

**ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO DE POST TRATAMIENTO EN FUNCIÓN DE
REMINEALIZACIÓN MEDIANTE CAL Y CALCITA, PARA RIEGO Y
CONSUMO HUMANO. CUBA Y ESPAÑA.**

**ECONOMIC TECHNICAL STUDY OF POST-TREATMENT IN A FUNCTION OF
REMINEALIZATION BY MEANS OF LIME AND CALCITE, FOR IRRIGATION
AND HUMAN CONSUMPTION. CUBA AND SPAIN.**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

Presentado por:

D^a Sindy López Regalado

Dirigido por:

D. RAFAEL BUENDIA

Alcalá de Henares, a 14 de septiembre del 2021.

AGRADECIMIENTOS

- Gracias a mi familia por todo el apoyo que me han dado.
- Gracias a mi Padre y Madre por siempre apoyarme incondicionalmente.
- A mi Prima Damarys y mi Amiga Laura por ser siempre mi apoyo en todo momento.
- A los profesores de la Universidad de Alcalá y Universidad Rey Juan Carlos por brindar sus conocimientos y a mi tutor Rafael por el apoyo brindado.
- Finalmente, agradezco a la Fundación Carolina por otorgarme esta beca para poder realizar mis estudios.

Índice

Resumen	8
1. Introducción	9
1.1 Objetivos	12
2- Metodología y Fuentes de Información	12
3- Desarrollo del Estudio	13
3.1 Desalinización, calidad de agua óptima para el consumo y remineralización.....	14
3.1.1 Remineralización de Aguas desaladas.	15
3.1.2 Índice de Langelier	16
3.1.3 Calidad del Agua Optima para el Consumo Humano	20
3.2 Principales procesos de remineralización .Dosificación de Cal y Calcita como principales metodos en la remineralización de Agua	21
3.2.1 Gas cabónico y Cal.....	22
3.2.2 Desgasificación	22
3.2.3 Ácido sulfúrico y carbonato cálcico	22
3.2.4 Mezcla con agua bruta.....	23
3.2.5 Dosificación de sosa cáustica	23
3.2.6 Lechos de Calcita	23
3.2.7 Dosificación Mediante Cal.....	29
3.2.8 Consumo de CO ₂ según el tipo de tratamiento.	32
3.3 Resultados.Casos de estudios (Cuba y España)	35
3.3.1 Planta desalinizadora de Alicante España.	35
3.3.2 Planta desalinizadora de Cayo Santa María. Cuba.....	37
3.3.3 Remineralización de las Aguas Mediante Cal y Calcita.	39
3.3.4 Remineralización Mediante Mezcla de Agua Bruta y Agua Permeada.	52

3.4 Normas de calidad de agua empleada en cada país.	55
3.4.1 Real Decreto 140/2003, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.	55
3.4.2 Norma cubana 817/2017 requisitos sanitarios de agua potable.	55
3.5 Analisis economico del empleo de cal y calcita en cada lugar	56
4 Conclusiones	58
Bibliografía.....	59
ANEXOS	61

Índice de Figuras

Figura 1: Niveles de Estrés Hídrico -Físico a nivel mundial. (Tomado de fuente ONU, 2018, página 72, basado en datos de AQUAESTAT)	9
Figura 2: Aspectos del equilibrio CO ₂ -HCO ₃ en el proceso de remineralización del agua osmotizada. (Tomado de Hernández Suárez, 2009)	11
Figura 3: Relación entre el LSI y la alcalinidad para aguas remineralizadas a distintas temperaturas. (Tomado de Hernández Suárez, 2009).....	19
Figura 4: Planta piloto de diseño horizontal para la dosificación de carbonato cálcico (Tomado de Hernández Suárez, Suárez Pérez , Alvela, y Santana Pérez, 2004)	26
Figura 5: Esquema del dispositivo horizontal para la adicción de carbonatos (Tomado de Hernández Suárez, Suárez Pérez, Alvela, & Santana Pérez, 2004).....	26
Figura 6: Relación entre la dosificación de Ca (OH) ₂ y el aumento del pH para aguas desaladas con tres niveles de contenido en CO ₂ . (Tomado de Hernández Suarez, 2009)30	
Figura 7: Esquema de una instalación de remineralización con preparación de lechada de cal y de dosificación de CO ₂ . (Tomado de Hernández Suárez, 2009)	31
Figura 8: Planta de tratamiento de Ca (OH) ₂ con un depósito de almacenamiento de CO ₂ y un saturador de cal. (Tomado de Hernández Suarez, 2009)	31
Figura 9: Relación entre el ph y alcalinidad para conseguir el CO ₂ necesario para lechos de calcita. (Tomado de Hernández Suarez, 2009).....	41

Figura 10:Relación estequiométrica entre la cantidad de CO₂ presente en el agua y la cantidad de calcio disuelto según la reacción (3). (Tomado de Criterios para el diseño de postratamiento de agua osmotizada, 2010)..... 42

Figura 11:Relación entre Turbidez y Velocidad ascensional para lechos de calcita de altura constante (2 m de diámetro). (Tomado de Criterios para el diseño de postratamiento de agua osmotizada, 2010)..... 44

Índice de Tablas

Tabla1: Composición media de las aguas. (Tomado de https://drintec.com/es/aplicaciones/remineralizacion-de-aguas-saladas/)	14
Tabla 2: Recomendaciones calidad de la Calcita (Adaptado de Hernández, Fernández , y Mar, 2008)	28
Tabla 3:Composición química y propiedades. (Adaptado de Ficha Técnica Carbonato Cálcico, 2007).....	28
Tabla 4: Recomendación para la calidad de la cal (Ca (OH) ₂). Valores en % en peso seco. (Adaptado de Cabrerizo Pastor y Herráez Sánchez de las Mat, 2004).....	32
Tabla 5: Comparación de remineralización mediante lechos de cal y calcita. (Adaptado de Cabrerizo Pastor & Herráez Sánchez de las Mat, 2004)	33
Tabla 6: Reacciones químicas de algunos de los procesos de remineralización citados anteriormente. (Adaptado de Cabrerizo Pastor y Herráez Sánchez de las Mat, 2004).....	34
Tabla 7:Características del agua de alimentación y Agua Producto para 12°C (Planta A) y 25°C (Planta B). Planta desaladora Alicante.	35
Tabla 8:Valores calculados mediante software disponible en el centro canario del agua para el cálculo de LSI, RSI y PSI. Planta A y Planta B.	36
Tabla 9:Características del agua de alimentación y agua Producto. Planta desaladora Cayo Santa María. Planta C.	38
Tabla 10: Valores calculados mediante software disponible en el centro canario del agua para el cálculo de LSI, RSI y PSI. Planta Cayo Santa María. Planta C.....	38

Tabla 11: Valores que debe tener el agua para que se encuentre correctamente remineralizada según las normas empleadas.	40
Tabla 12: Dosis necesaria de CO ₂ teniendo en cuenta la figura 9.	41
Tabla 13: Dosis necesaria de Ca/l y su equivalente en dureza mg CaCO ₃ /L. Según Figura 10.	42
Tabla 14: Dosificación necesaria de CO ₂ por día que va a consumir cada planta.....	43
Tabla 15: Superficie del lecho según la velocidad ascensional y el caudal de cada planta. .	45
Tabla 16: Superficie del lecho de calcita por celdas.....	45
Tabla 17: Tamaño del compresor.	46
Tabla 18: Autonomía para un aprovechamiento del 70%	46
Tabla 19: Dosificación necesaria de CO ₂ por día que va a consumir cada planta.....	47
Tabla 20: Dosificación diaria de Ca (OH) ₂	48
Tabla 21: Parámetros básicos para el diseño	48
Tabla 22 : Cálculo de Vaporizadores para CO ₂	49
Tabla 23: Dimensionamiento de tanques para CO ₂	49
Tabla 24: Bombas de dilución de CO ₂	49
Tabla 25: Bombas de dilución de CO ₂ características de las bombas.	50
Tabla 26: Dimensionamiento tanque de Ca (OH) ₂	50
Tabla 27: Bombas de Lodo Ca (OH) ₂	51
Tabla 28: Diseño depósito de Lodo.....	51
Tabla 29: Diseño depósito de Agua Saturada.....	51
Tabla 30: Mezcla de Agua de Alimentación y Agua producto para la Planta A.....	52
Tabla 31: Mezcla de Agua de Alimentación y Agua producto para la Planta C.....	54
Tabla 32: Coste Económico Para Remineralización mediante Cal (Ca (OH) ₂).....	56
Tabla 33: Coste Económico Para Remineralización mediante Calcita (CaCO ₃).....	57

Tabla de Abreviaturas

LSI – Índice de Langelier

TAC- alcalinidad

TH- dureza cálcica

CE -Conductividad Eléctrica

OI-osmosis inversa

STD -sólidos totales disueltos

RSI -Índice Ryznar

PSI- Índice Puckorius

ECV – Enfermedades Cardiovasculares

Resumen

Cada día la demanda de agua aumenta más y el recurso de hace cada vez más escaso, lo que conlleva un aumento del uso de tecnologías del agua que pueden responder a satisfacer estas necesidades. Actualmente la desalinización de agua se utiliza con mayor frecuencia, resolviendo en muchos lugares el problema de la escasez. La tecnología más utilizada es mediante plantas de ósmosis inversa.

El agua una vez tratada sale con calidad ultrapura, la cual no es apta para el consumo debido a la ausencia de minerales que tiene el agua, después del proceso de osmosis inversa el agua debe ser remineralizada, para añadirle al agua minerales como calcio, magnesio, bicarbonatos, entre otros minerales que la hacen apta para el consumo según el RD 840/2003 y NC 817/2017.

Los métodos más utilizados para la remineralización de aguas son mediante la adición de cal o calcita, procesos muy eficientes pero cada uno con sus inconvenientes, en este trabajo se realizará una comparación tomando de base dos calidades de aguas de alimentación muy diferentes de plantas ubicadas en Cuba y España. Se realizará una comparación técnica y económica de los dos procesos en las dos plantas para ver cuál podría ser la mejor solución en cada caso. Se realizará los cálculos de remineralización mediante cal y mediante calcita en las dos plantas y se calcularan los costes de cada sistema.

La gestión de los recursos hídricos es limitada en varias partes del mediterráneo involucrando diversas áreas de investigación. Las políticas de agua contienen una gestión precisa de la demanda de agua, así como promueve el uso de tecnologías avanzadas para reutilización y tratamiento de las de las aguas. Al no lograrse aumentar la disponibilidad de agua mediante una gestión adecuada de la demanda, la desalinización de agua de mar o salobre es la solución más eficiente que se puede tomar. **(Fernández-Turiel , 2007)** “La desalación de agua de mar está siendo ampliamente considerada como la solución a la creciente necesidad de agua potable” **(Natalia Belkin, 2018)**

Actualmente muchos países se enfrentan a grandes desafíos para lograr un abastecimiento satisfactorio del agua. Por lo que la desalinización empieza a ser una técnica de potabilización esencial en comunidades donde el mar es la alternativa más asequible. El agua desalada puede tener múltiples aplicaciones que van desde consumo humano, agricultura hasta procesos industriales que requieran agua ultrapura en sus tecnologías. **(Aquae_Fundacion, 2017)**. Existen varios métodos de desalinización, pero la osmosis inversa y la electrodiálisis reversible son las más utilizada en la actualidad debido a su gran eficiencia a la hora de eliminar minerales y sales del agua.

La ósmosis inversa se caracteriza por eliminar las sales y minerales del agua, dando lugar a un agua no estable, que puede llegar a provocar problemas de salud si se bebe directamente. Otro problema es la corrosión que genera en las tuberías y estructuras de distribución de agua, por lo cual se debe contar con un sistema de tratamiento del agua luego de la osmosis, lo que comúnmente se llama remineralizar esa agua y estabilizarla, esta es una parte fundamental de las plantas desalinizadoras. **(Villegas-Mendoza, Et al 2020)**. El principio de la remineralización es producir un agua sin tendencia a provocar corrosión de partes metálicas y la desintegración de componentes de concreto en los sistemas de distribución de agua, asimismo, uno de los problemas de la corrosión está asociada a problemas en la salud por la liberación de iones metálicos (Fe, Pb, Cu y Zn) y compuestos como Fe_3O_4 y geotita los cuales son procesos que vuelven insalubre el agua. Se ha reportado que beber agua desmineralizada o un líquido hipotónico puede ser perjudicial para la salud **(Vingerhoeds, Et al 2016)**, beber agua desmineralizada puede llegar a provocar dolor de cabeza, edema celebrar, cansancio y debilidad. Esto unido a la baja ingestión de minerales (iones de Ca y Mg). En niños se ha reportado ser causa de acidosis metabólica **(Rosborg y Kozisek, 2015)**.

Las técnicas de remineralización tienen como objetivo alcanzar una dureza cálcica y alcalinidad con valores que permitan alcanzar un LSI cercano a cero ($LSI \pm 0,5$ rango del

RD 140/2003). La remineralización disminuye el carácter agresivo del agua desalada con el aumento del LSI y el contenido de bicarbonatos respecto al cloro y a sulfatos. En la **Figura 2** se ilustra el principio de la remineralización de las aguas desaladas, desde el punto de vista del equilibrio $\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \text{CO}_3^{2-}$ y para un agua desalada normal: pH = 6,0; 4 mg HCO_3^-/L ; 3 mg CO_2/L ; 200 mg STD/L y $T=20^\circ\text{C}$. Tal y como ilustra el diagrama, la remineralización aumenta el contenido de bicarbonatos hasta 75 mg/l lo que consume CO_2 hasta dejarlo cercano a un valor de 0.7 mg/l. Un aumento de bicarbonatos va unido de un aumento de pH. Una adecuada remineralización aporta bicarbonato y calcio al agua. (Hernandez Suarez, 2009)

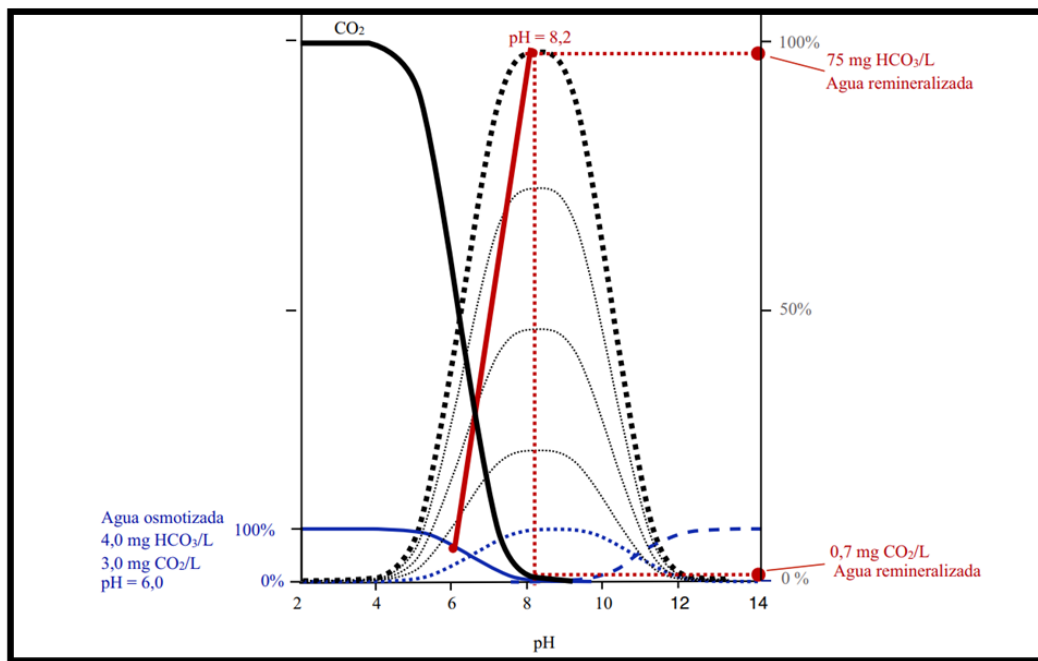


Figura 2: Aspectos del equilibrio $\text{CO}_2\text{-HCO}_3$ en el proceso de remineralización del agua osmotizada. (Tomado de Hernández Suárez, 2009)

Existen varios métodos de remineralización, pero en este trabajo nos centraremos en uso de la remineralización mediante cal y calcita, para lograr un agua apta para el consumo y que se encuentre dentro del rango permisibles de las normas aplicadas en este caso de estudio.

