cual se promueve la interacción de partículas para formar agregados que pueden ser removidos de manera eficiente en procesos de separación posteriores, tales como: sedimentación, flotación y filtración (Letterman, 1999). Como parte de los mecanismos principales por medio de los cuales se produce la floculación es posible citar:



- *Floculación peri-cinética (escala “micro”)*: la tasa de floculación de partículas pequeñas (menos de 0.1  $\mu\text{m}$ ) está regida por la tasa a la cual las partículas se difunden hacia otras. Conforme se unen las partículas pequeñas, se forman partículas grandes. Luego de algunos segundos, se forman microfloculos que tienen un tamaño entre 1 y 100  $\mu\text{m}$  (Crittenden, 2012).
- *Floculación orto-cinética (escala “macro”)*: corresponde a los mecanismos que se desarrollan cuando se aporta mezcla al agua, lo cual causa gradientes de velocidad que ocasionan colisiones entre las partículas suspendidas (Crittenden, 2012). En esta etapa también se enfrenta el riesgo de esfuerzos cortantes aplicados a los flóculos, lo cual puede resultar dañino para el proceso de tratamiento. Por ello es indispensable el control de proceso para lograr la distribución de tamaños deseada.
- *Asentamiento diferencial*: el crecimiento de flóculos puede resultar de partículas que decantan a diferentes velocidades. Este fenómeno se presenta comúnmente en suspensiones con un intervalo amplio de tamaños de partículas, donde unos flóculos influyen a otros conforme son afectados por fuerzas gravitacionales. Este mecanismo no se presenta cuando se emplean alternativas tales como: filtración directa, flotación por aire disuelto, o sedimentación acelerada.

Los principales tipos de floculantes que se encuentran en el mercado son: poliacrilamidas aniónicas o no-iónicas, y las poliacrilamidas catiónicas. La fórmula general para este tipo de componentes se describe como  $[\text{C}_3\text{H}_5\text{NO}]_n$ . Según Berzosa (2018), este tipo de productos son fabricados a partir de derivados del petróleo y se pueden presentar en cuatro formas diferentes, tal y como se muestra en el cuadro 3.

**Cuadro 3** Principales presentaciones de los floculantes (Berzosa, 2018)

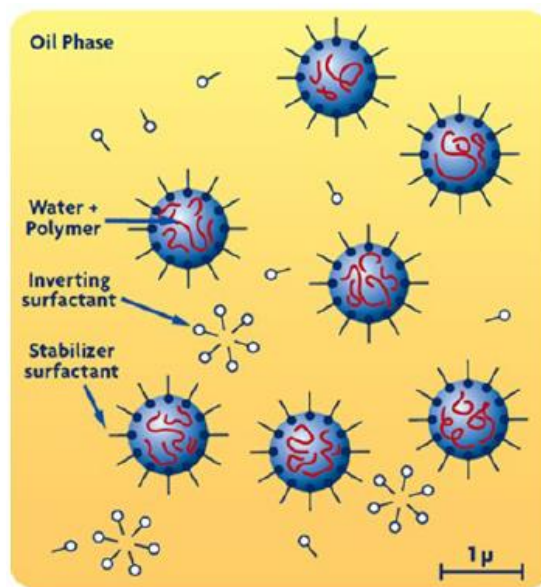
Presentación	Concentración ingrediente activo (%)
Dispersión	20 – 25
Emulsión	40 – 50
Perlas	85 – 95
Polvo	85 – 95

La presentación a escoger para una aplicación particular dependerá de diversos criterios. Uno de ellos es el costo del producto, debido a que cada proceso de fabricación varía en cuanto a sus requerimientos de energía. Adicionalmente, otro aspecto que influye es el logístico, pues se debe valorar la conveniencia de adquirir productos que pueden tener un alto contenido de agua. Claramente, tanto el tamaño

de la aplicación, como la experiencia operativa del usuario final y el equipamiento disponible tienen una cuota significativa en la selección final.

