



Publicación Cuatrimestral. Vol. 8, No 2, Mayo/Agosto, 2023, Ecuador (p. 49-67). Edición continua

<https://revistas.utm.edu.ec/index.php/Basedelaciencia/index>

[revista.bdlaciencia@utm.edu.ec](mailto:revista.bdlaciencia@utm.edu.ec)

Universidad Técnica de Manabí

DOI: <https://doi.org/10.33936/revbasdelaciencia.v8i2.5851>

## INCRUSTACIONES EN LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE. FORMACIÓN Y MÉTODOS DE INHIBICIÓN

Jesús Miguel Contreras-Ramírez<sup>1\*</sup>, Jesús Javier Nieves-Rivas<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Los Andes, Mérida-Venezuela. Facultad de Ciencias. Departamento de Química E-mail.

[jecoraster@gmail.com](mailto:jecoraster@gmail.com).

<sup>2</sup>Grupo J&P, C.A, El Tigre, Anzoátegui, Venezuela. Email. [Serviproyecnr@gmail.com](mailto:Serviproyecnr@gmail.com)

\*Autor para correspondencia: [jecoraster@gmail.com](mailto:jecoraster@gmail.com)

Recibido: 7-6-2023 / Aceptado: 16-8-2023 / Publicación: 31-8-2023

Editor Académico: Jean Carlos Pérez Parra

### RESUMEN

La cal u otras sales se encuentran en su forma disuelta en casi todas las aguas. En el lenguaje común, los carbonatos de calcio y de magnesio le confieren dureza al agua. Técnicamente hablando, dependiendo de la temperatura del agua, los minerales/sales disueltas comienzan a precipitar, formando incrustaciones en las superficies. La incrustación puede ser causada por muchas sales diferentes, pero una de las sales que forman escamas más comunes es el carbonato de calcio. La incrustación causa muchos problemas, tales como taponamiento del equipo, transferencia de calor limitada y caudales reducidos en muchos procesos industriales que utilizan grandes cantidades de agua. La inhibición de la incrustación se puede conseguir con aditivos químicos a los que se suele denominar inhibidores de incrustaciones. Los compuestos antiincrustación más comunes son inhibidores a base de fosfato, fosfonato y policarboxilato. En este artículo de revisión se resumió el concepto de incrustaciones, varios inhibidores de incrustaciones, mecanismos, rendimiento comparativo, conceptos que podrían ser de utilidad para los profesionales que trabajan en la industria petrolera e industrias del gas.

**Palabras clave:** incrustación, inhibición, polifosfatos, fosfonatos, policarboxilato.

## SCALE IN DRINKING WATER SUPPLY SYSTEMS. TRAINING AND INHIBITION METHODS

### ABSTRACT

Lime or other salts are found in their dissolved form in almost all waters. In common parlance, calcium and magnesium carbonates make water hard. Technically speaking, depending on the water temperature, the dissolved minerals/salts start to precipitate, forming scale on the surfaces. Scale can be caused by many different salts, but one of the most common scaling salts is calcium carbonate. Scale causes many problems, such as equipment plugging, limited heat transfer, and

reduced flow rates in many industrial processes that use large amounts of water. Scale inhibition can be achieved with chemical additives often referred to as scale inhibitors. The most common antifouling compounds are phosphate, phosphonate and polycarboxylate based inhibitors. This review article summarized the concept of scale, various scale inhibitors, mechanisms, comparative performance, concepts that might be of use to professionals working in the oil and gas industries.

**Keywords:** scale, inhibition, polyphosphates, phosphonates, polycarboxylate.

## INCRUSTAÇÕES EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA POTÁVEL. COMO SE FORMA E MÉTODOS DE INIBIÇÃO

### RESUMO

A cal ou outros sais são encontrados na sua forma dissolvida em quase toda as águas. Na linguagem comum, os carbonatos de cálcio e magnésio tornam a água dura. Tecnicamente falando, dependendo da temperatura da água, os minerais/sais dissolvidos começam a precipitar, formando incrustações nas superfícies. A incrustação pode ser causada por muitos sais diferentes, mas um dos sais de incrustação mais comuns é o carbonato de cálcio. A incrustação causa muitos problemas, como entupimento de equipamentos, transferência limitada de calor e taxas de fluxo reduzidas em muitos processos industriais que utilizam grandes quantidades de água. A inibição de incrustações pode ser alcançada com aditivos químicos frequentemente chamados de inibidores de incrustações. Os compostos anti-incrustantes mais comuns são os inibidores à base de fosfato, fosfonato e policarboxilato. Este artigo de revisão resumiu o conceito de incrustações, vários inibidores de incrustações, mecanismos, desempenho comparativo, conceitos que podem ser úteis para profissionais que trabalham nas indústrias de petróleo e gás.

**Palavras-chave:** incrustação, inibição, polifosfatos, fosfonatos, policarboxilato.

Citación sugerida: Contreras, J., Nieves, J. (2023). **INCRUSTACIONES EN LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE. FORMACIÓN Y MÉTODOS DE INHIBICIÓN.** Revista Bases de la Ciencia, 8(2), 49-67. DOI: <https://doi.org/10.33936/revbasdelaciencia.v8i2.5851>





## 1. INTRODUCCIÓN

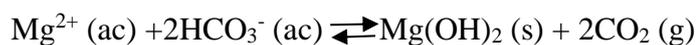
Los componentes que se encuentran en las aguas naturales son muy variables porque van a depender del medio y de la zona geográfica donde provenga la fuente (Canales, 2015). El inconveniente que se presenta desde el punto de vista del tratamiento de agua es que algunos de los componentes presentes en estas son impurezas que causan serios problemas durante el uso final o disposición final del agua (domestica, potable, industrial, reinyección, etc.); generando incrustaciones u óxidos en los sistemas por donde esta fluye. Al referirse al término “incrustación” es importante recordar que las aguas que contienen un alto nivel de minerales son conocidas como aguas duras. Con excepción del sodio y del potasio, todos los cationes, y particularmente el calcio (Ca) y el magnesio (Mg), le proporcionan dureza, pero generalmente su presencia es tan pequeña que siempre son ignoradas. Bajo condiciones de altas temperaturas y altos pH, las sales de Ca y Mg son insolubles, motivo por el que sobre la superficie expuesta en equipos de intercambio de calor son formados depósitos minerales, los cuales ocasionan resistencia a la transferencia de calor y obstrucción del diámetro interno de tuberías por donde fluye el líquido caliente, por tanto, dichos depósitos deben ser eliminadas. Estos depósitos minerales son conocidos como incrustaciones calcáreas (Crabtree et al., 1999).

Normalmente se tiende a asociar las incrustaciones calcáreas únicamente con el calcio presente en el agua y generalmente todas las incrustaciones están constituidas por sales tanto de Ca como de Mg, dos metales que en sí mismo son saludables para el cuerpo humano; sin embargo, lo que es beneficioso para el organismo, se transforma rápidamente en un problema de incrustaciones debido a los depósitos calcáreos que se sedimentan en las tuberías de aguas potables y en las máquinas y en las superficies de la casa (Purewater, 2019) (**Figura 1**).