1.1 Objetivos

El objetivo de este trabajo es realizar una comparación técnica y económica sobre la remineralización de agua para consumo mediante cal y calcita, Se pretende realizar una comparación de ambos procesos, para lo cual se trabajó en dos zonas diferentes España y Cuba. El fin de este trabajo es poder obtener el método más adecuado para la remineralización del agua dependiendo del tipo de agua a tratar.

En base a este objetivo principal, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- ✓ Exponer la necesidad de remineralizar las aguas.
- ✓ Investigar sobre los tipos de remineralización que existen.
- ✓ Factores que condicionan el uso de Cal o Calcita
- ✓ Presentar ejemplos de remineralización mediante sistemas de cal o calcita
- ✓ Realizar un análisis técnico y económico de ambos métodos.

2- Metodología y Fuentes de Información

La revisión bibliográfica consiste en lo siguiente:

1-Tema relacionado con remineralización de agua procedente de plantas desaladoras, enfocándose en la adición de cal o de calcita al agua para su remineralización.

2-Se reúne información sobre el tratamiento con cal y calcita.

3-Se pretende poner dos ejemplos de dos sistemas diferentes de tratamiento con cal y calcita y realizar una comparación técnica económica del empleo de cada una de ellas.

Para la realización de la presente revisión bibliográfica se han seguido los siguientes criterios:

1. Se ha realizado una búsqueda general sobre el proceso de ósmosis inversa, la remineralización y los procesos que se utilizan para lograr obtener un agua con calidades requeridas para su uso determinado.
2. Al tratarse de una temática extensa, se realizaron búsquedas sobre varios temas más concretos para facilitar y focalizar la investigación:

Se ha reunido información sobre el proceso de remineralización y en base a esto se realizaron búsquedas sobre los tratamientos más utilizados.

Se han consultado artículos relacionados con la remineralización mediante Cal o Calcita y el impacto que tiene cada proceso sobre la calidad del agua generada.

La búsqueda de información sobre remineralización mediante cal y calcita se ha dividido en diferentes temáticas:

- ✓ Postratamiento del agua desalada
- ✓ Utilización de Cal y Calcita
- ✓ Resultados obtenidos en ambos métodos.

3- La información utilizada en esta revisión se ha extraído principalmente de artículos científicos y libros. La plataforma digital principal ha sido *Science Direct*, ya que en esta podemos encontrar una base de datos extensa con un gran número de revistas científicas relacionadas con temáticas del agua, métodos de desalinización, remineralización y ejemplos prácticos aplicados en algunas plantas desaladoras a nivel nacional y mundial. También se utilizó *Taylor and Francis online*.

4- Entre las revistas más utilizadas encontramos, *Water research* o *Environmental, Science of the total Enviroment*, *Tecnologías y Ciencias de Agua*, *El Servier*, *Desalination and Water Reuse*.

5- Se ha tratado de buscar la información lo más actual posible en cuanto a remineralización mediante cal y calcita, al igual que se ha tratado de poner ejemplos lo más actuales posibles sobre estos tratamientos en Plantas desaladoras.

3- Desarrollo del Estudio

Un agua desalinizada como se dijo anteriormente es un agua de muy alta calidad, con baja alcalinidad, baja capacidad amortiguadora por lo que puede ser un agua agresiva a los sistemas de distribución de agua, provocando corrosión de metales y eventos de agua roja. Consumir agua constantemente con bajas concentraciones de iones de calcio y magnesio, puede provocar tanto problemas en la salud, así como dañar agricultura y cultivos. **(Birnhack, Fridman, y Lahav, 2008)**

Este capítulo se divide en tres apartados principales. En el apartado 3.1 se explica un poco el tema relacionado con la desalación, remineralización y la calidad de agua para consumo. A

continuación, en el apartado 3.2 se explican los procesos necesarios para remineralizar el agua, se profundiza en el empleo de cal y calcita teniendo en cuenta los diferentes tipos de agua. Por último, se hace una comparación de ambos métodos empleados en la remineralización de dos plantas desaladoras ubicadas en Cayo Santa María, Cuba y Alicante, Madrid.

3.1 Desalinización, calidad de agua óptima para el consumo y remineralización.

El agua desalinizada es cada vez más utilizada, proporcionando en algunos países un mayor suministro que agua dulce. Actualmente proporciona un 1% del agua potable del mundo y va aumentando a una tasa anual de hasta el 25% (Birnhack, Fridman, y Lahav, 2008). 2013).

“Las aguas desaladas responden a una disolución con un contenido medio en sólidos totales disueltos de 280 mg SDT/L, donde aproximadamente el 72 % es ClNa. Las aguas desaladas tienen un contenido muy bajo de HCO_3^- (< 10 mg HCO_3^- /L), así como Ca^{2+} (< 2.5 mg Ca^{2+} /L) y Mg^{2+} (<4 mg Mg^{2+} / L), el pH a la salida puede variar entre 5.3 a 6.7 dependiendo de las condiciones de operación de la planta, el contenido de CO_2 varía entre 0.8 y 16 mg CO_2 /l.” (Hernandez Suarez, 2009)

El LSI de un agua después de pasar por la OI es menor a -4 por lo que tiende a disolver el carbonato cálcico. Además presenta riesgo para la corrosión por tener un mayor contenido de cloruros (60-200 mg Cl^- /L) y sulfatos (-2.57 mg SO_4^{2-}) respecto al de bicarbonatos (2-4 mg HCO_3^- /L). Presenta una turbidez de alrededor de 0.2 >NTU. También quiero destacar que el bajo contenido de CO_2 no permite realizar una correcta remineralización por lo que será necesario un aporte adicional de CO_2 . (Hernández Suarez, 2009). La siguiente tabla muestra la composición media que tienen las aguas productos luego del proceso de desalinización.

Tabla1: Composición media de las aguas. (Tomado de <https://drintec.com/es/aplicaciones/remineralizacion-de-aguas-saladas/>)

<i>Parámetro</i>	<i>Rango</i>
pH	5,65
Alk (mg de CaCO_3 /L)	1,97
HCO_3^- (mg/L)	1,62
CO_2 (mg/L)	8,46

<i>Parámetro</i>	<i>Rango</i>
Ca ²⁺ (mg/L)	1,43
Langelier (SM2330)	-5,46

La composición del agua osmotizada va variando según el tipo de planta, la operación de esta, así como la calidad del agua de alimentación. La adición de ácidos o bases antes de pasar por el proceso de OI puede variar el pH del agua producto y por tanto su contenido de CO₂. Otro factor influyente es el estado de las membranas, pudiendo afectar el grado de eliminación de algunos componentes. Variando también el contenido de sólidos totales disueltos (STD) y la conductividad eléctrica (CE). **(Hernández Suárez, 2009)**

3.1.1 Remineralización de Aguas desaladas.

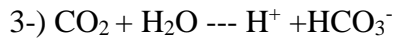
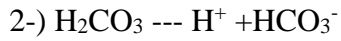
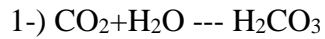
“El objetivo de la remineralización es, generalmente, producir un agua con un índice de Langelier muy próximo a cero y que permanezca estable en contacto con la atmósfera. Además, se trata de conseguir esto con un consumo mínimo de CO₂ con el fin de minimizar los costes de explotación.” **(Hernandez Suarez, 2009)**

Un agua de alta pureza generalmente tiende a ser reactiva por lo que debe tratarse o puede generar grandes dificultades de corrosión. Pasa en ocasiones con el cemento, revestimiento de mortero de tuberías de agua que son deterioradas por la corrosividad de aguas blandas. **(Hasson y Bendrihem, 2005)**

El agua se remineraliza para alcanzar un punto de equilibrio donde el calcio, alcalinidad y pH no varíen o que por lo menos sea mínima su variación. Se realiza un ajuste intentando lograr una precisión lo más alta posible para así disminuir el consumo de reactivos. Se dosifica Cal y Calcita principalmente (Lechos saturadores o Silos de Cal) y CO₂. Después de realizado este proceso se logra un aumento en la dureza y alcalinidad hasta valores admisibles en las normas de agua para consumo humano (NC827/2017-RD840/2003) **(<https://blogs.nippongases.es/>, 2017)**

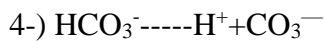
Tener un control de la dosificación es fundamental. Si CO₂ libre > CO₂ de equilibrio, entonces hay un exceso de CO₂ siendo el agua agresiva, CO₂ libre = CO₂ de equilibrio, entonces el agua está en equilibrio. Sin embargo, CO₂ libre < CO₂ de equilibrio, existe deficiencia con el CO₂ de equilibrio y entonces el agua será incrustante. **(<https://blogs.nippongases.es/>, 2017)**. Cuando el CO₂ se disuelve en el agua, reacciona con

ella para formar ácido carbónico, el cual se disocia en iones hidrógeno y el ion bicarbonato, siguiendo la reacción:



1era disociación de ácido carbónico

$$K_1 = \frac{[\text{H}^+][\text{HCO}_3^-]}{[\text{CO}_2][\text{H}_2\text{O}]}$$



2da disociación de ácido carbónico

$$K_2 = \frac{[\text{H}^+][\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]}$$

En casi todas las plantas desaladoras se tiene que añadir CO_2 después de pasar por el proceso de OI y antes de que el agua sea remineralizada. La infra dosificación de CO_2 proporciona concentración de calcio y una alcalinidad insuficiente, lo que trae consigo un agua inestable con tendencia a disolver el CaCO_3 . La sobredosificación de CO_2 conlleva a una mayor alcalinidad y dureza en el agua remineralizada, así como un contenido en CO_2 que tiende a disminuir en contacto con la atmósfera, lo que hace subir el pH del agua originando un LSI ligeramente positivo. Sin embargo, atendiendo a la baja dureza del agua remineralizada no existe prácticamente riesgo de precipitación de CaCO_3 aún a temperaturas de 40°C . (Hernández Suárez, 2009)

3.1.2 Índice de Langelier

Teniendo en cuenta la importancia del índice de Langelier (LSI) en la remineralización se explicará brevemente como obtener el mismo. El carácter corrosivo o incrustante de un agua puede ocasionar problemas en los procesos, un agua con carácter incrustante podría llegar a

la situación límite de que se vaya depositando tanto carbonato en una tubería que terminará obturándose, sin embargo, un agua corrosiva puede provocar corrosión química en tuberías o depósitos. El modo más simple para el cálculo del equilibrio del agua es el índice de LANGEЛИER.

$$\text{LSI} = \text{pH}_{\text{actual}} - \text{pH}_{\text{sat}}$$

Ante la demanda de un procedimiento numérico para el cálculo del pH_{sat} y de acuerdo con los trabajos de Larson y Buswell se ha desarrollado una fórmula empírica simplificada para el cálculo del pH_{sat} que por su sencillez ha alcanzado una amplia difusión. **(Hernandez Suarez, 2009)**

Esta fórmula es la siguiente:

$$\text{pH}_{\text{sat}} = (9,3 + A + B) - (C + D)$$

Donde:

- ✓ $A = 1/10 (\log (\text{TDS}) - 1)$
- ✓ $B = -13,12 \log (T(^{\circ}\text{C}) + 273,2) + 34,55$
- ✓ $C = \log (\text{Ca}^{+2} (\text{mg CaCO}_3/\text{L})) - 0,4$
- ✓ $D = \log \text{Alk} (\text{mg CaCO}_3/\text{L})$

Este método simplificado para el cálculo del pH_{sat} sigue siendo utilizado de forma frecuente como indicativo de la tendencia del agua a disolver o a precipitar el carbonato cálcico. Sin embargo, es un método empírico que no incluye una serie de cálculos sobre la termodinámica del proceso que deben ser considerados en un análisis completo de los factores que intervienen en la reacción. **(Hernández Suárez, 2009)**

3.1.2.1 El SM2330 para el cálculo del pHsat

El método estándar SM23301 resume los avances, hasta hoy, en la química del agua y está aceptado internacionalmente como el método adecuado para el cálculo del pH sat. El método SM23301 es un modelo más exacto y preciso que incluye conceptos termodinámicos de la reacción. El SM2330 implica corregir con un coeficiente de actividad la fórmula original de **Langelier: (Hernández Suárez, 2009)**

$$\text{pHsat} = \text{pK}_2 - \text{pK}_{\text{sc}} + \text{pCa}^{+2} + \text{pAlk} + 5\text{pfm}$$

Donde:

- ✓ K_2 = Segunda constante de disociación para el ácido carbónico a la temperatura del agua.
- ✓ K_{sc} = Producto de solubilidad para la calcita a la temperatura del agua.
- ✓ Ca^{+2} = Calcio, en moles/L
- ✓ Alk = Alcalinidad, en equivalentes/L
- ✓ pfm = Coeficiente de actividad a la temperatura especificada.