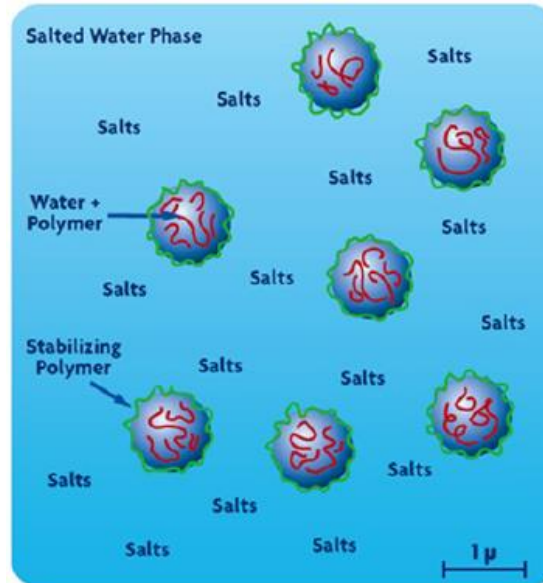
Una diferencia importante respecto a los coagulantes es que no se deben utilizar directamente con la presentación que traen de fábrica. La efectividad de un floculante depende de: equipo y agua de preparación, mezcla, y el punto de aplicación en cada proceso. En general, es posible indicar lo siguiente:

- Floculantes secos: la concentración de la solución a utilizar depende de la carga, la densidad de carga y su peso molecular. Típicamente se emplean concentraciones menores o iguales a 0.25% m/m, aunque hay casos en que se emplea 1%. En caso de no respetar la recomendación de preparación, se tendrá a disposición una mezcla altamente viscosa y sin posibilidad de ser impulsada con equipos de bombeo.
- Floculantes en emulsión: este tipo de preparaciones son en apariencia líquidos, con altos porcentajes de aceite y surfactante. El aceite permite contar con una alta concentración de polímero en el fluido, pero esta presentación requiere ser invertida de la fase de aceite a una fase acuosa. Con este fin, es esencial que el producto se prepare en una condición de alto esfuerzo cortante, con mezcla para lograr concentración entre 0.2 y 1%. Si este valor es muy alto o muy bajo, el surfactante no invertirá efectivamente el polímero hacia la fase acuosa y el floculante no se activará. Este efecto también se conoce como “maduración”, y conlleva al desarrollo de las largas cadenas poliméricas presentes en el fluido.



**Figura 4** Composición genérica de floculantes en emulsión (Berzosa, 2018)

- ***Floculantes en dispersión:*** este tipo de preparaciones son en apariencia líquidos, con los polímeros concentrados en una fase acuosa pero salada. En este caso, el fabricante prepara altas concentraciones del polímero, el cual viene protegido por un material, que al ser preparado permite el inicio de la extensión (maduración) del componente activo.



**Figura 5** Composición genérica de floculantes en dispersión (Berzosa, 2018)

#### 4.1 Clasificación de los floculantes

Existe una gran diversidad de criterios para clasificar los floculantes, los cuales también son aspectos que influyen en los procesos de selección de productos para aplicaciones específicas. Entre los principales aspectos que diferencian a los floculantes es posible citar los siguientes (Berzosa, 2018):

a) Forma física:

- Líquidos
- Sólidos (granulares, polvo).
- Emulsiones o dispersiones.

b) Tipo de carga eléctrica:

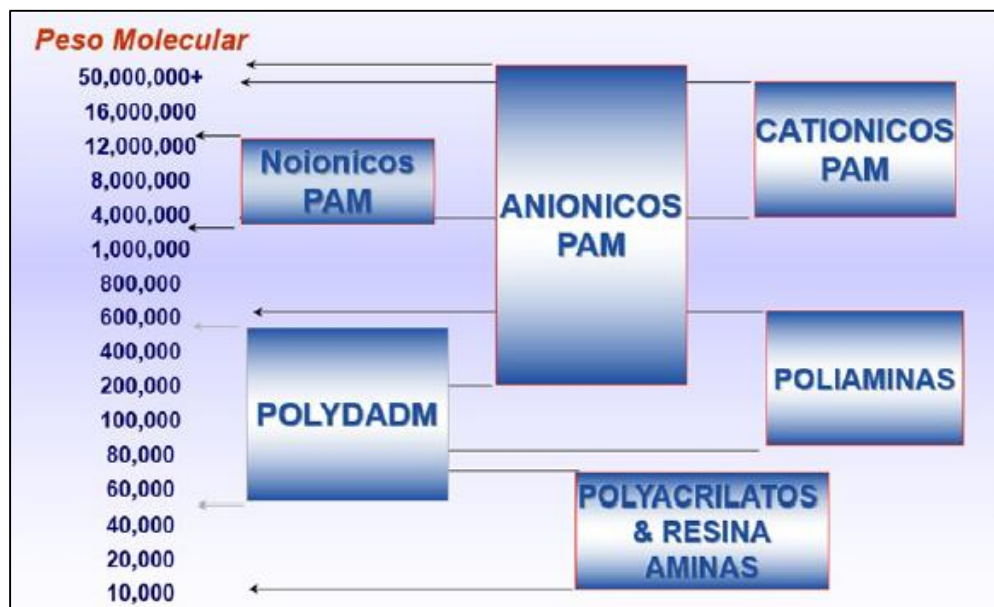
- Catiónicos.
- Aniónicos.
- No iónicos.
- Anfóteros.