**Figura 1.** Depósito calcáreo en una tubería de agua potable. (Fuente: Wikipedia).

**1. Formación de las incrustaciones:** los iones que intervienen en la formación de las incrustaciones calcáreas son el calcio y el magnesio, así como el ion bicarbonato, los cuales presentan un equilibrio químico, que en determinadas condiciones puede conducir a la formación de un precipitado, que en el caso del calcio es carbonato cálcico mientras que en el caso del magnesio es el hidróxido de magnesio (Iteli, 2019; Pure water, 2019):



Una vez que el agua dura comienza a circular por un tubo (como los de un radiador de vehículo, los tubos de producción o transporte de petróleo) o sobre alguna superficie (como las paredes de la ducha), ocurre la pérdida de  $\text{CO}_2$  con la consiguiente sobresaturación en carbonatos, el exceso de  $\text{CaCO}_3$  y de  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  puede precipitar. La precipitación ocurre en forma de pequeños aglomerados fangosos o depositarse en capas duras estratificadas sobre las superficies de las tuberías o paredes, produciendo la incrustación (CIDTA, 2019).

La formación de una incrustación inorgánica puede ocurrir en cualquier punto de un sistema de producción (ej. formación productora, aparejo de producción, líneas de transporte o tuberías) cuando ciertas especies químicas en solución alcanzan su límite de saturación, debido a la alteración en su estado termodinámico o equilibrio químico, ante cambios de presión, temperatura o mezclado de dos aguas incompatibles. Por lo general, un incremento de la temperatura provoca el aumento de la solubilidad de un mineral en el agua: más iones se disuelven a temperaturas más elevadas. En forma similar al descender la presión, la solubilidad tiende a disminuir (Crabtree et al., 1999). Sin embargo, el carbonato de calcio presenta la tendencia inversa, es decir que la solubilidad en agua aumenta cuando las temperaturas disminuyen. Las incrustaciones suelen formarse especialmente en lugares con altas temperaturas, tales como calefactores, calderas y radiadores; la formación de estos cristales es proporcional al incremento de temperatura (Medina & Zea, 2008).

**2. Problemas frecuentes generados por las incrustaciones:** las incrustaciones pueden provocar problemas técnicos, tales como:

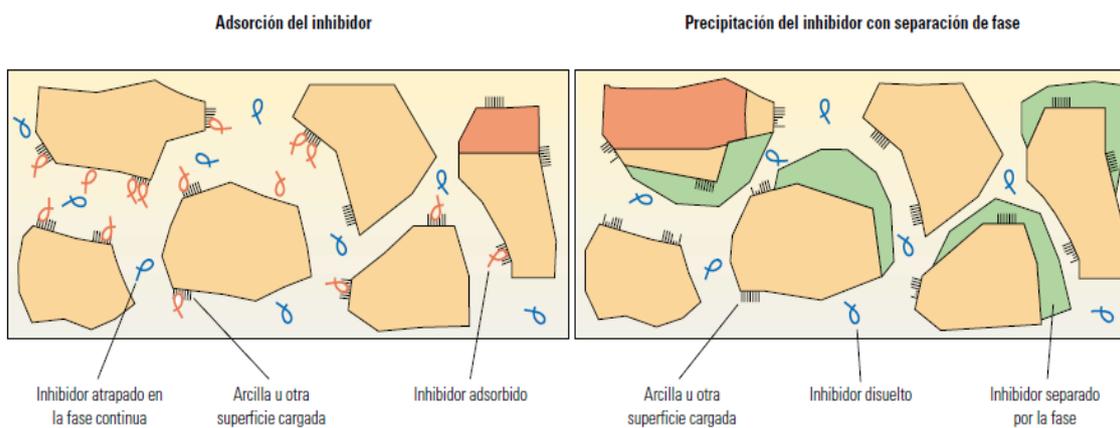
- Obstrucción de tuberías (Chaussemier et al., 2015).
- Disminución de la calidad del agua (Chen & Chen, 2022).
- Pérdida de presión del agua por la reducción del diámetro interno de la tubería (Fqchemicals, 2018).
- Desarrollo de bacterias sobre las incrustaciones, sobre todo en las aguas potables (De Sousa et al., 2010).



- Incremento de presión hasta llegar a posibles explosiones en calderas de vapor y calentadores (Doelman, 2014).
- Gastos elevados por mantenimiento (Chemtech International, 2022).
- Reducción de la productividad de algún proceso (Castro & Gamez, 2009).

En el caso de la industria petrolera, las incrustaciones de pozos en producción y los equipos de superficie constituyen uno de los principales problemas para las operaciones industriales. Los resultados de depósitos de incrustaciones son: diferimiento de la producción, problemas con la inyección de agua, disminución de la transferencia de calor, restricciones del flujo (incremento de presión), corrosión por celdas de concentración, trabajos de reacondicionamiento de pozos debido a reducción en la producción, reparación y mantenimiento de los equipos de superficie, consumo de aditivos químicos para la limpieza de los equipos incrustados (León et al., 2014).

**3. Métodos utilizados para la remoción e inhibición de las incrustaciones:** Crabtree et al., (1.999) en su trabajo sobre “La lucha contra las incrustaciones”, hace un enfoque particular hacia el sector petrolero, del cual documenta que en las incrustaciones minerales que se producen en los campos petroleros, el agua juega un papel fundamental, dado que el problema se presenta sólo cuando existe producción de agua. Crabtree et al., (1999) también comenta en su trabajo sobre las alternativas de eliminación de las incrustaciones usadas hasta el momento, entre las cuales se tiene las técnicas químicas: que es por lo general el primer sistema que se utiliza y el más económico, en especial cuando las incrustaciones no son de fácil acceso o se encuentran en lugares donde los métodos mecánicos de limpieza convencionales resultan poco efectivos o es muy costoso transportarlos. Por otra parte, se tienen los métodos mecánicos convenciones; sin embargo, la mayor parte de los métodos mecánicos presentan un rango limitado de aplicabilidad, de manera tal que la selección del método correcto dependerá del pozo y del tipo de incrustación. La vida útil del tratamiento depende fundamentalmente de la química de la superficie, la temperatura y el pH del líquido que se encuentra en contacto con la formación, y es inusualmente corta (de 3 a 6 meses), debido a que la absorción de las rocas de formación es limitada bajo las condiciones del yacimiento. En la **Figura 2** se observan los mecanismos de absorción del inhibidor de incrustación en el sistema (yacimiento).



**Figura 2.** Adsorción y precipitación del inhibidor de incrustación en un medio de areniscas en el pozo. (Fuente: Crabtree *et al.*, 1999).

Existen cuatro métodos químicos de control de incrustaciones comúnmente utilizados:

**3.1. Acidificación:** la adición de ácidos destruye los iones de carbonato, removiendo uno de los reactivos necesarios que permiten la precipitación de carbonato de calcio. La acidificación es muy efectiva para prevenir la precipitación de carbonato de calcio, pero muy ineficaz para prevenir otros tipos de incrustaciones. La principal desventaja de trabajar con tratamientos de remoción química basada en ácidos o álcalis es la aparición temprana de corrosión en las tuberías, por lo cual después de realizar este tipo de tratamientos es necesario inyectar inhibidores de corrosión (Cabrera & Losada, 2010).