Para el cálculo de cada uno de los elementos de la ecuación se proponen las siguientes ecuaciones:

- ✓ $\text{pK}_2 = 107,8871 + 0,03252849T - 5151,79/T - 38,92561 \log_{10}T + 563713,9/T^2$, para un rango de temperatura de 273-373 °K
- ✓ $\text{pK}_{\text{sc}} = 171,9065 + 0,077993T - 2839,319/T - 71,595 \log_{10}T$, para un rango de temperaturas de 273-363 °K
- ✓ $\text{pfm} = [(AI/2) / (1+I/2)] - 0,3I$, válido para $I < 0,5$

Siendo:

- ✓ $I = 1,6 \times 10^{-5} \times \text{CE}$
- ✓ $A = 1,82 \times 10^6 (E \cdot T)^{-1,5}$
- ✓ $E = [60954 / (T + 116)] - 68,937$

Donde:

- ✓ I= Fuerza iónica
- ✓ CE25=conductividad eléctrica, $\mu\text{mhos/cm}$ o $\mu\text{S/cm}$
- ✓ T= temperatura del agua, $^{\circ}\text{K}$ ($^{\circ}\text{C} + 273,2$)
- ✓ E = constante dieléctrica, (adimensional)

El método de cálculo LSI según el SM2330 y la formula empírica se puede realizar en www.fcce.es => *Software (gratuito)*

El RD 140/2003 establece que “el agua en ningún momento podrá ser ni agresiva ni incrustante y el resultado de calcular el índice de Langelier debería estar comprendido entre +/- 0,5”. (RD 140/2003, 2003)

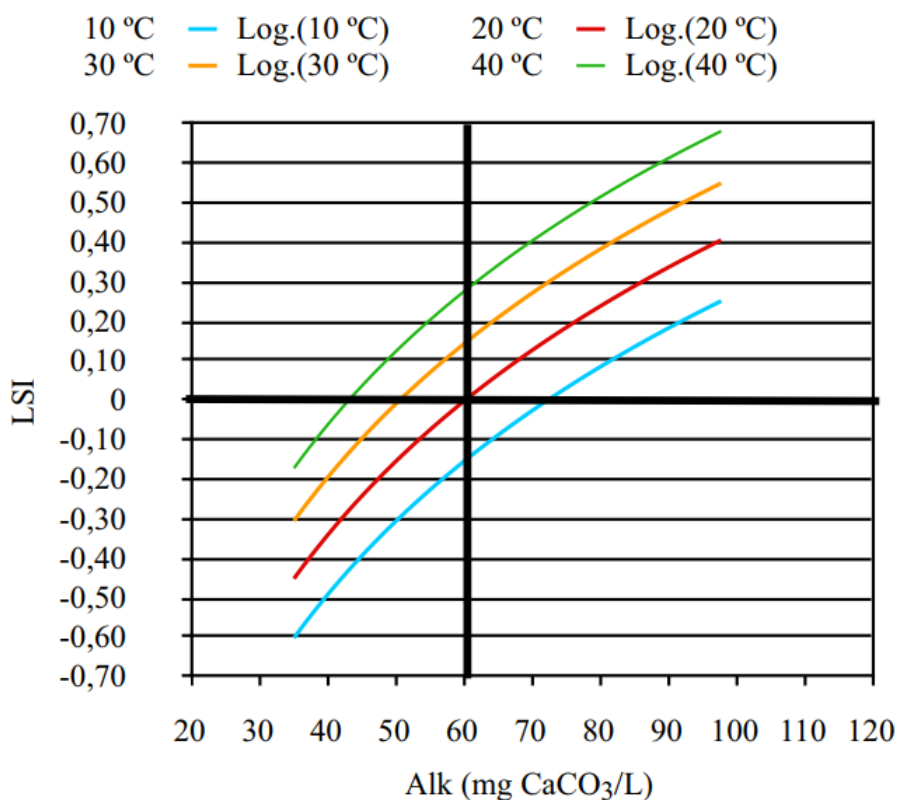


Figura 3:Relación entre el LSI y la alcalinidad para aguas remineralizadas a distintas temperaturas. (Tomado de Hernández Suárez, 2009).

3.1.3 Calidad del Agua Óptima para el Consumo Humano

Primeramente, decir que el agua es fuente de vida, es vital para nuestra vida y su calidad va directamente vinculada con el nivel de vida y nivel sanitario de un país. El agua de consumo humano tiene que ser de buena calidad, para lo cual tiene que ser un agua salubre y limpia, sin microorganismos patógenos ni contaminantes que afecten la salud humana, así como debe ser un agua con todos los minerales necesarios que debe contener el agua potable para que la misma no afecte la salud humana. El agua de consumo humano debe cumplir con los parámetros indicadores del **Anexo 1 y 2** (indicados en el RD 140/2003 y NC 827/2017)

Para determinar si la calidad del agua es óptima para nuestro consumo se tienen en cuenta diversos parámetros químicos, físicos, biológicos y bacteriológicos. Cada parámetro incluye el análisis de los aspectos que detallamos a continuación:

- ✓ **Químicos:** Se observa **pH**, **dureza**, sólidos disueltos y en suspensión, **alcalinidad**, coloides, acidez mineral, residuo seco, sulfatos, cloruros, nitratos, fluoruros, fosfatos, sílice, carbonatos y presencia de otros componentes como ácido sulfhídrico, ácido húmico, sodio, **potasio**, **calcio**, **magnesio**, hierro, manganeso, metales tóxicos y gases disueltos.
- ✓ **Físicos:** Incluyen el sabor, olor, color, turbidez y conductividad del agua.
- ✓ **Biológicos:** Relacionados con la demanda biológica y química de oxígeno, así como con la presencia de carbón orgánico en suspensión.
- ✓ **Bacteriológicos:** Se revisa que no tenga bacterias como *Escherichia Coli*, *Streptococos* y *Clostridios*.

Teniendo en cuenta lo anterior planteado tanto un agua con altos índices de contaminación, como un agua con escasos en ciertos minerales necesarios para una buena salud son aguas inadecuadas y que no cumplen los parámetros para ser apta para el consumo humano. La investigación en salud pública en este ámbito fue creciendo el agua desalinizada o agua desmineralizada, sin un mayor enriquecimiento de algunos minerales podría no ser totalmente adecuadas para el consumo. Hay dos razones para ello:

- ✓ Agua desmineralizada es muy agresiva y si no es tratada, su distribución a través de tuberías y de tanques de almacenamiento no sería posible.

- ✓ El agua destilada tiene características de mal gusto.

Además de lo anterior el riesgo en la salud de consumir agua desmineralizada es alto. El calcio y el magnesio son dos elementos esenciales. El calcio es un componente importante de los huesos y dientes. Además, desempeña un papel en la excitabilidad neuromuscular (es decir, disminuye), el correcto funcionamiento del sistema de la realización de miocardio, el corazón y la coagulabilidad de la sangre. El magnesio juega un papel importante como un cofactor y activador de más de 300 reacciones enzimáticas incluyendo a la glucólisis, el transporte de elementos como el sodio, potasio y calcio a través de las membranas, la síntesis de proteínas y ácidos nucleicos, excitabilidad neuromuscular y la contracción muscular. El agua blanda (es decir, el agua baja en calcio y magnesio) se asocia con una mayor morbilidad y mortalidad por enfermedad cardiovascular (ECV). **(Kozisek, 2010).**

3.2 Principales procesos de remineralización .Dosificación de Cal y Calcita como principales metodos en la remineralización de Agua .

Se aplica este proceso cuando procede dotar a un agua demasiado 'dulce' de un cierto contenido de bicarbonato cálcico, es decir, de una alcalinidad (TAC) y una dureza (TH cálcica) suficientes para que sea capaz de depositar una capa protectora carbonatada sobre una tubería de fundición o de acero sin recubrir. Para obtener el TAC y el TH recomendados, pueden utilizarse diferentes medios. **(Cabrerizo Pastor y Herráez Sánchez de las Mat, 2004)**

Entre las técnicas más utilizadas se encuentran los lechos de calcita y la lechada de cal. El menor consumo de CO₂ y la menor complejidad de proceso apuntan a que los lechos de calcita son una técnica más estable para la remineralización de agua desalada, sin embargo, son procesos que deben analizarse teniendo en cuenta la calidad del agua a remineralizar. **(Hernández Suárez, 2009).**

Los descensos de temperatura hacen disminuir la velocidad de las reacciones que intervienen en remineralización. En el caso de los lechos de calcita, el tiempo de contacto para alcanzar una remineralización adecuada aumenta de 9 a 14 minutos con un descenso de la temperatura del agua de 25°C a 14°C. El muestreo de aguas desaladas debe ser realizado de manera que se evite la pérdida de CO₂. Para ello se recomiendan las mediciones in situ sobre todo del pH, la temperatura y la CE. **(Hernández Suárez, 2009)**

3.2.1 Gas carbónico y Cal

Generalmente se utiliza gas carbónico y cal (preparada en un saturador, cuando la remineralización se practica en agua clara). Es preciso añadir por grado TAC, 8,8 g de CO₂ más 5,6 g de CaO por m³ de agua. El aporte de dureza y alcalinidad se realiza en el agua según la reacción siguiente: **(Cabrerizo Pastor y Herráez Sánchez de las Mat, 2004)**



La diferencia fundamental con el proceso de remineralización por filtración por lecho es que por este método se requiere el doble de cantidad de dióxido de carbono. La adición de CO₂ y lechada de cal se suele efectuar en la misma cámara de contacto o depósito. Asimismo, esta dosificación se efectúa en un by-pass del caudal total ahorrando de esta manera en coste de inversión de equipos. El caudal by-pass se mezcla nuevamente con el resto de efluente de agua producto, obteniendo un producto final con el nivel de remineralización requerido. Debido a la escasa solubilidad del hidróxido cálcico (Ca (OH)₂) es necesario dosificarlo mediante la preparación de una 'lechada' en una cuba previa a la dosificación. **(Cabrerizo Pastor y Herráez Sánchez de las Mat, 2004)**

3.2.2 Desgasificación

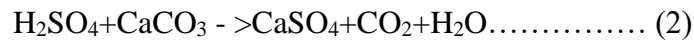
En los casos de aguas desaladas que contengan CO₂ agresivo suele ocurrir que existe una concentración excesiva con relación a la que se necesita para remineralizar el agua, bien con cal o con algún método de filtración sobre caliza, etc. Por lo tanto, el agua aún será corrosiva tras uno de estos procesos manteniendo en algunos casos unas cantidades excesivas de CO₂. La desgasificación es una opción para eliminar el CO₂ sobrante mediante un procedimiento físico. Los equipos más habituales para este tipo de procesos son columnas de lavado en donde se alimentan agua y aire a contracorriente. Estas columnas cuentan con un relleno que aumenta la superficie de contacto aire agua optimizando el proceso de transferencia del CO₂ al propio aire. **(Cabrerizo Pastor y Herráez Sánchez de las Mat, 2004)**

3.2.3 Ácido sulfúrico y carbonato cálcico

Se introduce el agua en un decantador o en una cuba de contacto, con caliza pulverizada, añadiendo ácido sulfúrico en una cantidad equivalente a la de bicarbonato que se quiere añadir al agua. Puede también filtrarse el agua a través de una capa de mármol o de caliza, después de la adición de la misma cantidad de ácido sulfúrico. Para elevar 10 mg/l de

CaCO₃ el TAC de 1 m³ de agua, es necesario añadir: (Cabrerizo Pastor & Herráez Sánchez de las Mat, 2004). Este tipo de sistema de remineralización añade sulfatos al agua.

- 9,8 g de H₂SO₄ y un mínimo de 20 g de CaCO₃.



Es indispensable terminar el tratamiento con una adición de cal, ya que el mármol no es suficiente para llevar el pH al valor de equilibrio. (Cabrerizo Pastor y Herráez Sánchez de las Mat, 2004)

3.2.4 Mezcla con agua bruta

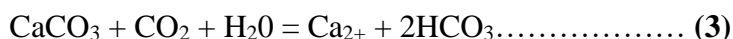
Se suele emplear con mayor frecuencia en plantas desaladoras. Consiste en conseguir, con ligeros aportes de agua de alimentación del proceso de desalación, equilibrar el agua producto. Puede emplearse con éxito, aunque esta remineralización en la mayoría de los casos no será completa, necesitándose de otros procesos adicionales para añadir dureza y alcalinidad. (Cabrerizo Pastor & Herráez Sánchez de las Mat, 2004).

3.2.5 Dosificación de sosa cáustica

La dosificación de sosa cáustica se ha planteado en los postratamientos de agua desalada como complemento a los procesos de remineralización que añaden dureza y alcalinidad. Se entiende que no basta con conseguir un agua equilibrada desde el punto de dureza y alcalinidad, si no que el pH debe ser ligeramente incrustante (según índice de saturación) para cumplir con el índice Ryznar controlando el CO₂ agresivo sobrante. Así mismo las reacciones en los filtros de materiales alcalinotérreos no tienen una eficacia del 100% para obtener el pH de equilibrio. También este proceso es una alternativa a la desgasificación, cuando las concentraciones sobrantes de, CO₂ no son excesivas. (Cabrerizo Pastor y Herráez Sánchez de las Mat, 2004).

3.2.6 Lechos de Calcita

Pasar agua corrosiva (es decir, con índice de saturación de Langelier negativo) a través de un lecho de la piedra caliza permite aumentar el pH, así como la alcalinidad y la dureza. En piedra caliza de flujo ascendente de contactores el agua se mueve hacia arriba a través de un lecho de piedra caliza triturada que disuelve el calcio carbonato a medida que asciende. La reacción implica es la siguiente: (Hernandez Suarez, 2004).



En los lechos de calcita el agua fluye a través del carbonato cálcico triturado de forma similar a como fluiría en un filtro de arena. Existen diseños que fluyen de arriba abajo, sobre todo en Alemania. **(De Souza, Du Plessis, y Mackintosh, 2002)** Otros emplean el flujo contracorriente o de abajo a arriba. En el lecho el pH del agua se ajusta hasta un valor próximo al equilibrio con el CaCO_3 a medida que atraviesa el lecho. Los componentes de los depósitos para lechos de calcita son, en principio, similares a los de un filtro de arena tradicional. Así, para el caso de los depósitos de flujo contra corriente incluye el depósito, una entrada de agua por la parte inferior con un distribuidor de agua, un espacio sobre el piso filtrante donde se sitúa la calcita y una salida que recoge el agua por rebose en la parte superior del lecho. El depósito lleva también frecuentemente una tapa superior. En los tratamientos de aguas potables, los lechos de calcita se colocan generalmente al final del tratamiento, se considera que si el pH del agua se mantiene ácido se consigue una cloración más eficaz **(Spencer, 2000)**. Sin embargo, se dan también casos donde el lecho de contacto se coloca después de la filtración y antes de la cloración. En el tratamiento de aguas continentales se requieren unos tiempos de contacto superiores a los 10 minutos, por ello se considera que los lechos de calcita se limitan a instalaciones de menos de $30.000 \text{ m}^3/\text{d}$, debido al gran tamaño que adquieren los depósitos. Para solventar este problema se ha desarrollado en Sudáfrica un sistema que consiste en tratar con CO_2 parte del caudal, hacerlo luego pasar por el lecho de calcita para posteriormente mezclarlo con el resto del caudal a la salida **(De Souza, Du Plessis, y Mackintosh, 2002)**

La eficiencia de aplicación de CO_2 , por otro lado, es un tema importante dado que en el caso de los tratamientos con calcita el CO_2 supone alrededor del 40% de los costes de operación, por lo que en plantas grandes el factor multiplicador es considerable. **(Hernández , Fernández , y Mar, 2008)**

La **Figura 4** muestra una planta piloto de diseño horizontal para la dosificación de carbonato cálcico **(Hernández Suárez, Suárez Pérez , Alvela, y Santana Pérez, 2004)**. El dispositivo consiste en un depósito horizontal formado por una serie de celdas rellenas de carbonatos y colocadas en serie, de forma que el agua serpentea hacia arriba y hacia abajo a través de ellas, atravesando los lechos y corrigiendo su composición a medida que avanza de forma natural **(Figura 5)**. El depósito de remineralización **(A)** está formado por tres partes diferenciadas: el lecho de carbonatos **(B)**, el sistema de alimentación **(C)** y la zona de

almacenamiento de carbonatos **(D)**. El lecho de carbonatos **(B)** tiene la entrada de agua **(E)** por la parte lateral inferior a través de una parrilla de distribución. La salida de agua **(F)** está situada en el extremo opuesto a la entrada **(E)** y a una cierta altura. El sistema consta de al menos 7 celdas (G1-G7) cada una de ellas rellena hasta una determinada altura de carbonatos **(H)**, menos las dos últimas (G6 y G7) que sirven de zona de remanso antes de la salida **(F)**. El nivel de agua **(I)** está por encima del nivel de carbonatos y desciende de celda en celda en forma de cascada. El agua se desplaza a través de las celdas hacia la salida subiendo y bajando a través de las respectivas celdas. El sistema de alimentación **(C)** está compuesto por unos embudos o sifones de distribución de producto **(J)** que depositan el carbonato sobre la superficie de los lechos en cada una de las celdas de forma independiente y a medida que se va consumiendo el producto. Sólo las últimas dos celdas (G6 y G7) no disponen de embudos o sifones de distribución de producto ya que es la zona de remanso. La zona de almacenamiento de producto **(C)** está compartimentada en celdas **(K)** de forma que se puede monitorizar el consumo de cada una de ellas de forma independiente. A la salida **(F)** el agua habrá tenido tiempo de contacto suficiente con los carbonatos y se obtiene así un agua correctamente remineralizada y que cumple con las normas de calidad de agua potable. **(Hérmendez Suárez, Suárez Pérez , Alvela, y Santana Pérez, 2004)**.