c) Estructura química:

- Lineal.
- Ligeramente estructurados, también conocido como ramificado.
- Altamente estructurados (forma aleatoria, estrella, dentado, muy ramificado), también conocido como reticulado.

d) Peso molecular:

- Bajo (< 100 000)
- Medio (100 000 – 500 000)
- Alto (500 000 – 6 000 000)
- Muy alto (6 000 000 – 50 000 000 +)



**Figura 6** Distribución de las principales familias de productos según su peso molecular (Berzosa, 2018)

e) Densidad de carga eléctrica: es el porcentaje (molar) de monómeros en la molécula que poseen una carga eléctrica. Se expresa en un intervalo de 1 al 100% aniónica o catiónica.

f) Porcentaje de polímero activo:

- Líquidos: bajo 5 a 40%
- Emulsiones: medio 30 a 50%
- Sólidos: alto 85 a 95%

g) Constitución del polímero:



- Homopolímero: un solo monómero.
- Copolímero: con dos monómeros (al azar, alternados, en grupos, ramificados).
- Terpolímero: con tres monómeros.

Un aspecto importante es que, conforme más estructurado sea el polímero, es posible que existan cargas con alta disponibilidad para participar en la remoción de partículas y formación de flóculos. No obstante, por la complejidad de las moléculas, también se puede presentar una gran cantidad de cargas no-disponibles, cuyo efecto se pierde. Esto podría repercutir en una mayor dosis de producto. De ahí que es fundamental la realización de ensayos preliminares antes de seleccionar las variables definitivas para los procesos unitarios.

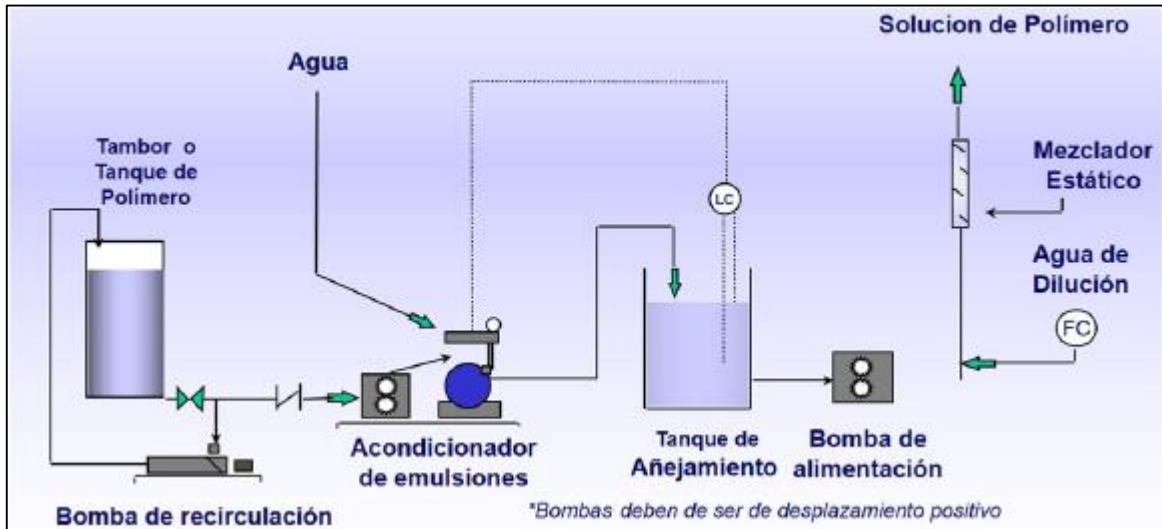
## 5. Preparación y dosificación de polímeros