**3.2. Ablandamiento por intercambio iónico:** este método utiliza el sodio que es intercambiado por iones de magnesio y calcio, concentrados en el agua de alimentación del sistema de Ósmosis Inversa, siguiendo las ecuaciones químicas:



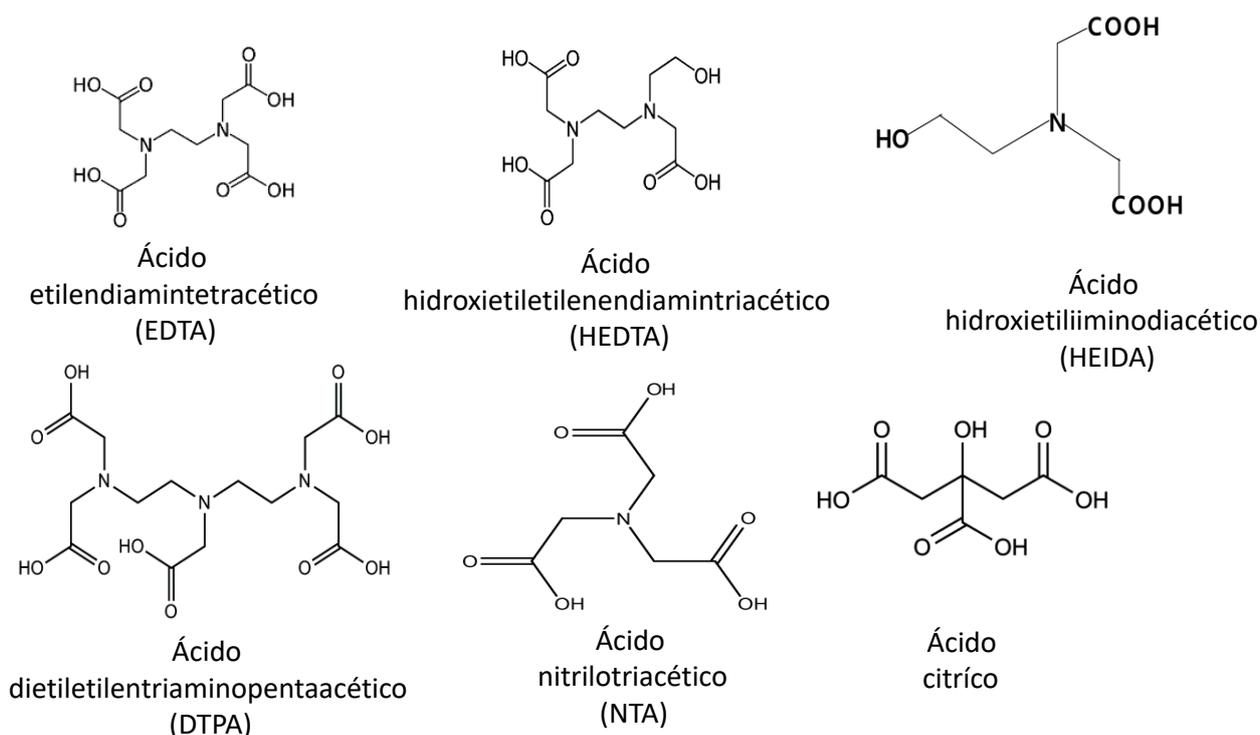
(NaZ representa la resina de intercambio de sodio).

Cuando todos los iones de sodio han sido reemplazados por calcio y magnesio, la resina debe ser regenerada con una solución salina. El ablandamiento por intercambio iónico elimina la necesidad de alimentación continua de ácido y/o inhibidores de incrustación (Dardel, 2021).

**3.3. Aplicación de agentes quelantes:** La quelación es el proceso por el cual un compuesto químico forma complejos solubles con iones metálicos. Los agentes quelantes, también conocidos como antagonistas o secuestradores de metales pesados, son sustancias que promueven formación de enlaces múltiples con un único ion metálico para formar un complejo (Flora *et al.*, 2015). Cuando el agente quelante se une con un metal se forma un compuesto, el cual se conoce como quelato. Este



quelato tiene una mayor solubilidad en agua y mayor estabilidad en comparación con el metal libre, gracias a lo cual se puede eliminar de la fórmula con más facilidad (Bonvin *et al.*, 2017). Las estructuras usadas comúnmente en la industria petrolera son mostradas en la **Figura 3**.



**Figura 3.** Estructura de los agentes quelantes. (Fuente: Canul et al., 2015).

**3.4. Adición de inhibidores de incrustación:** los inhibidores de incrustaciones son productos químicos especiales que se agregan en cantidades mínimas (20-200 ppm) a los sistemas de abastecimiento de agua para retrasar, reducir y/o prevenir la deposición de incrustaciones (Keland, 2014; Bai & Bai, 2019). El proceso de inhibición química involucra la adsorción preferencial de las moléculas del inhibidor en los lugares de crecimiento de la incrustación. En consecuencia, el cristal dejará de desarrollarse cuando las moléculas del inhibidor hayan ocupado todas estas zonas activas. Los inhibidores actúan controlando la deposición de la incrustación mediante la interacción química con los sitios de nucleación de cristales y reducen de manera sustancial las tasas de desarrollo de estos, alterando sus superficies, (inhibidores de iniciación). También actúan secuestrando los iones que precipitan y forman la incrustación (Cabrera & Losada, 2010; Gonzáles, 2012).

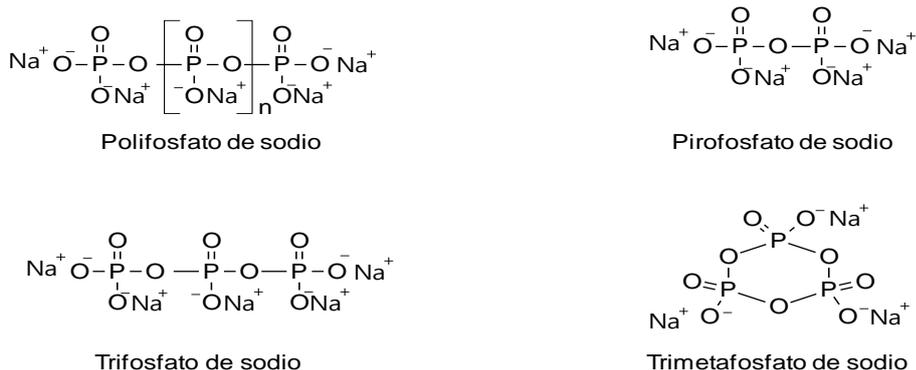
Un inhibidor de incrustaciones debe satisfacer varias condiciones para tener una utilidad prolongada, entre ellas (Gonzáles, 2012):

- Ser compatible (no formar productos de reacción con otros químicos del sistema lo que conduce a su inactivación).
- Ser estable térmicamente (en especial a las condiciones de fondo de pozo) e hidrolítica para plazos largos.
- Bacteriológicamente no sensible.
- Modificar el tamaño de los cristales (formar tendencia a dispersarse).
- Retrasar o bloquear los procesos de precipitación de escala a una baja concentración.
- No debe promover emulsiones.
- En los fluidos de retorno debe ser monitoreable.