Los embudos o sifones alimentadores **(J)** guían el producto desde los depósitos de almacenamiento superiores hasta la superficie del lecho sin crear turbulencias y de forma gradual a medida que el sistema consume el carbonato. El sistema se autoalimenta según las necesidades de forma autónoma. El número de celdas, así como la anchura y altura de estas, es variable según el diseño específico. La altura de lechos es también regulable por medio de los tubos de distribución de producto. Igual ocurre con el nivel del agua de salida. El control del consumo de producto de las distintas celdas puede hacerse desde las zonas de almacenamiento situadas encima de los embudos o sifones. **(Hérmendez Suárez, Suárez Pérez , Alvela, y Santana Pérez, 2004)**.



Figura 4: Planta piloto de diseño horizontal para la dosificación de carbonato cálcico (Tomado de Hernández Suárez, Suárez Pérez, Alvela, y Santana Pérez, 2004)

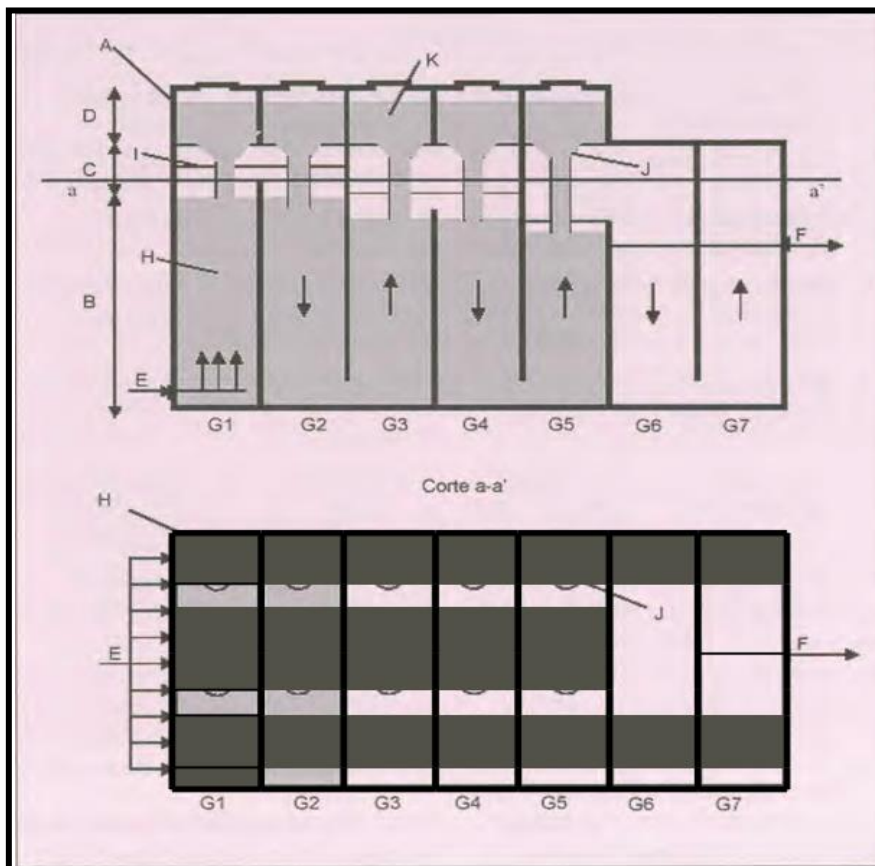


Figura 5: Esquema del dispositivo horizontal para la adición de carbonatos (Tomado de Hernández Suárez, Suárez Pérez, Alvela, & Santana Pérez, 2004)

El dispositivo mostrado permite, por tanto, mantener la calidad del agua de forma uniforme y cumplir sin altibajos las normas de abastecimiento que se exigen para el agua potable (**RD 140/2003 y NC827/2017**). El coste del tratamiento se estima en menos de 0,01 €/m³. Estos dispositivos son muy útiles para caudales de agua entre 100- 3.000 m³/día. Las últimas pruebas con unidades de hasta 400 m³/día han confirmado el excelente funcionamiento de los depósitos dosificadores de carbonato cálcico desarrollados por el Centro de Estudios Canario del Agua (**Hérmendez Suárez, Suárez Pérez , Alvela, y Santana Pérez, 2004**) Estos dispositivos disponen como se ha dicho anteriormente de un sistema de alimentación patentado que permite dosificar el carbonato cálcico en continuo y sin crear turbulencias. Aprovechan la presión de salida de los bastidores sin necesidad de bombas adicionales. Al ser de flujo ascendente no hay riesgos de colmatación. Tienen una autonomía de más de 10 días, aunque esto es adaptable a las necesidades de la planta y al espacio disponible. Los equipos son fácilmente acoplables a plantas existentes y pueden ser construidos a medida para cada instalación y tipo de agua. (**Cabrerizo Pastor y Herráez Sánchez de las Mat, 2004**)

3.2.6.1 Recomendaciones de la calidad de la calcita

Por sus propiedades de alta pureza se utiliza muy especialmente en las plantas de desalación de agua de mar mediante ósmosis inversa. El empleo de Calcita granulada está reconocido por su interés, mejora y beneficio sobre la corrosión de las aguas blandas y desaladas.

- 1.Función: Ajustar el pH y la dureza del agua.
- 2.Dosis de tratamiento: La cantidad de Carbonato Cálcico a utilizar depende de la aplicación y de la calidad del agua.
- 3.Modo de aplicación: El producto se utiliza en los filtros.

La Calcita no altera las características organolépticas del agua al ser un producto mineral inerte. De acuerdo con las observaciones realizadas la calidad recomendada de la calcita para el uso en tratamiento de aguas de abastecimiento y para lechos de flujo ascendentes y altura constante sería como sigue en las **tablas 2 y 3**.

Tabla 2: Recomendaciones calidad de la Calcita (Adaptado de Hernández, Fernández, y Mar, 2008)

<i>Riqueza</i>	> 99 %
CaO	55,6%
Óxido de Hierro	< 0,05 %
Insolubles en clorhídrico >100 µm	< 0,2%
Peso específico (ton/m3)	2.7
Peso específico granulado 1-3 mm (t/m3)	1.5
Peso de la calcita granulada mojada 1-3 mm (t/m3)	1.3
<i>Granulometría:</i>	
Superior a 4 mm	máximo 1 %
Superior a 3 mm	máximo 10 %
Inferior a 1 mm	máximo 2 %
Inferior a 0,5 mm	1-3 %
Inferior a 0,1 mm	< 1,0%

Tabla 3: Composición química y propiedades. (Adaptado de Ficha Técnica Carbonato Cálcico, 2007)

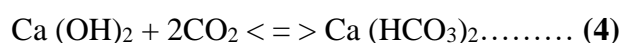
<i>Determinación</i>	<i>Resultado</i>
Riqueza en CO ₃ Ca (%)	99.1
Sílice (SiO ₂) (%)	0.30
Alúmina (Al ₂ O ₃) (%)	0.10
Magnesia (MgO) (%)	0.20

<i>Determinación</i>	<i>Resultado</i>
Sulfatos (SO ₃) (%)	0.10
Oxido Férrico	Trazas
Humedad (%)	0.14
pH	9.1
Dureza (Mohs)	3
Peso específico	2.7
Cal (CaO) (%)	55.50
Pérdida al fuego	43.60
Densidad Aparente (tm/m3)	1,1 / 1,2

3.2.7 Dosificación Mediante Cal

Se puede disponer únicamente para el proceso de remineralización de una dosificación con cal. Esta opción se recomienda cuando se asegure un contenido de CO₂ agresivo que nos permita obtener los niveles de dureza y alcalinidad requeridos en el agua de abastecimiento. Normalmente en la mayoría de los procesos de desalación por membrana este hecho se cumple siendo una solución adoptada con bastante frecuencia, no siendo factible en plantas de destilación por carecer, el agua producto, de CO₂ agresivo suficiente. **(Cabrerizo Pastor y Herráez Sánchez de las Mat, 2004)**

El aporte de dureza y alcalinidad se realiza en el agua desalada añadiendo al agua osmotizada hidróxido de cal disuelto en agua y dióxido de carbono, en las proporciones adecuadas para formar bicarbonato de calcio, siendo la reacción:



Como se muestra en la **Figura 6** la respuesta del agua desalada a la dosificación de Ca (OH)₂ es prácticamente inmediata. Sin embargo, con un aumento en el contenido en CO₂ del agua la curva va perdiendo pendiente, permitiendo una dosificación más precisa. Téngase en cuenta que la precisión que se consigue con este sistema es del orden de ±2 mg Ca (OH)₂/L. En cualquier caso, se trata de un proceso difícil de controlar. **La Figura 7** ilustra los

componentes de una instalación típica de dosificación de lechada de cal y CO_2 . Como puede verse el CO_2 se inyecta directamente antes de la lechada de cal y en el propio depósito de agua producto. El tiempo de contacto en el depósito es suficiente para garantizar una reacción completa. En algunos casos la dosificación se hace directamente en tubería. A veces también se utiliza un by-pass para hacer la mezcla de la lechada antes de inyectarla en la tubería general. En las instalaciones con mayor grado de automatización la cal se dosifica en función de la CE de la lechada. La CE es, en estos casos, un mejor indicativo de la calidad de la dosificación que el pH. La lechada se prepara en un concentrador hasta un máximo del 4% en $\text{Ca}(\text{OH})_2$. A continuación se envía al decantador, también llamado saturador, para eliminar las impurezas. La velocidad ascensional en el decantador debe ser del orden de 1,8 m/h y la altura de este de, al menos, 3,5 m. (Hernández Suárez, 2009)

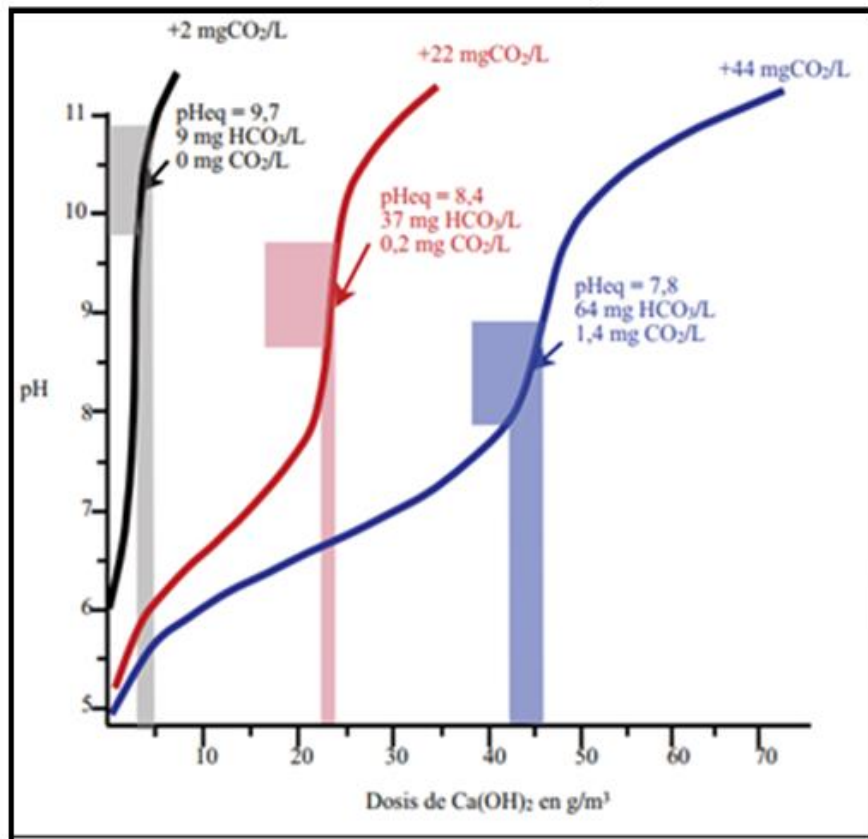


Figura 6: Relación entre la dosificación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y el aumento del pH para aguas desaladas con tres niveles de contenido en CO_2 . (Tomado de Hernández Suarez, 2009)

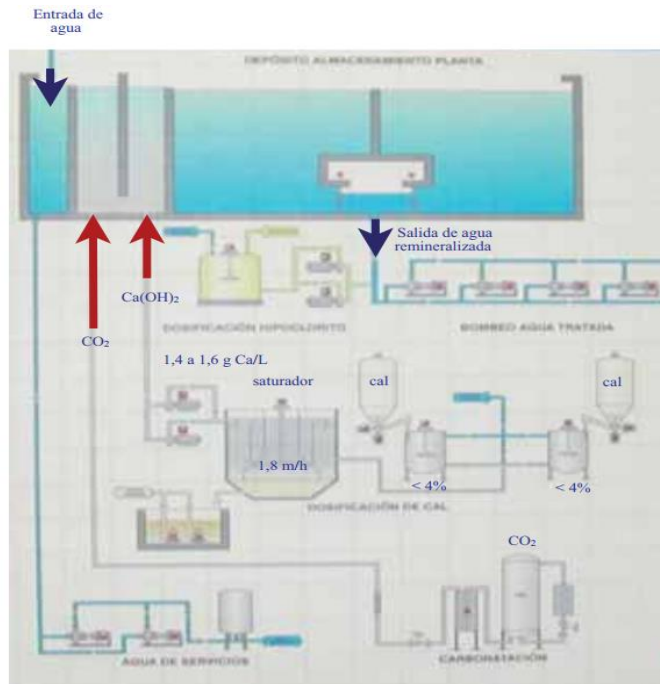


Figura 7: Esquema de una instalación de remineralización con preparación de lechada de cal y de dosificación de CO₂. (Tomado de Hernández Suárez, 2009)

La **Figura 8** muestra una foto de una instalación tipo de remineralización a base de lechada de cal. Los problemas de compactación del silo de cal suelen ser debido a la tendencia de la cal a absorber el agua y adherirse y compactarse. Dentro del silo se debe mantener la humedad lo más baja posible y reducir los periodos entre recargas para facilitar la renovación. La remineralización mediante cal requiere el doble de CO₂ que con calcita.