La técnica de preparación varía según las características del producto a emplear. Según Berzosa (2018), en el caso de los coagulantes (líquidos), no se requiere tiempo para maduración, pero sí se necesita muy buena agitación para lograr que todo el producto se disperse adecuadamente. Por el contrario, los floculantes sí requieren tiempo de maduración, junto con una muy buena agitación para lograr que todo el producto se disperse adecuadamente. Cuando se trata de polvos y perlas, se requiere un tiempo de maduración aún mayor. Los tiempos más comunes para maduración se presentan en el cuadro 4.

**Cuadro 4** Tiempos de maduración recomendados para las principales presentaciones de los floculantes (Berzosa, 2018)

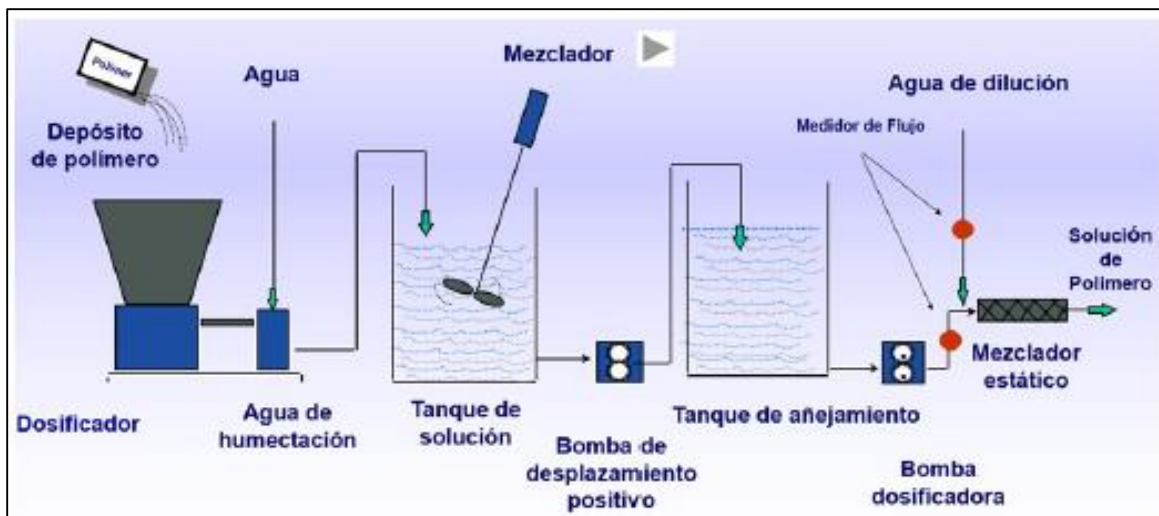
Presentación	Tiempo de maduración (min)
Dispersión	10 – 20
Emulsión	20 – 35
Perlas	30 – 40
Polvo	60 – 120

Los equipos para preparación de este tipo de sustancias son ampliamente conocidos en el mercado costarricense. Aunque pueden presentar pequeñas variaciones entre sí, los principales esquemas son los que se muestran en las figuras 7 y 8. En el caso de preparación a partir de emulsiones o dispersiones, solamente se utiliza un recipiente intermedio, enfocado a la maduración del producto.



**Figura 7** Esquema típico para preparación de polímeros a partir de una emulsión o dispersión (Berzosa, 2018)

No obstante, la preparación del polímero a partir de presentaciones sólidas, requiere de la preparación inicial de una solución de trabajo, para posteriormente ofrecer condiciones para maduración en un punto posterior. Los mecanismos de control automático, calidad de materiales, y tipos de equipos pueden variar de un fabricante a otro. Asimismo, la elección de la presentación del producto “madre” tiene fuertes consideraciones económicas y otras relacionadas con las capacidades operativas y de mantenimiento del personal a cargo.