Por otra parte, atentan contra la eficiencia máxima del inhibidor (González, 2012):

- La salinidad y pH del agua que entra en contacto con el inhibidor.
- La composición química del agua, el contenido de magnesio del agua y hierro disuelto deben ser bajos.
- La presencia y el tipo de sólidos en suspensión (el inhibidor, todavía no es "inteligente" y actúa en todo insoluble que viaje en el medio).
- La temperatura del sistema.

**3.4.1- Tipos de inhibidores de incrustaciones:** Los inhibidores de incrustaciones pueden clasificarse como orgánicos e inorgánicos. Los inorgánicos incluyen fosfato condensado, como poli(metafosfato) o sales de fosfato (**Figura 4**).



**Figura 4.** Inhibidores de incrustación inorgánicos. (Fuente: Nieves, 2016).

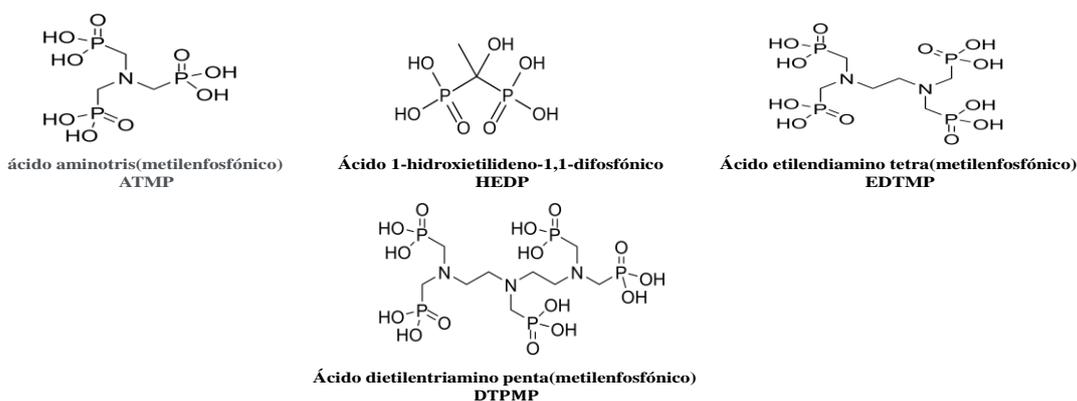
Estos compuestos sufren hidrólisis y pueden precipitar como fosfatos de calcio debido a la temperatura, pH, calidad de la solución, concentración, tipo de fosfato y la presencia de algunas enzimas (Fink, 2015). El fósforo es uno de los elementos responsables de la eutrofización del agua, por tanto, la creciente conciencia social y preocupación por el medio ambiente, y por el estado de las



aguas naturales han sido la principal fuerza impulsora para buscar aditivos antiincrustantes distintos de los fosfatos (Zahran et. Al, 2016).

Por otra parte, los inhibidores de incrustaciones orgánicos son:

*-Fosfonatos orgánicos:* son compuestos orgánicos organofosforados que pueden considerarse formalmente como las sales o los ésteres del ácido fosforoso ( $H_3PO_3$ ), son ampliamente usados para inhibir incrustaciones de  $CaCO_3$  (Rojas, 2013; Baraka-Lokmane & Sorbie, 2015). Los fosfonatos son agentes quelantes efectivos que se unen fuertemente a iones metálicos divalentes y trivalentes, evitando que formen precipitados insolubles. Cuando se aplican a los sistemas de agua, los fosfonatos ayudan a reducir la acumulación de incrustaciones en los equipos y las tuberías, reducen los efectos corrosivos del oxígeno en las superficies de acero inoxidable y previenen las averías de las tuberías y los equipos debido a la oxidación o la incrustación (Ritasa, 2016). Sin embargo, la mayoría de estos compuestos presentan varios inconvenientes, como baja biodegradabilidad e intolerancia con el sistema de producción. A medida que las regulaciones ambientales se vuelven más rígidas, los nuevos productos químicos de producción deben cumplir con ciertos criterios para calificar para su uso en la industria del petróleo y el gas, particularmente en áreas con regulaciones estrictas (Mady & Ortega, 2022). Las estructuras de los más usados en la industria petrolera son mostradas en la **Figura 5**.



**Figura 5.** Estructuras de los fosfonatos orgánicos más usados con inhibidores de incrustación en la industria petrolera. (Fuente: propia).

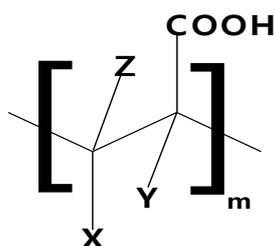
**-Polielectrolitos:** el efecto de los polielectrolitos en el tratamiento químico industrial para formulaciones de detergentes, floculantes o dispersantes de arcillas para cerámicas o pasta dental respectivamente y como inhibidores de incrustación en sistemas de aguas de alta dureza, es conocido desde hace más de 50 años (Nieves, 2016). Los polielectrolitos son polímeros con grupos ionizables. En disolventes polares, como el agua, estos grupos se ionizan por:

- Disociación (p. ej., carboxilo:  $-\text{COOH} \rightarrow \text{COO}^- + \text{H}^+$ )
- Asociación de protones (p. ej., amina:  $-\text{NH}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{NH}_3^+$ )

En cualquiera de estos dos procesos, también son producidos contraiones en la solución circundante, lo cual asegura la neutralidad del producto final (Livney, 2014; Alkahtani et al., 2020). La característica más importante de este tipo de macromoléculas es su solubilidad en agua, aun cuando algunos de ellos tengan en su esqueleto grupos hidrófobos (Dautzenberg et al., 1994).

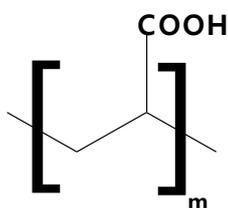
Los polielectrolitos tienen muchas aplicaciones en campos, tales como en el tratamiento de agua como agentes de floculación, en lodos cerámicos como agentes dispersantes y en mezclas de hormigón como superplastificantes. Además, muchos champús, jabones y cosméticos contienen polielectrolitos. Ciertos polielectrolitos también se agregan a los productos alimenticios, por ejemplo, como recubrimientos de alimentos y agentes de liberación (Budd, 2019). Los ejemplos de polielectrolitos incluyen policationes (o polibases), como quitosano (Muzzarelli & Muzzarelli, 2005; Makhlof et al., 2011); polilisina (Shih et al., 2006; Hiraki et al., 2003); polianfolitos, es decir, polímeros que llevan cargas tanto positivas como negativas, como la mayoría de las proteínas (Dobrynin et al., 2004); y polianiones (o poliácidos), como el ADN, policarboxilatos (Dobrynin, & Rubinstein, 2005).

En el caso de los policarboxilatos, estos son polímeros lineales que como su nombre lo indica contienen grupos carboxilato, y en sus aplicaciones son usados como la sal sódica de los mismos, lo que los hace solubles en agua (Xu et al., 2015). La estructura macromolecular lineal simple de estos materiales, en la cual solamente los grupos carboxílicos son considerados como característicos, en general, se muestra en la **Figura 6**.