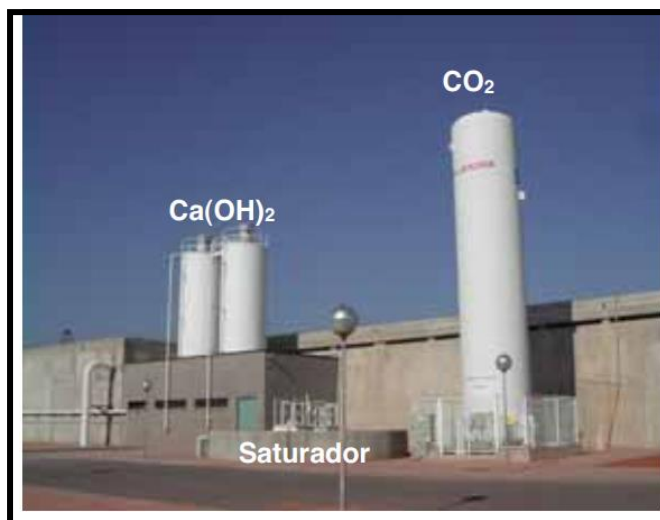


Figura 8:Planta de tratamiento de Ca (OH)₂ con un depósito de almacenamiento de CO₂ y un saturador de cal. (Tomado de Hernández Suarez, 2009)

3.2.7.1 Recomendaciones de la calidad de la Cal.

En la **tabla 4** se muestran las características que debe tener la Cal para su uso en el tratamiento de aguas. La cal es imprescindible para el tratamiento final de las aguas procedentes de la desalinización del agua del mar puesto que aporta uno de los compuestos nutricionales básicos - el calcio - y es necesaria para el mantenimiento del equilibrio cal-carbónico, con el fin de evitar incrustaciones o corrosiones.

Tabla 4: Recomendación para la calidad de la cal (Ca (OH)₂). Valores en % en peso seco. (Adaptado de Cabrerizo Pastor y Herráez Sánchez de las Mat, 2004)

<i>Parámetro</i>	<i>Valor recomendado</i>
Riqueza	96-97%
Granulometría:	
Ca (OH) ₂ soluble	> 87% en peso
Residuo inerte	<10% en peso
CaCO ₃	> 5% en peso
As	< 3 % en peso
Cd	< 1 % en peso
Cr	< 16 % en peso
Ni	< 2 % en peso
Pb	< 5 % en peso
Sb	< 1 % en peso
Se	< 1 % en peso
Fe	< 1 % en peso
Densidad a granel	< 0,6 t/m ³

3.2.8 Consumo de CO₂ según el tipo de tratamiento.

En la mayoría de las plantas desaladoras hay que añadir CO₂ después de la ósmosis inversa y antes de la remineralización. La dosificación de CO₂ necesaria para alcanzar los niveles de remineralización varían con el pH del permeado y el sistema de remineralización. **La remineralización con hidróxido de cal requiere el doble de CO₂ que la remineralización con calcita. (Tabla 5)**

Tabla 5: Comparación de remineralización mediante lechos de cal y calcita. (Adaptado de Cabrerizo Pastor & Herráez Sánchez de las Mat, 2004)

<i>Cal (Ca (OH)₂)</i>	<i>Calcita (CaCO₃)</i>
Menor precio:0.12 €/kg	Mayor Precio :0.21 €/kg
Desde el punto de Vista operativo:	Desde el punto de Vista operativo:
-menor volumen (ahorro 23% peso y 50% volumen)	-Necesitan espacio considerable, del cual muchas veces las instalaciones no disponen.
-Dosificación en agua más sencilla de controlar	-Dosificación en Agua más compleja debido a que la calcita es insoluble en agua.
-Fácil de Manejar. Mediante una bomba se controla caudal y lechada de cal.	-El tiempo de retención en los filtros varía dependiendo de rendimiento de la planta.
Mayor Consumo de CO ₂ (0.10-0.15 €/kg)	Menor Consumo de CO ₂ (0.10-0.15 €/kg)

En la **tabla 5** se puede ver que la remineralización mediante calcita necesita una inversión mucho mayor que los sistemas mediante cal, sin embargo, el consumo de CO₂ es mayor con la utilización de cal. La elección de un sistema u otro debe ser rentable o no en dependencia del tipo de remineralización que se deba lograr alcanzar, teniendo en cuenta las características del agua. En la **tabla 6** se muestra la cantidad de CO₂ que necesitan los restantes sistemas de remineralización.

Tabla 6: Reacciones químicas de algunos de los procesos de remineralización citados anteriormente. (Adaptado de Cabrerizo Pastor y Herráez Sánchez de las Mat, 2004)

Proceso de Remineralización	Ecuación del Proceso	Consumo de Reactivo Químico por incremento de 1 ud de alcalinidad	Incremento del contenido de cationes y aniones por mol/m³ de alcalinidad
Carbonato cálcico + Dióxido de carbono	$\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	50,1 ppm CaCO ₃ 100% 22 ppm CO₂	20 ppm Ca ²⁺
Dolomita + Dióxido de Carbono	$\text{MgO} \cdot \text{CaCO}_3 + 3\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Mg}(\text{HCO}_3)_2 + \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	35,1 ppm MgO·CaCO ₃ 100% 33 ppm CO₂	6,1 ppm Mg 10 ppm Ca ²⁺
Hidróxido cálcico + Dióxido de carbono	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	37,1 ppm Ca(OH) ₂ 100% 44 ppm CO₂	20 ppm Ca ²⁺
Cloruro cálcico + Bicarbonato sódico	$\text{CaCl}_2 + 2\text{NaHCO}_3 \rightleftharpoons \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 + 2\text{NaCl}$	55,5 ppm CaCl ₂ 100% 84 ppm NaHCO ₃ (100%)	23 ppm Na ⁺ 20 ppm Ca ²⁺ 35,5 ppm Cl
Carbonato cálcico + Ácido sulfúrico	$2\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightleftharpoons \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 + \text{Ca}(\text{SO}_4)$	100,1 ppm CaCO ₃ 100% 49 ppm H ₂ SO ₄	40,1 ppm Ca ²⁺ 48 ppm SO ₄ ³⁻
Hidróxido sódico + Dióxido de carbono	$\text{NaOH} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{NaHCO}_3$	40 ppm NaOH 100 % 44 ppm CO₂	23 ppm Na ⁺

3.3 Resultados.Casos de estudios (Cuba y España)

Para ver los resultados de esta investigación se tomaran dos casos de estudio, Planta desalinizadora de Alicante, España con una producción diaria de 50.000 m³/d y Planta desalinizadora de Cayo Santa Maria, Cuba. Teniendo datos del Agua producto se llevará esta agua a un proceso de remineralización mediante cal y calcita para así comprobar cual de los dos sistemas podría ser más eficiente técnica y económicamente.

3.3.1 Planta desalinizadora de Alicante España.

La desaladora de agua marina del Canal de Alicante produce diariamente 50.000 m³ de agua potable que se incorpora al Canal de Alicante de la Mancomunidad de los Canales del Taibilla aguas arriba de la toma de abastecimiento a Elche. La instalación está situada en el paraje de Aguamarga, en el término municipal de Alicante junto a la carretera N-332. Los caudales aportados son consumidos directamente en los términos de Elche, Santa Pola, Alicante y San Vicente del Raspeig. En la **Tabla 7** se muestra las características del agua de alimentación y Agua Producto luego de pasar por un proceso de osmosis inversa. Se realizará una comparación del agua permeada a una temperatura de 12°C (**Planta A**) y para una temperatura de 25°C (**Planta B**). La calidad del agua permeada depende en gran medida de la temperatura, a mayor temperatura será mayor el paso de sales, por lo que se realizará una comparación para observar la diferencia en la dosis de cal o calcita en una misma agua con solo variar la temperatura. La Planta A y Planta B, corresponden a la misma planta, la denominación se hace para referenciar los cambios de temperaturas aplicados en el agua bruta con el fin de comprobar los efectos causados en la remineralización.

Tabla 7: Características del agua de alimentación y Agua Producto para 12°C (Planta A) y 25°C (Planta B). Planta desaladora Alicante.

<i>Iones</i>	<i>Alimentación</i>	<i>Agua Producto</i> <i>Planta A (12°C)</i>	<i>Agua Producto</i> <i>Planta B (25°C)</i>
pH(u)	7.2	5.22	5.47
Ca (mg/l)	652.0	0.789	0.573
Mg (mg/l)	1660	2.009	1.458
Na (mg/l)	14149	66.23	51.47
K (mg/l)	520,9	3,40	2,762
Ba (mg/l)	0.0	0.0	0.0

<i>Iones</i>	<i>Alimentación</i>	<i>Agua Producto</i>	
		<i>Planta A (12°C)</i>	<i>Planta B (25°C)</i>
Sr (mg/l)	16500	0,02	0,0145
NH ₄ (mg/l)	0	0	0
Fe (mg/l)	0	0	0
HCO ₃ (mg/l)	145,7	1,08	1,052
Cl (mg/l)	25835	108,7	84,19
SO ₄ (mg/l)	3120	4,182	3,069
NO ₃ (mg/l)	2,10	0,0153	0,0126
F (mg/l)	1,50	0,0109	0,009
Br (mg/l)	130	0,547	0,427
B (mg/l)	5	0,452	0,868
SiO ₂ (mg/l)	0	0	0
PO ₄ (mg/l)	0,1	9,19exp-5	6,62 exp-5
CO ₃ (mg/l)	0,51	9,28exp-6	0,0087
CO ₂ (mg/l)	11,77	11,97	6,148
TDS (mg/l)	46238	187,5	145,9

El Caudal producto para la **Planta A** es 10 415 m³/d y para la **Planta B** es 10 000 m³/d.

Uno de los parámetros más importantes y de más influencia a la hora de realizar la remineralización es el LSI, en la **Tabla 8** se muestran los valores de LSI, RSI Y PSI para los parámetros a de la **Tabla 7** a 12°C y 25°C.

Tabla 8: Valores calculados mediante software disponible en el centro canario del agua para el cálculo de LSI, RSI y PSI. Planta A y Planta B.

<i>PARÁMETRO</i>	<i>UNIDADES</i>	<i>VALOR</i>	
		<i>Planta A</i>	<i>Planta B</i>
pH		5,216	5,472
C.E	μS/cm	375	291,8
TDS	mg/L	240	187
Ca ⁺²	mg/L	0,789	0,573

PARÁMETRO	UNIDADES	VALOR	VALOR
		Planta A	Planta B
Ca ⁺²	mg/L	1,97	1,43
	CaCO ₃		
HCO ₃ ⁻	mg/L	1,08	1,052
CO ₃ ²⁻	mg/L	0	0,0087
*Alcalinidad	mg/L	0,9	0,9
	CaCO ₃		
T^a	° C	12	25
Langelier (LSI)		-6,5	-6.1
Ryznar (RSI)		18,3	17.8
Puckorius (PSI)		18,9	18.1

Según la **Tabla 8** teniendo en cuenta el resultados de los índices el agua tiene una tendencia a ser corrosiva .

- ✓ Si LSI < 0, agua con tendencia a ser corrosiva
- ✓ RSI de 9,0 y mayor, Intolerablemente corrosiva
- ✓ PSI > 6,5 Tendencia a la corrosión

3.3.2 Planta desalinizadora de Cayo Santa María. Cuba

La desaladora de agua marina de Cayo Santa María produce diariamente 2160 m³ de agua potable. Su funcionamiento es vital, no solo para garantizar una parte del agua que requieren los hoteles del polo, sino también para brindar seguridad ante posibles fallos en otros sistemas de abasto. La planta toma agua de pozos salinos que tienen aguas de las siguientes características.

Tabla 9: Características del agua de alimentación y agua Producto. Planta desaladora Cayo Santa María. Planta C.

<i>Iones</i>	<i>Alimentación Planta C</i>	<i>Producto Planta C</i>
pH (u)	7,23	6,9
Temperatura (°C)	24.8	24,9
Ca ²⁺	600	1,9
Mg ²⁺ (mg/L)	720	2,7
Na ¹⁺ (mg/L)	8050	12
K ¹⁺ (mg/L)	78	1
CO ₃ ²⁻ (mg/L)	0	0
HCO ₃ ¹⁻ (mg/L)	735	3,5
Cl ¹⁻ (mg/L)	13648	28
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	2116	5,5
NO ₃ ¹⁻ (mg/L)	55,8	6,2
SST (mg/L)	26000	502

Siguiendo los mismos pasos anteriores se procederá el cálculo del LSI, RSI y PSI para ver el tipo de agua que tendremos en el proceso de remineralización

Tabla 10: Valores calculados mediante software disponible en el centro canario del agua para el cálculo de LSI, RSI y PSI. Planta Cayo Santa María. Planta C.

<i>PARÁMETRO</i>	<i>UNIDADES</i>	<i>VALOR Planta C</i>
pH		7,5
C.E	μS/cm	600
TDS	mg/L	500
Ca ⁺²	mg/L	1,9

<i>PARÁMETRO</i>	<i>UNIDADES</i>	<i>VALOR</i>
		<i>Planta C</i>
Ca ⁺²	mg/L CaCO ₃	4,74
HCO ₃ ⁻	mg/L	3,5
CO ₃ ²⁻	mg/L	0
*Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	2,9
T^a	° C	25
Langelier (LSI)		-3,1
Ryznar (RSI)		13,8
Puckorius (PSI)		15,9

Según la **Tabla 10** teniendo en cuenta el resultados de los índices el agua tiene una tendencia a ser corrosiva .

3.3.3 Remineralización de las Aguas Mediante Cal y Calcita.

En primer lugar se realizó una investigación bibliográfica sobre los métodos de remineralización más utilizados, los cuales fueron explicados brevemente en el **apartado 3.2**. Luego de tener las características del agua producto de las plantas a analizar se comenzará con el cálculo de las características que debe tener el agua una vez remineralizada para cumplir con los parametros del RD 140/2003 y NC 827:2017, para estos calculos se utilizo el software disponible en el centro canario del agua para el cálculo de LSI, RSI y PSI. Los valores Finales para los cuales se obtiene un agua completamente remineralizada y con un LSI que cumple con las anteriores normativas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 11: Valores que debe tener el agua para que se encuentre correctamente remineralizada según las normas empleadas.

<i>PARÁMETRO</i>	<i>UNIDADES</i>	<i>VALOR</i>	<i>VALOR</i>	<i>VALOR</i>
		<i>PLANTA A</i>	<i>PLANTA B</i>	<i>PLANTA C</i>
pH		7,8	7,8	7,8
C.E	μS/cm	375	291	600
TDS	mg/L	240	186	384
Ca ⁺²	mg/L	75	60	60
Ca ⁺²	mg/L	187,03	149,63	149,63
	CaCO ₃			
HCO ₃ ⁻	mg/L	70	60	60
CO ₃ ²⁻	mg/L	25	21	20
*Alcalinidad	mg/L	98,4	83,6	82,0
	CaCO ₃			
T ^a	° C	12	25	24,8
Langelier (LSI)		0,1	0,2	0,1
Ryznar (RSI)		7,6	7,4	7,5
Puckorius (PSI)		7,9	7,8	7,9

Para lograr un LSI de acuerdo con la norma fue necesario aumentar el ph de ls plantas, para la cual se le añade 2±0.5 mgNa(OH)/l al 33 % de pureza.

La tabla anterior cumple con los estipulado en el RD 140/2003 y NC 827/2017 ,el LSI se encuentra en un rango de ±0.5 y todos los demas parámetros estan dentro de la norma.