**Figura 8** Esquema típico para preparación de polímeros a partir de presentación sólida (Berzosa, 2018)

La calidad del agua para la preparación de productos cumple un papel primordial en el desempeño de los mismos. Es común encontrar casos en que algunos iones



presentes en el agua reaccionan con las cargas de los polímeros, minimizando su desempeño. Esta condición podría representar incluso un incremento de costos; por ello siempre se aconseja emplear la mejor calidad de agua disponible.

Según el detalle anterior, Berzosa (2018) hace una recopilación de algunas condiciones que se deben evitar en la calidad del agua empleada para preparación de los productos químicos en cuestión:

- Alta conductividad o alta concentración de sólidos disueltos (pueden reaccionar de manera no deseada con las cargas de los polímeros).
- Agua dura o muy dura (influye en la maduración de las cadenas poliméricas).
- Alta concentración de cloro u otros agentes oxidantes (tienden a romper las cadenas poliméricas).

Ahora bien, una vez preparada una solución del producto químico deseado, es necesario valorar qué tan estable permanece a lo largo del tiempo. Tal y como se muestra en el cuadro 5, los coagulantes típicos se pueden preparar para ser empleados en menos de 24 horas. En caso contrario, es posible perder parte de su eficiencia al ser aplicados en los procesos de tratamiento.

**Cuadro 5** Condiciones de estabilidad para coagulantes comunes (Berzosa, 2018)

Propiedad	Coagulantes	
	Poliaminas	PolyDADMAC
Concentración	1%	1%
Estabilidad observada	< 24 h	< 24 h

En el caso de los floculantes, es posible encontrar diferencias significativas, según el tipo de carga del que se trate. En el caso de los aniónicos (ver cuadro 6) es posible encontrar estabilidad para periodos de incluso varios días. Conforme mayor es la concentración de la preparación, mayor será el tiempo de estabilidad.

**Cuadro 6** Condiciones de estabilidad para floculantes aniónicos (Berzosa, 2018)

Propiedad	Polvo		Emulsión	
	1 g/l	5 g/l	1 g/l	5 g/l
Concentración	1 g/l	5 g/l	1 g/l	5 g/l
Estabilidad observada	24 – 48 h	8 d	8 h	8 d

Para los productos de naturaleza catiónica, existe un tiempo de estabilidad menor. Es común encontrar que familias de compuestos, como las poliácridamidas catiónicas, enfrente fenómenos de degradación y pérdida de propiedades en intervalos de tiempo que pueden ser tan cortos como incluso unos cuantos minutos.



Al igual que en el caso de los floculantes aniónicos, conforme se incrementa la concentración de la preparación, se aumentan los tiempos de estabilidad respectivos.

**Cuadro 7** Condiciones de estabilidad para floculantes catiónicos (Berzosa, 2018)

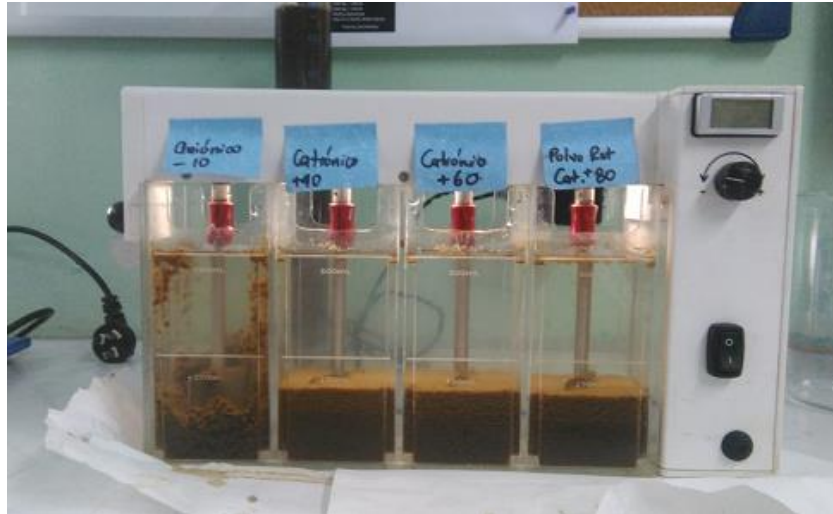
Propiedad	Agua blanda				Agua dura			
	Polvo		Emulsión		Polvo		Emulsión	
Concentración	1 g/l	5 g/l	1 g/l	5 g/l	1 g/l	5 g/l	1 g/l	5 g/l
Estabilidad observada	4 h	24 h	1 h	8 h	50% Pérdida eficiencia	30% Pérdida eficiencia	10 min	30 min