**Figura 6.** Estructura general de la unidad monomérica de los policarboxilatos. (Fuente: elaboración propia).

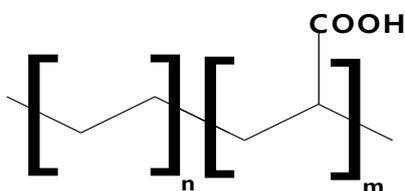
Siendo la estructura más sencilla, aquella en la que los sustituyentes X, Y y Z son hidrógenos, dando lugar al ácido poliacrílico (APA, **Figura 7**), en el cual el monómero correspondiente es el ácido acrílico (Zahran et al., 2016).



**Figura 7.** Estructura de la unidad monomérica del ácido poliacrílico. (Fuente: elaboración propia).

El ácido acrílico y sus ésteres son monómeros que se utilizan como unidades estructurales para un gran número de polímeros. Son líquidos inflamables y volátiles, reactivos, basados en una estructura de carboxilo alfa, beta-insaturada. La incorporación de proporciones variables de monómeros de acrilato permite la producción de muchas formulaciones de látex y de copolímeros en solución, resina de copolímero y polímeros reticulados. Sus propiedades en desempeño, que imparten diversos grados de pegajosidad, durabilidad, dureza y temperaturas de transición vítrea, promueven el consumo en muchas aplicaciones de uso final. Los principales mercados para los ésteres incluyen recubrimientos superficiales, textiles, adhesivos y plásticos. El APA o los copolímeros encuentran aplicaciones en detergentes, dispersantes, floculantes y espesantes y polímeros superabsorbentes, siendo estos últimos utilizados principalmente en pañales y toallas sanitarias desechables (Elbendar et al., 2019; Todo en Polímeros, 2019; S & P Global Commodity Insights, 2020).

La introducción de otras unidades monoméricas dentro de la cadena polimérica del APA, da lugar a copolímeros con diferentes densidades de carga en la cadena macromolecular. De este modo, un copolímero de menor densidad de carga es obtenido por copolimerización con etileno, dando lugar a la estructura mostrada en la **Figura 8**.

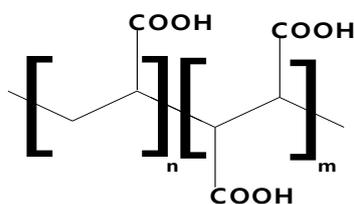


**Figura 8.** Estructura de las unidades comonoméricas del poli(etileno-co-ácido acrílico). (Fuente: elaboración propia).

Los copolímeros de etileno-ácido acrílico (EAA) se producen haciendo reaccionar etileno con ácido acrílico (Rünzi, Fröhlich, & Mecking, 2010). Los segmentos de etileno proporcionan propiedades tales como resistencia al agua, flexibilidad, resistencia química y flexibilidad. La presencia de ácido acrílico aporta polaridad, adhesión, tenacidad, resistencia a la adherencia en caliente y permite el

termosellado a baja temperatura. El aumento del contenido de ácido acrílico aumenta la adhesión a los sustratos polares, reduce las temperaturas de reblandecimiento y fusión, mejora la claridad y aumenta la resistencia. Los copolímeros de etileno-ácido acrílico se utilizan mucho en envases flexibles, como tubos laminados, bolsas y sobres de condimentos, envases asépticos, envases de carne y queso, así como recubrimientos metálicos protectores, alambre y cable y recubrimiento en polvo. El copolímero de ácido acrílico también ha encontrado uso en dispersiones acuosas, adhesivos de vidrio y formulaciones de tinta y pintura (Entec Polymers, 2023).

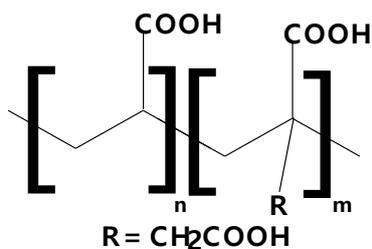
Por otra parte, la copolimerización con ácido maleico provoca un aumento en la densidad de carga del homopolímero de acrilato, obteniéndose los polímeros de poli(ácido acrílico-*co*-ácido maleico) con la estructura química que se presenta en la **Figura 9**:



**Figura 9.** Estructura de las unidades comonoméricas del poli(ácido acrílico-*co*-ácido maleico). (Fuente: elaboración propia).

El copolímero de ácido maleico y ácido acrílico es un polielectrolito de baja masa molar. Se prepara por copolimerización de ácido maleico y ácido acrílico (en una determinada proporción) (Liang et al., 2020). El copolímero de ácido acrílico y ácido maleico (AA-AM) tiene un excelente rendimiento dispersante de sales, como carbonatos y fosfatos. Cuando se usa con otros agentes de tratamiento de agua, este copolímero proporciona una excelente resistencia a la formación de incrustaciones (incluidos los fosfatos). Además, se usa como dispersante quelante en la industria de estampado y teñido de textiles (irowater, 2002).

También es posible la obtención de copolímeros del ácido acrílico y ácido itacónico, los cuales poseen estructuras ramificadas en la cadena polimérica con desplazamiento de los grupos carboxílico al extremo de la ramificación (Huang et al., 2002; Carrillo-Rodríguez et al., 2016; Tamareselvy et al., 2020; Olvera, 2021). En la Figura 10 se muestra las unidades estructurales de este copolímero:



**Figura 10.** Estructura de las unidades comonoméricas del poli(ácido acrílico-*co*-ácido itacónico). (Fuente: elaboración propia).



Este tipo de materiales han sido usados como cemento de ionómero de vidrio dental (Culbertson, 2006; León & Nizo, 2018; Abbasi et al., 2020; Balilvand et al., 2022), como detergente para lavavajillas y para el lavado de la ropa y un limpiador de superficies duras (Yang et al., 2012; Tamareselvy et al., 2020), y además ha sido usado como agente inhibidor de incrustaciones (Nieves, 2016).

En el caso de los policarboxilatos, la masa molar del polímero es un parámetro clave que determina la aplicación final del material (QuimiNet, 2012). La **Tabla 1**, presenta la aplicación que se le da a estos polímeros en función de su masa molar.

**Tabla 1.** Efecto de la masa molar de los policarboxilatos sobre la aplicación final de los mismos.

Masa molar (g/mol)	<20000	entre 20000 y 80000	Entre 1.000.000 y 10.000.000	>10.000.000	entre 2000 y 5000
Aplicación	secuestrante o agente quelante	agentes de dispersión de pigmentos	agentes para terminado textil y como ayudas de retención para fabricación de papel	floculantes o agentes de espesamiento	como inhibidores de sarro, dispersantes de lodos, dispersantes en sistemas de enfriamiento, como aditivo en materiales para pigmentos o recubrimiento de papel

**Fuente:** elaboración propia.

Como se puede notar en la **Tabla 1**, entre las aplicaciones que se le dan a los policarboxilatos de masa molar relativamente bajas (entre 2000 y 5000 g/mol), está la de inhibidores de sarro o incrustaciones. En este sentido, en 2002 fue reportada una investigación en la que fue evaluada de manera comparativa el comportamiento como inhibidores de incrustación de poliacrilatos con fosfonatos, polifosfonatos y diferentes mezclas de poliacrilatos con fosfonatos y polifosfonatos. Todos los materiales ensayados como inhibidores de incrustación alcanzan eficiencias de 100%; sin embargo, cuando se usó el poliacrilato la dosis empleada fue más baja respecto a la de los fosfonatos, lo que favorece la elección del primero debido a los bajos costos del tratamiento químico (López et al., 2002). Más adelante, en 2016 se realizó otro trabajo en el que se sintetizaron copolímeros entre ácido acrílico y ácido itacónico y se llevó a cabo el estudio comparativo de su capacidad como inhibidores de incrustación de estos copolímeros con el APA homopolímero. Los resultados obtenidos indican que los poliacrilatos homopolímeros resultan ser mejores inhibidores de incrustación que los copolímeros sintetizados (Nieves, 2016).