El siguiente paso es calcular la cantidad de oxigeno a utilizar ya sea para una remineralización mediante cal o mediante calcita.Para lo cual se utilizo la siguiente figura.

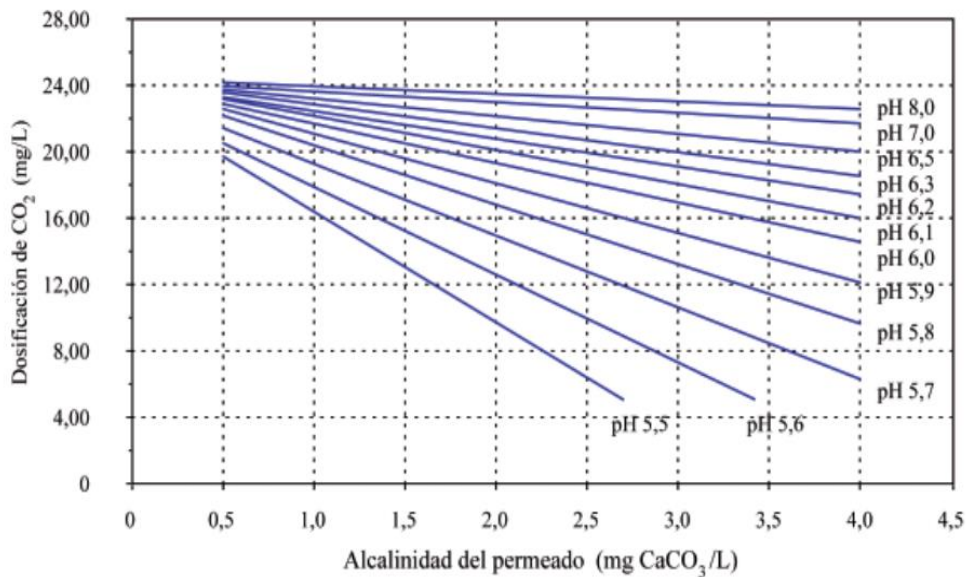


Figura 9:Relación entre el pH y alcalinidad para conseguir el CO₂ necesario para lechos de calcita. (Tomado de Hernández Suarez, 2009)

La dosificación de CO₂ necesario depende de los niveles de remineralización propuestos en la **tabla 11**, la dosis requerida depende de la alcalinidad del agua producto antes de la remineralización y del ph .

La dosificación de la **figura 9** se refiere a dosificación mediante lechos de calcita, en caso de utilizar Ca(OH)₂ (Cal) la dosificación de CO₂ será el doble, la dosis de la **figura 9** es para una eficiencia del 100%. (Hernández Suárez, 2009)

Tabla 12: Dosis necesaria de CO₂ teniendo en cuenta la figura 9.

<i>Plantas</i>	<i>Alcalinidad mg/CaCO₃</i>	<i>CO₂ Calcita mg CO₂/L</i>	<i>CO₂ Cal mg CO₂/L</i>
A	0,9	16	32
B	0,9	18	36
C	2,9	23	46

3.3.3.4 Diseño de los lechos de Calcita

En el apartado 3.2.6 se realizó una explicación acerca del uso de la calcita en la remineralización, por lo tanto en este apartado solo se realizará el diseño de los lechos calcita.

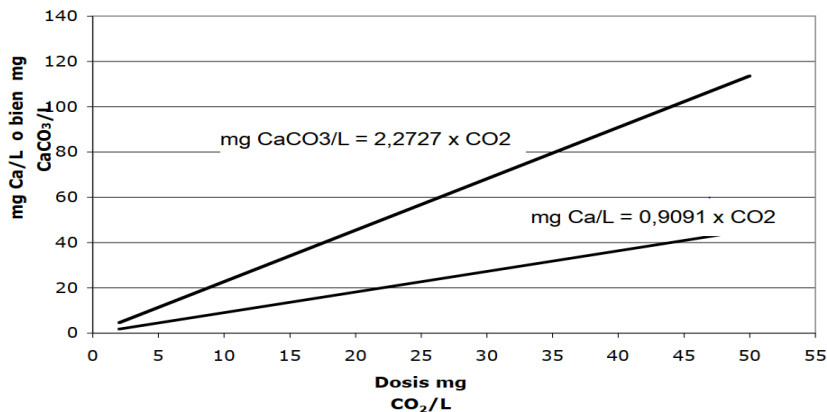


Figura 10: Relación estequiométrica entre la cantidad de CO₂ presente en el agua y la cantidad de calcio disuelto según la reacción (3). (Hernández Suárez, 2009)

Según la Figura 10 para el contenido de mg CO₂ que serán necesarios utilizar, aparecerán disueltos la cantidad de mg Ca/L que se muestra en la siguiente tabla por planta o el equivalente en dureza mg CaCO₃/L.

Tabla 13: Dosis necesaria de Ca/l y su equivalente en dureza mg CaCO₃/L. Según Figura 10.

<i>Planta</i>	<i>mg CO₂</i>	<i>mg Ca/L</i>	<i>mg CaCO₃/L</i>
Planta A	16	14,6	36,36
Planta B	18	16,4	40,91
Planta C	23	20,9	52,27

Tabla 14: Dosificación necesaria de CO₂ por día que va a consumir cada planta.

<i>Planta</i>	<i>Q diario m³/d</i>	<i>CO₂ mg/l</i>	<i>Co₂ Kg/d</i>
Planta A	10415	18	187,47
Planta B	10000	16	160
Planta C	2160	23	49,68

El CO₂ se almacena en forma líquida en depósitos aislados, a -20 °C y 20 Kg/cm². Se deberán considerar unos depósitos con capacidad de, al menos, **40.000 kg** para las plantas A y B, para la planta C una capacidad de **10.000 kg**.

El CO₂ vaporizado se conectará al correspondiente cuadro de control para permitir la expansión, medida y regulación del gas carbónico en función del caudal de dosificación de CO₂. El caudal de dosificación será regulado por el caudal y pH del agua producto.

El equipo de control constará, al menos, de los siguientes elementos: línea de gas en acero estirado, válvulas, reductor de expansión, rotámetro de medida de caudal, válvulas de regulación, colector, pH metro y sistema de inyección de CO₂. El CO₂ se inyectará directamente en la tubería de agua producto antes de entrar en los lechos de calcita. **(Hernández Suárez, 2009)**

Se realizará el diseño de un lecho de calcita de flujo ascendente y de altura constante ya que tienen la ventaja que la calidad del agua de salida es siempre constante

El funcionamiento de la celda propuesta es como sigue: el agua entra en la parte inferior de la celda y se distribuye a través del piso filtrante. A continuación, asciende desde la parte inferior del lecho de carbonato cálcico triturado y a medida que sube por el lecho el agua va corrigiendo su composición química.

El anhídrido carbónico disuelto en el agua, reacciona con el carbonato cálcico del lecho formando bicarbonato cálcico soluble, con lo que aumenta el pH. Una vez atravesado el lecho, el agua ya remineralizada entra en una zona de remanso y abandona a continuación la celda por un vertedero interior. **(Hernández Suárez, 2009)**

El vertedero interior comunica con el exterior a través de un pasamuros situado a un lado de la celda. Las celdas cuentan con un silo de reserva en su parte superior, así como unos pequeños conos alimentadores que guían el producto desde dicho silo hasta la superficie del lecho. De esta forma el producto se dosifica sobre el lecho por gravedad y a medida que al agua va consumiendo la calcita. La dosificación se realiza, por tanto, de forma muy lenta y sin crear turbulencias. El sistema se autoalimenta según la demanda natural del agua. **(Hernández Suárez, 2009)**

El sistema funciona con la presión de salida de los bastidores (0,5 atm aprox.) y vierte a presión atmosférica. El agua remineralizada que abandona las celdas vierte por gravedad al depósito de agua tratada.

Para la selección de la **velocidad ascensional** utilizamos el **figura 11**, teniendo en cuenta que según las normas estudiadas el nivel de turbidez debe ser de menos de 1 NTU.

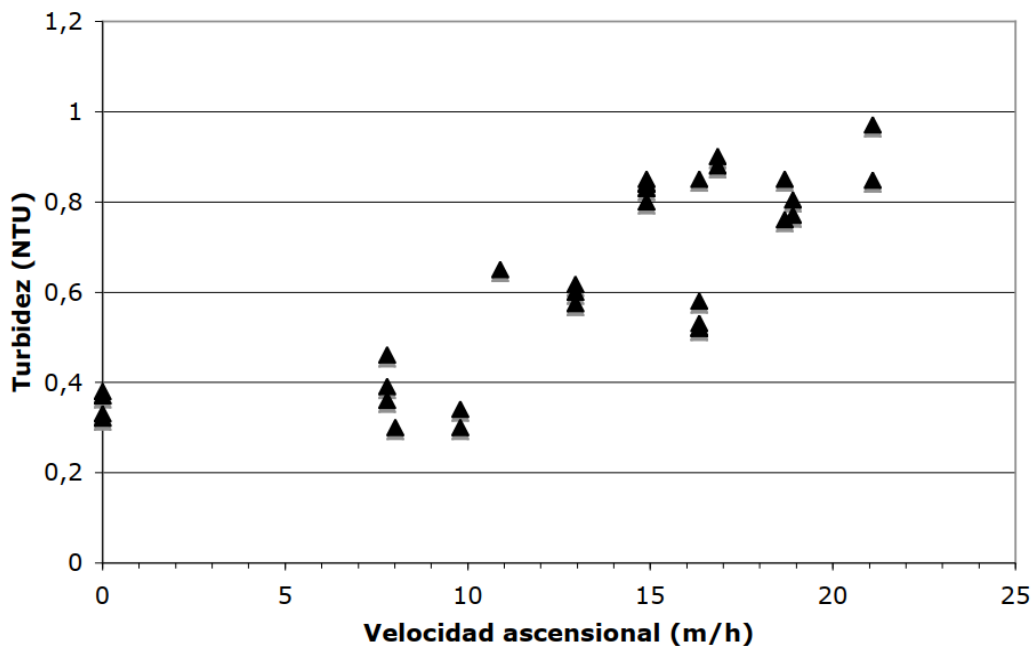


Figura 11:Relación entre Turbidez y Velocidad ascensional para lechos de calcita de altura constante (2 m de diámetro). (Hernández Suárez, 2009)

Se estima una **velocidad ascensional de 15.3 m/h**, con lo cual se procede al cálculo de la superficie de lecho, se muestran las superficies calculadas en la **tabla 15**.

Tabla 15: Superficie del lecho según la velocidad ascensional y el caudal de cada planta.

<i>Planta</i>	<i>Q diario m³/d</i>	<i>Velocidad Ascensional m/h</i>	<i>Superficie Km²</i>
Planta A	10415	15,3	28,36
Planta B	10000	15,3	27,23
Planta C	2160	15,3	5,88

Esta superficie estará dividida en 5 celdas en el caso de las Plantas A y B y una sola celda para la Planta C, las superficies de cada una se muestran en la siguiente tabla, el funcionamiento de estas será en paralelo.

Tabla 16: Superficie del lecho de calcita por celdas.

<i>Planta</i>	<i>Superficie Km²</i>	<i>Número de celdas</i>	<i>Superficie de cada celda Km²</i>	<i>Área de cada celda m²</i>
Planta A	28,36	5,00	5,67	2x2,84
Planta B	27,23	5,00	5,45	2x2,73
Planta C	5,88	1,00	5,88	2x2,94

Se ha partido de una calidad del agua y unos objetivos de calidad descritos apartado 3.3.1 y 3.3.2; una dosis de CO₂ descrita en la **tabla 12** y una velocidad ascensional de 15,3 m/h. Se asume que la calcita tendrá una pureza del 99% y una granulometría de 1-2 mm. Por lo que el **tiempo de contacto será de 11 mín.**, según **Hernandez Suarez, 2009** lo que implica **una altura de lecho de 2,86m. Se escogerá una altura del silo de calcita de 1.30m según criterios** (Hernandez Suarez, Guía para la remineralización de aguas desaladas , 2009)

En los lechos de calcita puede, con el tiempo, desarrollarse pasos preferenciales o acumularse impurezas en la superficie de las partículas. Por ello, se ha contemplado un sistema de inyección de aire en las tuberías de entrada que ayudará a esponjar y limpiar el lecho en caso de que disminuya su rendimiento. La frecuencia de inyección de aire para

esponjar el lecho dependerá de la calidad de la calcita y las condiciones de operatividad. En condiciones normales de funcionamiento no deberán ser necesarias más de 2 a 4 purgas anuales de 2-3 minutos cada una. El caudal de aire del compresor para esta operación será del orden de 80 m³ por m² y hora. (Hernandez Suarez, Guía para la remineralización de aguas desaladas , 2009) Dado que la limpieza es secuencial celda por celda, el compresor tendrá la capacidad que sugiere la siguiente tabla:

Tabla 17: Tamaño del compresor.

<i>Planta</i>	<i>Superficie de cada celda Km²</i>	<i>Compresor de Aire m³/h</i>
Planta A	5,67	453,81
Planta B	5,45	435,73
Planta C	5,88	470,59

Cada celda contará con un silo de calcita propio situado sobre las placas de dosificación y que permitirá un funcionamiento autónomo de varias semanas en condiciones de máximo consumo, el volumen de los silos se muestra en la siguiente tabla al igual que la autonomía de los silos.

Tabla 18: Autonomía para un aprovechamiento del 70%

<i>Planta</i>	<i>Q diario m³/d</i>	<i>mg CaCO₃ /L</i>	<i>Consumo de CaCO₃ t/d</i>	<i>Volumen de Almacenamiento para Aprovechamiento del 70%(T)</i>	<i>Autonomía días.</i>
Planta A	10415	36,36	0,37	38,72	104,64
Planta B	10000	40,91	0,4	37,17	92,92
Planta C	2160	52,27	0,11	8,025	72,95

La calidad y especificaciones de la calcita fueron dadas en el apartado 3.2.6

3.3.3.5 Remineralización Mediante Cal.

En el apartado 3.2.7 se realizó la descripción sobre el proceso de remineralización mediante cal, en este apartado solo se procederá a los cálculos del consumo en CO_2 y $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que tendrán los sistemas de remineralización mediante cal, no se realizará los cálculos para el diseño de los lechos de cal ya que a diferencia de los sistemas de remineralización mediante calcita, en este caso lo que supondrá el mayor coste será el consumo de CO_2 . En la **tabla 12** se muestran los consumos de CO_2 necesarios para remineralizar el agua mediante lechos de Cal. En la **tabla 19** se muestra el consumo diario de CO_2 que tendrá el sistema de remineralización mediante lechos de cal para una dosificación en tubería.

Tabla 19: Dosificación necesaria de CO_2 por día que va a consumir cada planta.

<i>Planta</i>	<i>Q diario</i> <i>m³/d</i>	<i>CO₂ mg/l</i>	<i>CO₂ Kg/d</i>
Planta A	10415	32	333,28
Planta B	10000	36	360
Planta C	2160	46	99,36

La cal puede ser añadida mediante en su forma viva (CaO), o en su forma apagada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), siendo esta más efectiva y será la que utilizaremos en esta investigación, se requiere de una preparación previa y alojamiento en forma de lechada antes de la aplicación. Para la preparación de la lechada de cal se utiliza un tanque de mezcla rápida donde la cal sólida se aplica para dar origen a la lechada. Según la planta se establece una concentración la cual se mantiene lista para la aplicación.

Según la **figura 6 (Tomada de Hernandez Suarez, 2009)** y teniendo en cuenta un pH común de 7.8 para las tres plantas (se llevo a ese parámetro para minimizar los cálculos de las tres plantas y llevarlo a un cálculo común), se obtiene un una dosificación necesaria de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de 41 g/m³. La dosificación diaria para cada planta sería la mostrada en la **tabla 20**

Tabla 20: Dosificación diaria de Ca (OH)₂

<i>Planta</i>	<i>Q diario m³/d</i>	<i>Ca (OH)₂ g/m³</i>	<i>Consumo diario Ca (OH)₂ g/m³</i>	<i>Consumo diario Ca (OH)₂ kg/m³</i>
Planta A	10415	41	427015	427,015
Planta B	10000	41	410000	410
Planta C	2160	41	88560	88,56

En el esquema de la Figura 12, se muestra el proceso de dosificación ,siendo F₁, F₂ y F₃ los caudales que entran.

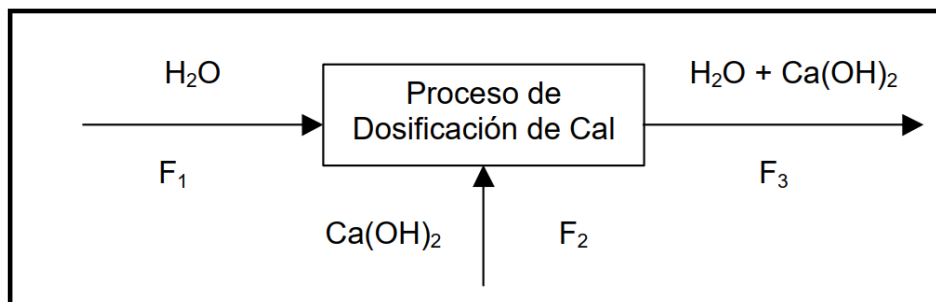


Figura 12: Diagrama del proceso de Dosificación de cal. (Tomado de Noreña Calvo, 2002)

La lechada se prepara en un concentrador hasta un máximo del 4 % en Ca(OH)₂ . Seguido se envía al decantador también llamado saturador, para eliminar impurezas. La velocidad ascensional debe ser en el orden de 1.8 m/h y la altura 3.5m según **Hernández Suárez, 2009**. En la **Tabla 21** se muestra los parámetros para realizar el diseño de los silos de cal.

Tabla 21: Parámetros básicos para el diseño

<i>Parámetros</i>	<i>Planta A</i>	<i>Planta B</i>	<i>Planta C</i>
Flujo de Entrada (m ³ /d)	10.415	10.000	2.160
Flujo de Entrada (m ³ /h)	434	417	90
Temperatura °C	12	25	25
Edad de la Membrana	3,6	3,6	3,6
Líneas de proceso	1	1	1

Teniendo en cuenta la cantidad de oxígeno consumido según **tabla 20** se calcula la capacidad máxima de cada unidad de vaporizador **tabla 22**.

Tabla 22 : Cálculo de Vaporizadores para CO₂

<i>CO₂ Vaporizadores</i>	<i>Planta A</i>	<i>Planta B</i>	<i>Planta C</i>
Número de vaporizadores en funcionamiento (Unid)	1	1	1
Número de vaporizadores en reserva (Unid)	0	0	0
Capacidad de la unidad de vaporizador (Kg/h)	13,9	15,0	4,1
Capacidad máxima requerida de la unidad de vaporizador (Kg/h)	13,9	15,0	4,1
Capacidad máxima seleccionada (Kg/h)	15,0	15,0	6

Teniendo en cuenta la cantidad de CO₂ necesario se procede al cálculo del dimensionamiento de los tanques de CO₂ en la **tabla 23**

Tabla 23: Dimensionamiento de tanques para CO₂

<i>Dimensionamiento Tanque CO₂</i>	<i>Planta A</i>	<i>Planta B</i>	<i>Planta C</i>
Autonomía de un Tanque (días)	40	40	40
Número de Tanques (Unid)	1	1	1
Capacidad de Tanques (T)	13,3	14,4	4,0
Densidad de CO ₂	1,1	1,1	1,1
Volumen del Tanque (m ³)	12,2	13,2	3,6

Los tanques necesitaran Bombas de dilución que podran seguir los parámetros de la **tabla 24**

Tabla 24: Bombas de dilución de CO₂

<i>Bombas de Dilución</i>	<i>Planta A</i>	<i>Planta B</i>	<i>Planta C</i>
Flujo para postratamiento (m ³ /h)	434,0	416,7	90,0
Porción que se utilizará (%)	5%	5%	5%
Flujo requerido de la bomba (m ³ /h)	21,7	20,8	4,5

<i>Bombas de Dilución</i>	<i>Planta A</i>	<i>Planta B</i>	<i>Planta C</i>
Número de bomba en funcionamiento (Unidades)	1	1	1
Número de bombas en reserva (Unidades)	1	1	1
Unidad de flujo requerido (m ³ /h)	21,7	20,8	4,5

Los parámetros técnicos de la bomba seleccionada serán comunes y se muestran en la **tabla 25**

Tabla 25: Bombas de dilución de CO2 características de las bombas.

<i>Eficiencia del Motor</i>	0,925
Eficiencia de la Bomba	0,786
Densidad del Fluido	1,00
Potencia de Bomba (kW)	1,65
Voltaje Motor (V)	415
Potencia de Motor (kW)	5,50

Teniendo en cuenta el consumo diario de cal **tabla 20**, se procede al dimensionamiento de los tanques de cal, se muestran los datos calculados en la **tabla 26**, se obtienen además los parámetros básicos para el dimensionamiento de bombas de lodo **Tabla 27 y Tabla 28**

Tabla 26: Dimensionamiento tanque de Ca (OH)₂.

<i>Dimensionamiento Tanque Ca (OH)₂</i>	<i>Planta A</i>	<i>Planta B</i>	<i>Planta C</i>
Autonomía de los Tanques (Días)	15	15	15
Densidad (kg/l)	0,53	0,53	0,53
Capacidad (m ³)	12,1	11,6	2,5
Número de Tanques (unid)	1,0	1,0	1,0
Volumen Requerido (m ³)	12,1	11,6	2,5
Diámetro (m)	0,91	0,87	0,69
Altura (m)	5,00	5,00	2
Volumen del tanque (m ³)	13,00	12,00	3

Tabla 27: Bombas de Lodo Ca (OH)₂

<i>Parámetros Bombas de Lodo</i>	<i>Planta A</i>	<i>Planta B</i>	<i>Planta C</i>
Concentración de lechada de cal (%)	4	4	4
Concentración de lechada de cal (kg/m ³)	40	40	40
Unidades en ejecución de escenario de flujo mínimo (unid)	1	1	1
Unidades de funcionamiento del escenario de caudal nominal (unid)	1	1	1
Unidades de funcionamiento del escenario de flujo máximo (unid)	1	1	1
Número de Bombas (Unid)	1	1	1
Bombas de Reserva (Unid)	1	1	1

En la **tabla 28** se muestra el diseño del depósito de lodo de los silos de cal y en la **tabla 29** el diseño de depósito de aguas saturada.

Tabla 28: Diseño depósito de Lodo

<i>Parámetros depósito de Lodo</i>	<i>Planta A</i>	<i>Planta B</i>	<i>Planta C</i>
Tiempo de Retención (min)	35	35	35
Número de Tanques (Unid)	1	1	1
Número de Tanques de Reserva (Unid)	0	0	0
Volumen del Tanque (m ³)	0,23	0,25	0,05

Tabla 29: Diseño depósito de Agua Saturada

<i>Depósito de Agua Saturada</i>	<i>Planta A</i>	<i>Planta B</i>	<i>Planta C</i>
Tiempo de Retención	12	12	12
Flujo (m ³ /h)	13,6	13,1	2,8
Volumen (m ³)	2,7	2,6	0,6
Número de Tanques (Unid)	1,0	1,0	1,0
Tanques de Reserva (Unid)	2,7	2,6	0,6
Diámetro (m)	1,0	1,0	0,8

<i>Depósito de Agua Saturada</i>	<i>Planta A</i>	<i>Planta B</i>	<i>Planta C</i>
Altura (m)	1,0	1,0	0,5
Volumen de Tanque (m3)	3,0	3,0	1,0

La diferencia fundamental de este proceso con remineralización mediante calcita es que lleva el doble de CO₂, lo que hace encarcarse mucho el proceso.

La calidad y especificaciones de la calcita fueron dadas en el apartado 3.2.7

3.3.4 Remineralización Mediante Mezcla de Agua Bruta y Agua Permeada.

Es muy frecuente mezclar aguas saladas con aguas producto para intentar lograr un agua remineralizada, siempre y cuando se manga el criterio de LSI entre ± 0.5 .

En este apartado mediante el uso del programa softmix se analizarán si es válido realizar este tipo de remineralización con los parámetros de las aguas que presentan las plantas con las que estamos trabajando. Se realizará un análisis de las distintas proporciones de mezcla para tratar de obtener un resultado que cumpla con las normas establecidas en el apartado 3.4.

Tabla 30: Mezcla de Agua de Alimentación y Agua producto para la Planta A.

<i>% Agua 1</i>	<i>100%</i>	<i>90%</i>	<i>80%</i>	<i>70%</i>	<i>60%</i>	<i>50%</i>	
<i>% Agua 2</i>	<i>0%</i>	<i>10%</i>	<i>20%</i>	<i>30%</i>	<i>40%</i>	<i>50%</i>	
CE ($\mu\text{S/cm}$)	375,00	375,00	4961,30	9547,60	14133,90	18720,20	23306,50
pH	5,22	6,19	6,21	6,27	6,33	6,39	6,47
CO ₃ ²⁻	0,51	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03
HCO ₃ ⁻	1,08	11,57	21,10	31,24	42,47	54,76	68,16
Cl ⁻	108,70	108,70	2681,33	5253,96	7826,59	10399,22	12971,85
SO ₄ ²⁻	4,18	4,18	315,76	627,35	938,93	1250,51	1562,09
NO ₃ ⁻	0,02	0,02	0,22	0,43	0,64	0,85	1,06
PO ₄ ²⁻	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
F ⁻	0,01	0,01	0,16	0,31	0,46	0,61	0,76
Na ⁺	66,23	66,23	1474,51	2882,78	4291,06	5699,34	7107,62
K ⁺	3,40	3,4	55,15	106,9	158,65	210,4	262,15
Ca ₂ ⁺	0,79	0,79	65,91	131,03	196,15	261,27	326,39

<i>% Agua 1</i>	<i>100%</i>	<i>90%</i>	<i>80%</i>	<i>70%</i>	<i>60%</i>	<i>50%</i>	
% Agua 2	0%	10%	20%	30%	40%	50%	
Mg ₂ ⁺	2,01	2,01	165,81	329,61	493,41	657,21	821,00
Fe ₂ ⁺	0,00	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
NH ₄ ⁺	0,00	0	0	0	0	0	0
Boro	0,45	0,452	0,9068	1,3616	1,8164	2,2712	2,726
SiO ₂	0,00	0	0	0	0	0	0
CO ₂ f (alcalinidad, pH)	20,91	2,22	16,69	27,45	34,86	39,43	41,38
CO ₂ (% de CIT)	20,73	13,72	16,65	19,14	20,84	21,78	21,91
Temperatura (°C)	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	1,74	1,74	13,50	25,27	37,04	48,81	60,58
STD (mg/L)	208,29	208,29	4796,11	9383,93	13971,74	18559,56	23147,38
CIT (mmol/L)	0,50	0,50	0,72	0,95	1,17	1,39	1,62
suma							
pH _{sat}	11,64	11,44	8,74	8,20	7,88	7,64	7,46
CL/HCO ₃ ⁻ (meq/meq)	170,38	15,90	215,14	284,73	311,97	321,47	322,14
Langelier IS	-6,42	-5,25	-2,53	-1,94	-1,55	-1,25	-1,00

Como se puede ver en la tabla, la remineralización en ese caso no sería válida, ya que se incumple con una serie de parámetros incluidos el LSI. Solo se hizo hasta un 50 % de mezcla ya que los parámetros mientras más baja fuera la mezcla más alta sería la conductividad en el agua remineralizada. Siendo

✓ **AGUA 1---- agua producto**

✓ **AGUA 2---- agua de alimentación.**

Los cálculos no se realizaron para la planta B, ya que la conductividad del agua de alimentación es la misma y al ser un agua completamente de mar este tipo de remineralización es inviable.

Tabla 31: Mezcla de Agua de Alimentación y Agua producto para la Planta C.

% Agua 1		100%	90%	80%	70%	60%	50%	
% Agua 2		0%	10%	20%	30%	40%	50%	
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)		600,00	600,00	3140,00	5680,00	8220,00	10760,00	13300,00
pH		6,90	6,77	6,76	6,77	6,80	6,84	6,88
CO_3^{2-}		0,00	0,00	0,04	0,10	0,20	0,32	0,49
HCO_3^-		3,50	3,23	67,62	136,10	207,71	282,13	359,07
Cl^-		28,00	28,00	1390,00	2752,00	4114,00	5476,00	6838,00
SO_4^{2-}		5,50	5,50	216,55	427,60	638,65	849,70	1060,75
NO_3^-		6,20	6,20	11,16	16,12	21,08	26,04	31,00
PO_4^{2-}		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F^-		0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Na^+		12,00	12,00	815,80	1619,60	2423,40	3227,20	4031,00
K^+		1,00	1	8,7	16,4	24,1	31,8	39,5
Ca_2^+		1,90	1,90	61,71	121,52	181,33	241,14	300,95
Mg_2^+		2,70	2,70	74,43	146,16	217,89	289,62	361,35
Fe_2^+		0,00	0	0	0	0	0	0
NH_4^+		0,00	0	0	0	0	0	0
Boro		0,00	0	0,5	1	1,5	2	2,5
SiO_2		0,00	0	0	0	0	0	0
CO_2 f		0,72	0,98	22,03	41,30	57,53	70,36	79,76
(alcalinidad, pH)								
CO_2 (% de CIT)		0,73	0,91	14,21	24,54	32,59	38,59	42,73
Temperatura		24,90	24,90	24,89	24,88	24,87	24,86	24,85
($^{\circ}\text{C}$)								
Alcalinidad (mg		2,87	2,87	62,83	122,79	182,75	242,70	302,66
CaCO_3/L)								
STD (mg/L)		61,53	61,53	2663,25	5264,98	7866,70	10468,42	13070,14
CIT (mmol/L)		0,07	0,07	1,43	2,79	4,15	5,51	6,87
suma								
pH_{sat}		10,81	10,61	7,83	7,27	6,94	6,71	6,52
$\text{CL}^-/\text{HCO}_3^-$		13,54	14,67	34,80	34,23	33,53	32,86	32,24
(meq/meq)								

% Agua 1	100%	90%	80%	70%	60%	50%	
% Agua 2	0%	10%	20%	30%	40%	50%	
Langelier IS	-3,91	-3,84	-1,07	-0,50	-0,14	0,13	0,36

Al igual que el caso de las **Plantas A y B** , la **Planta C** no cumple con los parámetros básicos que debe cumplir un agua remineralizada para ser apta para el consumo. En este caso, no sería posible la remineralización mediante mezcla con agua de Alimentación y agua Producto. Este tipo de remineralización es útil cuando el agua tiene una salinidad baja ,para se va a concentrar más de lo permitido en cloruros y en sodio, llegando al límite máximo de conductividad o salinidad permitido por la legislación, y en cambio no habrás podido llegar al contenido en Calcio necesario para que el pH y el índice de Langelier consigan valores que se puedan considerar como potables.

3.4 Normas de calidad de agua empleada en cada país.

En todos los países existen normas de calidad de agua potable, toda agua para ser apta para el consumo debe cumplir con el rango admisible de todos los parámetros que puedan ser dañinos para la salud.

3.4.1 Real Decreto 140/2003, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.

Toda estación de tratamiento de agua potable en España debe cumplir con los criterios establecidos en RD 140/2003, el agua a la salida de la OI es una agua ultra pura, por lo que no es apta para el consumo humano debido al déficit de minerales que presenta, de ahí lograr remineralizar el agua hasta lograr que alcance los parámetros básicos que se establecen en dicha norma ver Anexos. **Tabla A-1**

3.4.2 Norma cubana 817/2017 requisitos sanitarios de agua potable.

Al igual que lo descrito en el apartado **3.4.1** en Cuba las aguas deben cumplir con los criterios de la NC 827/2017, para lo cual es necesario remineralizar las aguas hasta alcanzar los parámetros descritos en los Anexos, **Tabla A-2** y **Tabla A-3**.

3.5 Analisis economico del empleo de cal y calcita en cada lugar

Para realizar este análisis se utilizó la hoja de cálculo habilitada en el centro canario del agua (<https://fcca.es/>). El objetivo es demostrar que opción a utilizar sería más factible económicamente, teniendo en cuenta que el proceso se realizó partiendo de la calidad de agua que deseábamos obtener por lo tanto la calidad sería la misma para ambos métodos, en las **tablas 32 y 33** se muestran los análisis económicos realizados.

Tabla 32: Coste Económico Para Remineralización mediante Cal (Ca (OH)₂).

<i>Parámetros a Evaluar Costes</i>		<i>Planta A</i>	<i>Planta B</i>	<i>Planta C</i>	
CO₂ + Ca (OH)₂	Caudal permeado	m ³ /d	10.415	10000	2160
	Precio CO ₂	€/kg	0,37	0,37	0,37
	Dosis CO ₂	g/m ³	32	36	46
	Dosis CO ₂	kg/d	333,28	360	99,36
	Coste CO ₂	€/d	123,3136	133,2	36,7632
	Coste CO ₂	€/m ³	0,012	0,013	0,017
	Coste CO ₂	€/año	45.009	48.618	13.419
	Alquiler Depósito	€/año	13.000	13.000	13.000
	Coste alquiler	€/m ³	0,0034	0,0036	0,0165
	Coste por recarga	€/recarga	60	60	60
	Núm. recargas al año	Recargas/año	10	10	10
	Carga CO ₂	€/año	600	600	600
	Coste Carga	€/m ³	0,0002	0,0002	0,0008
	Total, CO ₂	€/m ³	0,0154	0,0170	0,0343
	Riqueza del Ca (OH) ₂	%	100%	100%	100%
	Consumo (CaOH) ₂	g/m ³	427015,00	410000,00	88560,00
	Precio Ca (OH) ₂	€/kg	0,05	0,05	0,05
	Coste Ca (OH) ₂	€/m ³	21,3508	20,5000	4,4280
	Coste CO ₂ +Ca (OH) ₂	€/m ³	21,366	20,517	4,462
	Coste CO₂+Ca (OH)₂	€/año	81.222.952	74.887.218	3.518.054

Tabla 33: Coste Económico Para Remineralización mediante Calcita (CaCO₃).

<i>Parámetros a Evaluar Costes</i>		<i>Planta A</i>	<i>Planta B</i>	<i>Planta C</i>	
CO₂ + CaCO₃	Caudal permeado	m ³ /d	10.415	10000	2160
	Precio CO ₂	€/kg	0,37	0,37	0,37
	Dosis CO ₂	g/m ³	16	18	23
	Dosis de CO ₂	kg/d	166,64	180	49,68
	Coste CO ₂	€/d	61,66	66,6	18,38
	Coste CO ₂	€/m ³	0,00592	0,00666	0,00851
	Coste CO ₂	€/año	22.505	24.309	6.709
	Alquiler Depósito	€/año	9.000	9.000	9.000
	Coste alquiler	€/m ³	0,0024	0,0025	0,0114
	Coste por recarga	€/recarga	60	60	60
	Núm. recargas al año	Recargas/año	2	2	2
	Carga CO ₂	€/año	120	120	120
	Coste Carga	€/m ³	0,0000	0,0000	0,0002
	Total, CO ₂	€/m ³	0,0083	0,0092	0,0201
	Riqueza de la calcita	%	100%	100%	100%
	Consumo CaCO ₃	g/m ³	36,36	40,91	52,27
	Precio CaCO ₃	€/kg	0,06	0,06	0,06
	Coste CaCO ₃	€/m ³	0,00218	0,00245	0,00314
	Coste CO ₂ +CaCO ₃	€/m ³	0,011	0,012	0,023
	Coste CO₂+CaCO₃	€/año	39.918	42.388	18.302

4 Conclusiones

A continuación, se exponen las conclusiones a las que se llegó luego de terminar este trabajo.

- La calidad de Agua a obtener puede ser fijada por nosotros y a partir de ahí según los parámetros que necesitamos, se decide la cantidad de productos que dosificar, así como la cantidad de CO₂ que se utilizaría, como se pudo ver en las tablas y análisis anteriores la remineralización mediante **cal** consume el doble de CO₂ que la remineralización mediante **calcita**, por lo que a la hora de tomar la decisión de qué tipo de remineralización utilizar este sería un punto muy influyente, ya que la calidad al usar un método u otro no variaría.
- El coste se hace mucho mayor como se pudo observar en las tablas anteriores en la remineralización mediante cal, debido a que consume prácticamente el doble de CO₂ que la remineralización mediante calcita, aun teniendo en cuenta que el coste de inversión inicial en el proceso de remineralización mediante calcita se podría encarecer, seguiría siendo más caro el proceso de remineralización mediante cal, solo por la cantidad de CO₂ que utiliza en el proceso.
- La mezcla de Agua de Alimentación y Agua Producto en casos como este que la conductividad es muy elevada no sería una solución adecuada, ya que como se mostró el agua quedaría con una conductividad muy elevada, por encima de la permisible en ambas normas de calidad de agua empleada en este trabajo.
- De acuerdo con el análisis de este trabajo en dos aguas distintas, con distintas temperaturas, lo primero que se debe analizar es la calidad de agua final que queremos obtener y a partir de ahí escoger que proceso sería el más adecuado para obtener la remineralización adecuada que buscamos obtener. En este caso lo más adecuado sería la **remineralización mediante calcita** ya que el coste del proceso en las tres plantas analizadas sería mucho menor y la calidad a obtener sería la misma que la remineralización mediante cal.

Bibliografía

- Alicante, P. P. (2017). *Informe Técnico Planta desaladora Alicante*.
- Birnhack, L., Fridman, N., & Lahav, O. (2008). Aplicaciones potenciales de la dolomita de cantera para el postratamiento de agua desalada. *Desalinización y tratamiento de agua*, Israel.
- Cabrerizo Pastor, A., & Herráez Sánchez de las Mat, I. (2004). *Estudio de las técnicas para remineralizar las Aguas*. madrid .
- De Souza,, P., Du Plessis, & Mackintosh, G. (2002). *An evaluation of the suitability of the limestone based sidestream stabilization process for stabilization of waters of the Lesotho Highlands Schem. Biennial Conference of the Water Institute of Southern Africa*. Durban, South Africa.
- Fernández-Turiel , J. (2007). Criterios de selección de piedra caliza para la remineralización de agua EDR. *Desalinización* , 314-324.
- Fritzmán, C. (2007). Lo último en desalación por ósmosis inversa. *ElSevier*, 1-76.
- Hasson , D., & Bendrihem, O. (2005). *Modelado de remineralización de agua desalada mediante piedra caliza*. Israel.
- Hernández , M., Fernández , G., & Mar, J. (2008). *Lechos de Calcita para Grandes Desaladoras ¿ Una solución fiable?* Bilbao: VII Congreso de la Asociación Española de Desalación y Reutilización.
- Hernandez Suarez, M. (2004). *DIRECTRIZ CORTA PARA EL DISEÑO DE CONTACTORES DE CALIZA PARA GRANDES PLANTAS DESALINIZADORAS*.
- Hernandez Suarez, M. (2009). *Guía para la remineralización de aguas desaladas* . España.
- Hernández Suárez, M. (2009). *LA REMINERALIZACIÓN, GARANTÍA DE CALIDAD DEL AGUA DESALADA*.
- Hernández Suárez, M., Suárez Pérez , F., Alvela, L., & Santana Pérez, F. (2004). *I+D sobre Remineralización de las aguas desaladas con lechos de calcita*. Centro Canario del Agua.
- Kozisek, F. (2010). *RIESGOS PARA LA SALUD DE BEBER AGUA DESMINERALIZADA*.

- Natalia Belkin, N. K.-F. (2018). *Manual de Desalinización Sostenible*. Israel: Copyright © 2018 Elsevier Inc. Todos los derechos reservados.
- Noreña Calvo, F. (2002). *Modelo Para la dosificación de Cal Planta Wiesner*. Bogota . (2003). *RD 140/2003*.
- Reid, , K., Dixon,, M., Lasslett, , S., & Pelekani, , C. (2013). Impact of remineralized desalinated water on domestic services and hot water systems. *Desalination and Water Reuse*.
- Rosborg, I., & Kozisek, F. (2015). *Drinking Water Minerals and Mineral Balance* . Suiza.
- Shemer, , H., Hasson, , D., Semiat, , R., Priel, , M., Nadav, , N., Shulman, , A., & Gelman,, E. (2011). Remineralization of desalinated water. *Desalination and Water Treatment*.
- Spencer, C. (2000). *term performance of a large limestone contactor .NEWWA Spring Operations Conference*.
- Villegas-Mendoza, I., Piña-Soberanis, M., Alvillo-Rivera, A., Silva-Luna, C., & Linares-Ocampo, J. (2020). Remineralización de agua osmotizada mediante un contactor de calcita de flujo continuo ascendente. *Tecnología y ciencias del agua*, 1-32.
- Vingerhoeds, M., Nijenhuis-de Vries, M., Ruepert, N., van der Laan, H., Bredie, W., & Kremer, S. (2016). Sensory quality of drinking water produced by reverse osmosis membrane filtration followed by remineralisation. *Water Research*, 42 - 51.
- Aquae_Fundacion. (2017). *Cifras sobre Desalinización*. España.(*Fundación Aquae | La Fundación del Agua (fundacionaquae.org)*)
- Ficha Técnica Carbonato Calcico* (2007).. ([http:// cima.aemps.es/](http://cima.aemps.es/))
- salud.(OMS), o. M. (2006). *Guías para la calidad del Agua Potable*. ISBN 92 4 154696 4 . <https://blogs.nippongases.es/>. (2017). *Plantas desaladoras y Usos del CO2 en remineralización*. España-Portugal.
- <https://drintec.com/es/aplicaciones/remineralizacion-de-aguas-saladas/>. (s.f.).
- <https://fccca.es/>. (s.f.).

ANEXOS

Tabla A-1: Parámetros indicadores de calidad de agua potable. (RD 140/2003)

<i>Parámetro</i>	<i>Valor paramétrico</i>		<i>Notas</i>
31. Bacterias coliformes	0 UFC	En 100 ml	
32. Recuento de colonias a 22 °C			
A la salida de ETAP	100 UFC	En 1 ml	
En red de distribución	Sin cambios anómalos		
33. Aluminio	200	µg/l	
34. Amonio	0,50	mg/l	
35. Carbono orgánico total	Sin cambios anómalos	mg/l	1
36. Cloro combinado residual	2,0	mg/l	2, 3 y 4
37. Cloro libre residual	1,0	mg/l	2 y 3
38. Cloruro	250	mg/l	
39. Color	15	mg/l Pt/Co	
40. Conductividad	2.500	µS/cm ⁻¹ a 20 °C	5
41. Hierro	200	µg/l	
42. Manganeseo	50	µg/l	
43. Olor	3 a 25 °C	Índice de dilución	
44. Oxidabilidad	5,0	mg O ₂ /l	1
45. pH:			5 y 6
Valor paramétrico mínimo	6,5	Unidades de pH	

<i>Parámetro</i>	<i>Valor paramétrico</i>	<i>Notas</i>
Valor paramétrico máximo	9,5	Unidades de pH
46. Sabor	3 a 25 °C	Índice de dilución
47. Sodio	200	mg/l
48. Sulfato	250	mg/l
49. Turbidez: A la salida de ETAP y/o depósito	1	UNF
En red de distribución	5	UNF

Notas:

(1) En abastecimientos mayores de 10.000 m³ de agua distribuida por día se determinará carbono orgánico total, en el resto de los casos, Oxidabilidad.

(2) Los valores paramétricos se refieren a niveles en red de distribución.

La determinación de estos parámetros se podrá realizar también «in situ».

En el caso de la industria alimentaria, este parámetro no se contemplará en el agua de proceso.

(3) Se determinará cuando se utilice el cloro o sus derivados en el tratamiento de potabilización.

Si se utiliza el dióxido de cloro se determinarán cloritos a la salida de la ETAP.

(4) Se determinará cuando se utilice la cloraminación como método de desinfección.

(5) El agua en ningún momento podrá ser ni agresiva ni incrustante. El resultado de calcular el Índice de Langelier debería estar comprendido entre +/- 0,5.

(6) Para la industria alimentaria, el valor mínimo podrá reducirse a 4,5 unidades de pH.

Tabla A-2: Características físicas y componentes químicos que pueden afectar la calidad organoléptica del agua potable. (NC 827/2017)

<i>Tipo</i>	<i>Característica</i>	<i>LMA</i>
Físicas	Olor y sabor	Inodora y sabor agradable característico
	Turbiedad	5 UNT
	Color real	15 UC
Químicas	pH	6,5 – 8,5
	Sólidos totales disueltos	1 000 mg/L
	Dureza total (como carbonato de calcio)	400 mg/L
	Cloruros	250 mg/L
	Sustancias activas al azul de metileno	0,5 mg/L
	Compuestos fenólicos (referidos al fenol)	0,002 mg/L
	Aluminio	0,2 mg/L
	Cobre	2,0 mg/L
	Hierro	0,3 mg/L
	Sodio	200 mg/L
	Sulfatos	400 mg/L
	Zinc	5 mg/

Tabla A-3: Componentes inorgánicos que influyen sobre la salud. (NC 827/2017)

<i>Componentes</i>	<i>LMA (mg/L)</i>
Amoniaco	No presencia
Arsénico	0,05
Cadmio	0,005
Calcio	200
Cianuro	0,07
Cloro libre	2,0
Cromo total	0,05

<i>Componentes</i>	<i>LMA (mg/L)</i>
Fluoruro	1,5
Magnesio	150
Manganeso	0,1
Mercurio total	0,001
Níquel	0,02
Nitrato	45
Nitrito	0,01
Plomo	0,05
Selenio	0,01