## 6. Pruebas experimentales para selección y escalamiento

La correcta selección de un coagulante o floculante para procesos de tratamiento de agua, conlleva la adquisición de conocimiento en la materia y la comprensión de elementos tales como el funcionamiento de la tecnología en que se aplicará e incluso las condiciones del sitio respectivo. Específicamente, existe una gran influencia del mecanismo de separación sólido-líquido que se desee emplear. Los más comúnmente usados son: gravedad, flotación, filtración y centrifugación.

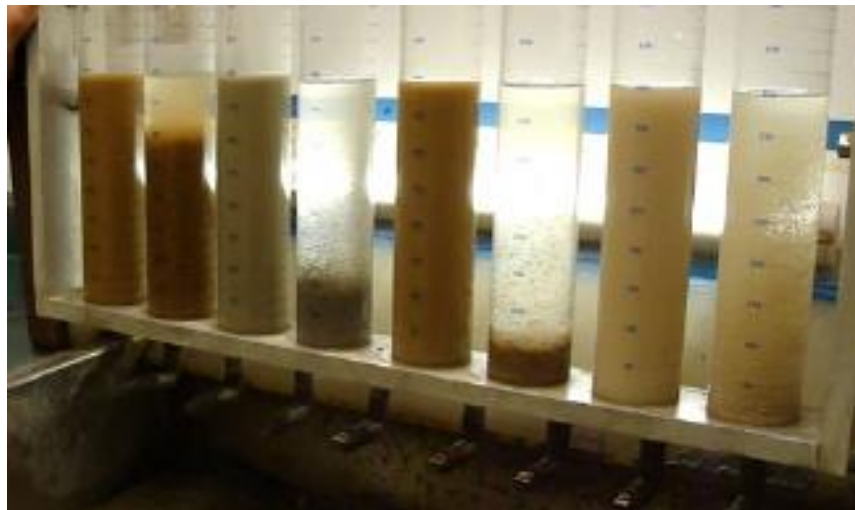
De acuerdo con las formulaciones empleadas, es posible generar flóculos con diversas características que podrán llegar a favorecer un proceso bajo condiciones muy particulares. Con este fin, y según experiencia adquirida por la UEN Investigación y Desarrollo en el campo de la deshidratación de lodos residuales, es posible recomendar la aplicación de procedimientos tales como:

- a) Prueba de jarras: por medio de este ensayo es posible explorar, de manera preliminar, las propiedades necesarias en los coagulantes y floculantes para cada proceso de tratamiento. Es posible realizar una selección preliminar en términos de factores tales como: forma física, carga eléctrica, estructura química, peso molecular, dosis óptima, comportamiento y tamaño del flóculo, etc.



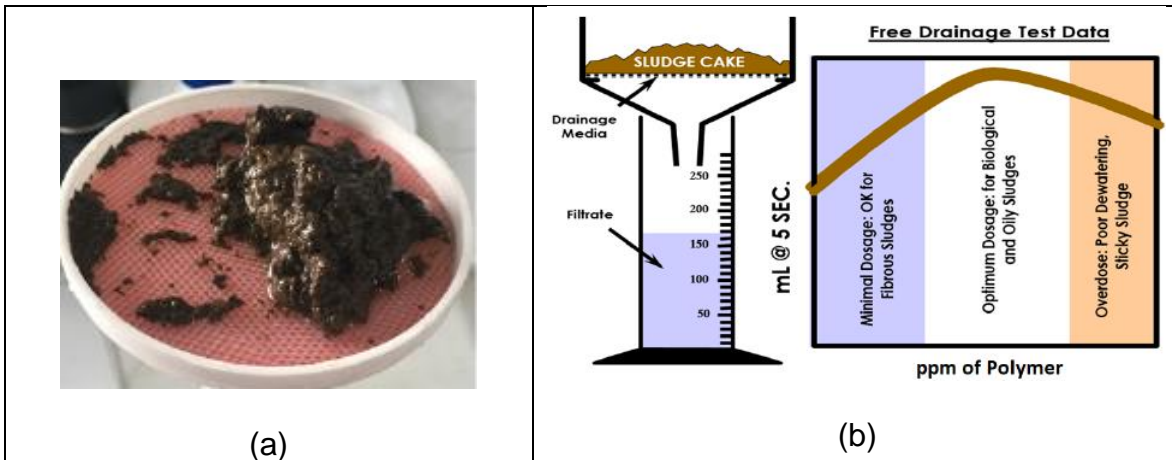
**Figura 9** Prueba de jarras para pre-selección de productos para deshidratación de lodos residuales (Elaboración propia).