De este modo, el APA y el ácido polimaleico (APM) debido a su excelente solubilidad, estabilidad térmica y eficiencia de dosificación son los polímeros más comúnmente usados como inhibidores de incrustación en sistemas de agua (Amjad & Koutsoukos, 2014; Shakkthivel, & Vasudevan, 2006; Jamar, 2020). Estos compuestos no son biodegradables; sin embargo, a diferencia de los fosfonatos, no tienen acción eutrofizante (Popov et al., 2016).

**3.4.2. Evaluación comparativa del rendimiento de los inhibidores de incrustación:** cada año se desarrollan/sintetizan nuevos inhibidores de incrustaciones y se prueban periódicamente en plantas piloto y a escala de laboratorio antes de usarlos en plantas operativas reales. Estas sustancias son de sumo interés, ya que pueden contener la formación de incrustaciones con dosis bajas (generalmente por debajo de  $10 \text{ mg L}^{-1}$ ) y, por lo tanto, se consideran rentables (Matzunder, 2020). Los ingredientes activos de los antiincrustantes disponibles comercialmente son en su mayoría mezclas patentadas de varios policarboxilatos, polifosfatos condensados y organofosfonatos (Chaussemier et al., 2015; Turek et al., 2017). Los inhibidores inorgánicos de incrustaciones, a saber, hexametáfosfato, polifosfato, pirofosfato o ésteres de fosfato, y los compuestos orgánicos de fósforo (fosfonatos), son extremadamente frágiles en ambientes acuosos. Por lo tanto, generalmente se hidrolizan o reaccionan con el agua para formar un ortofosfato que resulta ineficiente como antiincrustante (Mady & Ortega, 2022). Por otro lado, existe una preocupación particular acerca de los inhibidores a base de fósforo, que pueden funcionar como suplementos y provocar dificultades de eutrificación (Lattemann & Höpner, 2008). Por tal motivo, los polifosfatos han sido, en gran medida, suplantados por diferentes polímeros basados en ácidos carboxílicos (APA, APM, etc.), los cuales son estables a altas temperaturas de trabajo y entornos químicos y biológicos rigurosos (Hasson et al., 2011).

#### 4. CONCLUSIONES

Las incrustaciones son las deposiciones que se forman en superficies en contacto con el agua como resultado de cambios físicos o químicos. Estas incrustaciones están principalmente formadas por sales de Ca y de Mg, las cuales son insolubles bajo condiciones de altas temperaturas y alto pH. La formación de incrustaciones crea problemas operativos en la industria de los yacimientos petrolíferos, como el bloqueo de las líneas de flujo y la reducción del diámetro de los tubos. Gran cantidad de trabajos han sido propuestos por investigadores que utilizan diferentes métodos para resolver el problema, de los cuales la inhibición de incrustaciones es uno de ellos. A partir de los resultados obtenidos, se ha determinado que la inhibición de incrustaciones se puede lograr mediante la adición de sustancias que reaccionan con sustancias potencialmente formadoras de incrustaciones, de modo que, desde el punto de vista de la termodinámica se alcanza la región estable o mediante la adición de sustancias que suprimen el crecimiento de cristales. Los inhibidores de incrustaciones



(polifosfatos, polímeros basados en ácidos carboxílicos, ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), etc.) pueden solucionar eficazmente las incrustaciones de los yacimientos petrolíferos, muchas de las cuales son tóxicas y expansivas. Los inhibidores de incrustaciones que contienen fósforo son altamente eficientes en el proceso de inhibición a pesar de su toxicidad. Sin embargo, los inhibidores a base de fósforo pueden servir como suplementos que provocan dificultades de eutricación del agua. Los inhibidores de incrustaciones poliméricos son ampliamente utilizados debido a su estabilidad térmica mejorada y mejor compatibilidad ambiental.

## 5. DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERÉS DE LOS AUTORES

Los autores declaran no tener conflictos de interés en la presente publicación en ninguna de sus fases.

## 6 REFERENCIAS

- Abbasi; R., Nodehi, A., y Atai, M. (2020). Synthesis of poly(acrylic-co-itaconic acid) through precipitation photopolymerization for glass-ionomer cements: Characterization and properties of the cements. *Dental Materials*, 36 (6), e169-e183, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2020.03.006>
- Alkahtani, S., Hasnain, M., Nayak, A., y Aminabhavi, T. (2020). Chapter 7 - Polysaccharide-based polyelectrolyte complex systems for biomedical uses. Tailor-Made Polysaccharides in *Biomedical Applications*, Edited by: Amit Nayak, Md Saquib Hasnain and Tejraj Aminabhavi, Elsevier, Amsterdam, 151-174. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821344-5.00007-2>
- Amjad, Z., y Koutsoukos, P. (2014). Evaluation of maleic acid-based polymers as scale inhibitors and dispersants for industrial water applications. *Desalination*, 335 (1), 55-63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.12.012>
- Bai, Y., y Bai, Q. (2ª edición). (2019). *17-Subsea Corrosion and Scale-Subsea Engineering Handbook*. Amsterdam-Netherlands, Elsevier.
- Balilvand, R., Nodehi, A., Rad., Atai, M. (2022). Solution photo-copolymerization of acrylic acid and itaconic acid: The effect of polymerization parameters on mechanical properties of glass ionomer cements. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 126, 105010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2021.105020>
- Baraka-Lokmane, S., y Sorbie, K. (2010). Effect of pH and scale inhibitor concentration on phosphonate-carbonate interaction. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 70 (1-2), 10-27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2009.05.002>
- Bonvin, D., Bastiaansen, J., Stuber, M., Hofmann, H., Ebersold, M. (2017). Chelating agents as coating molecules for iron oxide nanoparticles. *RSC Advances*, 7 (88), 55598-55609. DOI: <https://doi.org/10.1039/C7RA08217G>
- Cabrera, R., y Losada, R. (2010). Evaluación de inhibidores de incrustaciones en tuberías de agua de producción en presencia de CO<sub>2</sub>. Trabajo Especial de Grado para optar al Título de Ingeniero Químico. Universidad Central de Venezuela-Facultad de Ingeniería. Caracas-Venezuela

- Canales, R. (2015). Composición química y tipos de aguas naturales. *Logos Boletín Científico de la Escuela Preparatoria*, N<sup>o</sup>. 2 (3). Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo-México.
- Canul, M., Cortés, M., García, B., Fuentes, M., Gonzáles, M., Calderón, G., Puc, E., Tejero, R. (2015). Disolución de incrustaciones inorgánicas mediante la aplicación de agente quelantes. Método correctivo. *Ingeniería Petrolera*, 55 (3), 170-182.
- Carrillo-Rodríguez, J., Meléndez-Ortiz, H., Puente-Urbina, B., Padrón, G., Ledezma, A., y Betancourt-Galindo, R. (2016). Composite based on poly(acrylic acid-co-itaconic acid) hydrogel with antibacterial performance. *Polymer Composites*, 39 (1), 171–180. DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.23917>
- Castro, H., y Gamez, C. (2009). Evaluación de la depositación de incrustaciones en sistemas de bombeo electrosumergible del campo cantagallo. Proyecto de grado para optar al título de ingeniero de petróleos. Universidad Industrial de Santander-Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Bucaramanga-Colombia.
- Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua, (CIDTA). (2014). Sección 2: mantenimiento en tuberías: la incrustación. <https://cidta.usal.es/cursos/redes/modulos/libros/unidad%2010/incrustacion.PDF>
- Chaussemier, M., Pourmohtasham, E., Gelus, D., Pécou, N., Lédion, J., Cheap-Charpentier, H., Horner, O., Perrot, H. (2015). State of art of natural inhibitors of calcium carbonate scaling. A review article. *Desalination*, 355, 47-55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.10.014>
- Chemtech International. (2022). The danger of scale in water systems. <https://chemtech-us.com/the-danger-of-scale-in-water-systems/>
- Chen, W., y Chen, J. (2022). Formation and prevention of pipe scale in water supply pipelines with anti-corrosion lining. *Water Supply*, 22 (4), 4006-4014. DOI: <https://doi.org/10.2166/ws.2022.030>
- Crabtree, M., Eslinger, D., Matt, P., Jhonson, A., y King G. (1999). La lucha contra las incrustaciones-Remoción y prevención, *Oilfield Review*, 30-49.
- Culbertson, B. (2006). New polymeric materials for use in glass-ionomer cements. *Journal of Dentistry*, 34 (8), 556–565. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2005.08.008>
- Dardel, F. (2021). El intercambio iónico, principios básicos. [https://www.dardel.info/IX/IX\\_Intro\\_ES.html](https://www.dardel.info/IX/IX_Intro_ES.html).
- Dautzenberg, H., Jaeger, W., Kötz, J., Philipp, B., Seidel, C., & Stscherbina, D. (1994). *Polyelectrolytes: formation, characterization and application*. Munich, Germany, Carl Hanser Verlag.
- De Sousa, C., Correia, A., y Colmenares, M. (2010). Corrosión e incrustaciones en los sistemas de distribución de agua potable: Revisión de las estrategias de control. *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*, 50 (2), 187-196.
- Dobrynin, A., Colby, R., y Rubinstein, M. (2004). Polyampholytes. *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*, 42 (19), 3513–3538. DOI: <https://doi.org/10.1002/polb.20207>
- Dobrynin, A., y Rubinstein, M. (2005) Theory of polyelectrolytes in solutions and at surfaces. *Progress in Polymer Science*, 30 (11), 1049–1118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2005.07.0066>
- Doelman, J. (2014). Scale Factors: Reducing Corrosion in Pipelines with Electronic Water Treatment. Recuperado de <https://www.waterworld.com/home/article/16192780/scale-factors-reducing-corrosion-in-pipelines-with-electronic-water-treatment>
- Elbendary, M., El-Kousy, S., Hasan, W., Mohammedy, M., y Basuni, M. (2019). Synthesis and Performance of Acrylic Acid Based Polymers As Scale Inhibitors for Industrial Water Applications. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 10 (6), 135-146. DOI: <https://doi.org/10.33887/rjpbcs/2019.10.6.17>
- Entec Polymers. (2023). RESINTYPE Ethylene Acrylic Acid Copolymer (EAA). <https://www.entecpolymers.com/products/resin-types/ethylene-acrylic-acid-copolymer-eea>
- Fink, J. (2<sup>a</sup> edición). (2015). *7-Scale Inhibitors-Petroleum Engineer's Guide to Oil Field Chemicals and Fluids*. Amsterdam-Netherland, Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803734-8.00007-2>



- Flora, G., Mittal, M., y Flora, S. (2015). *Chapter 26. Medical Countermeasures—Chelation Therapy*. In *Handbook of Arsenic Toxicology*, Edited by S.J.S Flora, Elsevier, Amsterdam, 589–626. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-418688-0.00026-5>
- Fqwchemicals. (2018). Water formed scale. <https://fqchemicals.com/water-formed-scale/>
- González, V. (2012). Compuesto estabilizado eliminador e inhibidor de incrustaciones en tuberías. Patente de México # WO2012158009A1. <https://patents.google.com/patent/WO2012158009A1/es>.
- Hasson, D., Shemer, H., y Sher, A. (2011). State of the Art of Friendly “Green” Scale Control Inhibitors: A Review Article. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50 (12), 7601–7607. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie200370v>
- Hiraki, J., Ichikawa, T., Ninomiya, S., Seki, H., Uohama, K., Seki, H., Kimura, S., Yanagimoto, Y., y Barnett, J. (2003) Use of ADME studies to confirm the safety of  $\epsilon$ -polylysine as a preservative in food. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 37 (2), 328–340. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0273-2300\(03\)00029-1](https://doi.org/10.1016/s0273-2300(03)00029-1)
- Huang, Y., Schricker, S., Culbertson, B., y Olesik, S. V. (2002). Synthesis of poly(acrylic acid-co-itaconic acid) in carbon dioxide–methanol mixtures. *Journal of Macromolecular Science, Part A*, 39 (1-2), 27–38. DOI: <https://doi.org/10.1081/ma-120006516>
- Irowater. (2002). Acrylic Acid Maleic Acid Copolymer (MA-AA). <https://www.irowater.com/products/acrylic-acid-maleic-acid-copolymer/>
- Iteli. (2019). El problema de las incrustaciones de cal. <https://www.iteli.com.mx/2019/06/17/el-problema-de-las-incrustaciones-de-cal-y-el-oxido/>
- Jamar, M. (2020). A Review of Green Scale Inhibitors: Process, Types, Mechanism and Properties. *Coatings*, 10 (10), 928; <https://doi.org/10.3390/coatings10100928>
- Kelland, M. (2<sup>a</sup> edition) (2014). *Production Chemicals for the Oil and Gas Industry*. London-England, Taylor & Francis Inc, CRC Press.
- Lattemann, S., Höpner, T. (2008). Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. *Desalination*, 220 (1-3), 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.03.009>
- León, O., Cárdenas, C., y Carruyo, J. (2002). Costumed of scale inhibitors in oilfield water plant. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 25 (1), 26-32.
- León, Y., y Nizo, G. (2018). Síntesis y caracterización de un terpolímero basado en ácido acrílico, itacónico y sórbico como componente líquido de un cemento dental. Tesis presentada como requisito para optar al título de: Ingeniero Mecánico. Universidad ECCI- Facultad de Ingeniería, Bogotá-Colombia.
- Liang, T., Yan, K., Zhao, T., y Ji, B. (2020). Synthesis of a low-molecular-weight copolymer by maleic acid and acrylic acid and its application for the functional modification of cellulose. *Cellulose*, 27, 5665–5675 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03201-x>
- Livney, Y. D. (2014). *Polyelectrolytes, Properties*. In: *Encyclopedia of Applied Electrochemistry*, edited by Kreysa, G., Ota, Ki., Savinell, R.F. (eds). New York, Springer. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6996-5\\_23](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6996-5_23)
- Madhav, H., Singh, N., & Jaiswar, G. (2019). Chapter 4- Thermoset, bioactive, metal-polymer composites for medical applications. *Materials for Biomedical Engineering*, 105–143. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816874-5.00004-9>

- Mady, M., y Ortega, R. (2022). Fosfomycin and Its Derivatives: New Scale Inhibitors for Oilfield Applications. *ACS Omega*, 7 (12), 10701–10708. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c00429>
- Makhlof, A., Tozuka, Y., y Takeuchi, H. (2011). Design and evaluation of novel pH-sensitive chitosan nanoparticles for oral insulin delivery. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 42 (5), 445–451. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejps.2010.12.007>
- Mazumder, M. (2020). A Review of green scale inhibitors: process, types, mechanism and properties. *Coatings*, 10, 928. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings10100928>
- Medina, L.; y Zea, L. (2008). Determinación de los parámetros físico-químicos que favorecen la formación de incrustaciones en superficies de hierro, simulando el comportamiento de aguas de producción. Trabajo especial de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Universidad Central de Venezuela-Facultad de Ingeniería, Caracas-Venezuela.
- Muzzarelli, R., y Muzzarelli, C. (2005). Chitosan chemistry: relevance to the biomedical sciences. *Advances in Polymer Science*, 186, 151-209. DOI: <https://doi.org/10.1007/b136820>.
- Nieves, J. (2016). Síntesis, caracterización y evaluación de homopolímeros y copolímeros de bajo peso molecular a partir de ácido acrílico y ácido itacónico para aplicación como agentes inhibidores de incrustaciones. Trabajo de Grado para optar al Grado de MSc. en Química Aplicada, Mención Polímeros. Universidad de Los Andes-Facultad de Ciencias, Mérida-Venezuela.
- Olvera, M. (2021). Síntesis, caracterización y evaluación de propiedades de polímeros de base biológica de ácido acrílico-Schizochytrium sp. Tesis para recibir el grado de: Doctorado en Ciencias en Ingeniería Química. Universidad Autónoma de San Luis Potosí-Facultad de Ciencias Químicas, México.
- Popov, K., Kovaleva, N., Rudakova, G., Kombarova, S., y Larchenko, V. (2016). Recent state-of-the-art of biodegradable scale inhibitors for cooling-water treatment applications (Review). *Thermal Engineering*, 63 (2), 122-129. DOI: <http://dx.doi.org/10.1134/S0040601516010092>
- Purewater Colombia SAS. (2019). AGUAS DURAS – Incrustaciones y formación de sarro. <https://purewater.com.co/aguas-duras-incrustaciones-y-formacion-de-sarro/>
- QumiNet. (2012). Usos y aplicaciones del ácido acrílico y sus derivados. <https://www.quiminet.com/articulos/usos-y-aplicaciones-del-acido-acrilico-y-sus-derivados-2681719.htm>
- Ritasa, tratamientos de agua. (2016). Uso de Monofosfatos/Polifosfatos en agua de consumo humano. <http://www.ritasa.com/uso-monofosfatospolifosfatos-agua-consumo-humano/>
- Rojas, Z. (2013). Uso de inhibidores de incrustación en plantas de tratamiento de aguas de formación. Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de: Ingeniero de Petróleo. Universidad de Oriente, núcleo de Monagas, escuela de ingeniería de petróleo, Maturín-Venezuela
- Rojas, F. (2014). Estudio del efecto de la formación de incrustaciones minerales en el aparejo de producción sobre el comportamiento de pozos productores de aceite. Tesis para obtener el título de: Ingeniero Petrolero. Universidad Nacional Autónoma de México-Facultad de Ingeniería, México.
- Rünzi, T., Fröhlich, D., y Mecking, S. (2010). Direct Synthesis of Ethylene–Acrylic Acid Copolymers by Insertion Polymerization. *Journal of the American Chemical Society*, 132 (50), 17690–17691. DOI: <https://doi.org/10.1021/ja109194r>
- Shakkthivel, P., y Vasudevan, T. (2006). Acrylic acid-diphenylamine sulphonic acid copolymer threshold inhibitor for sulphate and carbonate scales in cooling water systems. *Desalination*, 197 (1-3), 179-189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.12.023>
- Shih; I., Shen, M., y Van Y. (2006). Microbial synthesis of poly( $\epsilon$ -lysine) and its various applications. *Bioresource Technology*, 97 (9), 1148–1159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.08.01216>.
- S&P Global Commodity Insights. (Noviembre del 2020). Acrylic acid and esters. <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/ci/products/acrylic-acid-acrylate-esters-chemical-economics-handbook.html>



- Tamaresevly, K., Gordon-Hsu F., Brijmohan, S., Shuster, F., Lai, J., Mago, G. (2020). Copolímeros de ácido itacónico. Recuperado de: <https://patents.google.com/patent/ES2744403T3/es>
- Todo en Polímeros. (12 de junio del 2019). El ácido acrílico. <https://todoenpolimeros.com/2019/06/12/el-acido-acrilico/>.
- Turek, M., Mitko, K., Piotrowski, K., Dydo, P., Laskowska, E., Jakóbiak-Kolon, A. (2017). Prospects for high water recovery membrane desalination. *Desalination*, 401, 180-189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.07.047>
- Xu, N., Cao, J., y Liu, X. (2015). Preparation and Properties of Water-Soluble Sodium Polyacrylates. *Journal of Macromolecular Science, Part B, Physics*, 54 (10), 1153–1168. DOI: <https://doi.org/10.1080/00222348.2015.1078615>
- Yang, J., Zhang, J., Tang, L., y Wang Y. (2012). Synthesis and characterization of acrylic-itaconic acid copolymer used as an environmental friendly polycarboxylic detergent builder. *Asian Journal of Chemistry*; 24 (11), 5038-5042.
- Zahran, M., Abd El-Mawgood, W., y Basuni, M. (2016). Poly Acrylic Acid: Synthesis, aqueous Properties and their Applications as scale Inhibitor. *KGK-KAUTSCHUK GUMMI KUNSTSTOFFE*, 69 (7-8), 53-58.
- Wikipedia. (2023). Agua dura. [https://es.wikipedia.org/wiki/Agua\\_dura](https://es.wikipedia.org/wiki/Agua_dura)

#### Contribución de autores

Autores	Contribución
Jesús Miguel Contreras-Ramírez	Actualización de la bibliografía, revisión y corrección del manuscrito original.
Jesús Javier Nieves-Rivas	Escritura del manuscrito original.