- b) Ensayos de sedimentación: por medio de este ensayo es posible elaborar curvas de sedimentación para las distintas formulaciones que se consideren como las más adecuadas para un determinado tipo de lodo residual. Esto permite verificar parámetros de diseño, además de que permite valorar de manera preliminar la mejor forma de disponer el fluido sobrenadante del proceso.



**Figura 10** Ensayos de sedimentación para pre-selección de productos para deshidratación de lodos residuales (Elaboración propia).

- c) Ensayos de drenaje libre: por medio de este ensayo es posible elaborar curvas para verificar, para un determinado intervalo de dosis óptimas, las condiciones de drenaje libre del sólido separado dentro de la matriz del fluido.



**Figura 11** Ensayos de drenaje libre para pre-selección de productos para deshidratación de lodos residuales: a) apariencia del lodo en la prueba; b) desarrollo de la prueba (Elaboración propia).

Finalmente, es importante recalcar que las pruebas preliminares por aplicar deben ser definidas con base en el objetivo final del proceso de tratamiento de agua planteado por el diseñador de la solución. No existe una única forma de valorar todos los procesos disponibles en el mercado, pero sí es factible generar protocolos acordes con la necesidad específica. A pesar de la posibilidad de generar parámetros de diseño aplicables a diversas situaciones, es necesario realizar una valoración integral de cada problemática.

## 7. Referencias

- Arboleda, J. *Teoría y práctica de la purificación del agua*. 3ª edición. Bogotá: Mc-Graw Hill Inc. (2000)
- Berzosa, M. *Fundamentos teóricos sobre polímeros solubles en agua*. Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados: Generación de criterios técnicos y prácticos para la deshidratación de lodos residuales en plantas potabilizadoras (2018CDS-00060-PRI). (2018)
- Crittenden, R. *MHW's water treatment: principles and design*. 3a edición. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. (2012)
- Letterman, R. *Water quality and treatment: a handbook of community water supplies*. 5a edición. McGraw-Hill, Inc. Estados Unidos: American Water Works Association. (1999)
- Hendricks, D. *Fundamentals of Water Treatment Unit Processes*. CRC Press, IWA Publishing. Estados Unidos. (2011)

- World Health Organization (WHO). *Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum*. Geneva: WHO. (2017)

Colaboradores:

<p style="text-align: center;">Ing. Natasha Rojas Valladares <b>-Área funcional Investigación Aplicada-</b></p>	<p style="text-align: center;">Tec. Everardo Gutiérrez Solano <b>-Dirección Plantas Potabilizadoras GAM-</b></p>
<p style="text-align: center;">Ing. Rodolfo Araya Álvarez <b>-Área funcional Investigación Aplicada-</b></p>	<p style="text-align: center;">Tec. Rafael Orozco Campos <b>-Área funcional Investigación Aplicada-</b></p>
<p style="text-align: center;">Lic. David Cambronero Bolaños <b>-Laboratorio Nacional de Aguas-</b></p>	<p style="text-align: center;">Tec. Carlos Sanabria Gómez <b>-Dirección Plantas Potabilizadoras GAM-</b></p>
<p style="text-align: center;">Ing. Óscar Ramírez Sánchez <b>-Dirección Plantas Potabilizadoras GAM-</b></p>	<p style="text-align: center;">Ing. Henry Méndez Rojas <b>-Dirección Plantas Potabilizadoras GAM-</b></p>
<p style="text-align: center;">Ing. Mauricio Brenes Jiménez <b>-Dirección Plantas Potabilizadoras GAM-</b></p>	<p style="text-align: center;">-</p>

## 8. Información adicional

Ing. Andrés Lazo Páez  
alazo@aya.go.cr  
Director Investigación Aplicada  
Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados