

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS



**PROPUESTA DE FORMULACIÓN DE MEZCLA AGUA  
LLUVIA – AGUA SUAVIZADA PARA SER UTILIZADA EN  
SISTEMA DE TORRE DE ENFRIAMIENTO**

PRESENTADO POR:

**ARMANDO JOSÉ BARRERA CABRERA  
NELSON MAURICIO ROMERO MORALES  
MARIO EDUARDO UMAÑA AYALA**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO QUÍMICO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO 2021

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR:

**MSc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO**

SECRETARIO GENERAL:

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

DECANO:

**PhD. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA**

SECRETARIO:

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS**

DIRECTORA:

**INGA. SARA ELISABETH ORELLANA BERRÍOS**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO QUÍMICO**

Título:

**PROPUESTA DE FORMULACIÓN DE MEZCLA AGUA LLUVIA – AGUA  
SUAVIZADA PARA SER UTILIZADA EN SISTEMA DE TORRE DE  
ENFRIAMIENTO**

Presentado por:

**ARMANDO JOSÉ BARRERA CABRERA**

**NELSON MAURICIO ROMERO MORALES**

**MARIO EDUARDO UMAÑA AYALA**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

**ING. FERNANDO TEODORO RAMÍREZ ZELAYA**

**SAN SALVADOR, FEBRERO 2021**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

**ING. FERNANDO TEODORO RAMÍREZ ZELAYA**

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradecer a Dios, quien ha sido mi guía y soporte a lo largo de mi vida, me dio la sabiduría durante la carrera y ha sido fiel hasta el día de hoy; para Él sea toda la gloria y honra, a Él le rindo este trabajo de grado.

A mi madre, Vilma Alicia Cabrera, quien me ha acompañado, guiado e instruido en cada aspecto de mi vida. Le agradezco por sus sacrificios y esfuerzos al educarnos a mis hermanas y a mí, por enseñarnos a salir adelante pese a las dificultades. Por sus consejos y siempre buscar lo mejor para mí, no hay forma de pagarle todo lo que me ha dado: desde la vida hasta ser el hombre que soy ahora. A mi padre, Armando Barrera Girón, sin su ayuda esto hubiera sido más difícil, gracias por apoyarme durante todo este tiempo y siempre encontrar en él a un amigo cuando más lo necesité, sus palabras siempre fueron de consuelo y ánimos para seguir adelante, gracias por siempre creer en mí, este logro también es de él. A mis hermanas, Marielos y Karla, que a pesar de momentos difíciles, al final siempre nos tenemos los unos con los otros, gracias por sus consejos y por darme ánimos a salir adelante, ambas junto con mi sobrina Angy, forman parte fundamental de mi vida. De una forma muy especial, a mis abuelos Cristina e Ismael, por brindarme su amor y apoyo incondicional aún dentro de sus limitantes, espero que Dios les preste mucha vida para poderle devolver parte de todo lo que me han dado. A mis tíos, Carlos, Lauri y Lilian por acogerme y ayudarme cuando lo necesité, por sus consejos y por estar siempre para mí.

A mis amigos Nathaly y Mariano, por todas esas noches de desvelos estudiando, acompañados de risas y recuerdos, gracias por ser muy buenos amigos y apoyarme siempre. Rocío y Mariela, por siempre darme ánimos y confiar en que podía lograrlo. Gustavo y Alex, amigos incondicionales, que me han acompañado en cada situación. A Josué, Milena y Vivian por tanto cariño, apoyo y comprensión. Cada uno sabe que son parte muy importante de mi vida. A mis compañeros, Nelson y Eduardo, más que compañeros, grandes amigos con quienes trabajamos para la elaboración del presente trabajo, fue un enorme placer haber realizado esto junto a ustedes.

A mis maestros, gracias por aportar sus conocimientos a mi formación como profesional, estoy eternamente agradecido, la mejor herencia que llevo es lo aprendido con cada uno de ustedes.

***Armando José Barrera Cabrera.***

Agradecer en primer lugar a Dios, porque Él ha sido quien me ha dado la sabiduría y el entendimiento en cada uno de los momentos de la carrera; su misericordia se ha visto reflejada a lo largo de mi vida.

A mi madre, Edith Marina Morales de Romero, quien ha sido una madre ejemplar, me ha guiado, educado e instruido de la mejor manera, agradecerle por todos los sacrificios que ha hecho, con el único objetivo de sacarme adelante. Esos consejos que quedan marcados para toda la vida, por eso dedico este párrafo a ella, quien con la mano de Dios me ha llevado por el mejor camino. A mi padre, Mauricio Romero Robles, que siempre ha estado para mí, y para mis hermanos con su amor incondicional, su carisma y paciencia que lo caracterizan. Por siempre tener un consejo en los momentos más difíciles. Esos sacrificios que hiciste por mucho tiempo valieron la pena, gracias papá. Definitivamente Dios me ha premiado con los mejores padres, y mi deber ahora es demostrarles que han formado a un ser humano quien los va a poner en alto siempre.

A mis tías, Vilma Nohemy Morales Vásquez y Delmi Roxana Morales Vásquez, quienes han sido un apoyo incondicional a lo largo de mi carrera y de mi vida, las cuales considero mis segundas madres; gracias por todas esas bendiciones que he recibido por medio de ustedes, nunca olvidaré sus consejos; han sido un apoyo muy importante para mis padres, espero en Dios poder disfrutar más momentos con ustedes y así devolverles un poco de todo lo que me han dado. A mi abuela Rosa Vásquez, quien ha estado conmigo desde muy pequeño, y quien comenzó mi formación académica al haberme enseñado a leer; además por siempre brindarme el apoyo que he necesitado.

A mis amigos Lesly Gisela Ramos, a quien conocí en los inicios de mi carrera, por siempre estar para mí, por todas esas aventuras vividas y las que faltan, espero en Dios poder estar presente en sus vidas. A Caren Mariela Bolaños, quien ha estado conmigo desde el segundo semestre de la carrera, gracias por todos los buenos momentos que hemos pasado juntos, sin olvidar todas las experiencias vividas a lo largo de estos años. A mis compañeros y amigos Armando Barrera y Eduardo Umaña, con quien compartimos no solo materias juntos sino el final de esta etapa de nuestras vidas, gracias por ser grandes personas y un gran equipo.

A mis docentes de la Escuela de Ingeniería Química y de Alimentos, gracias por su valioso aporte a mi vida académica, han sido un pilar importante para mi formación profesional.

***Nelson Mauricio Romero Morales.***

Agradezco a Dios por ayudarme a vencer las dificultades durante toda mi vida y brindarme la sabiduría. A mi madre Alba del Carmen Umaña Ayala, sin quién no hubiera podido llegar hasta este punto de mi vida profesional a pesar de las dificultades económicas y de salud que atravesamos desde mi primer año como estudiante universitario, su apoyo moral ante muchas circunstancias me ayudó a seguirle haciendo frente ante los retos que se me presentaron cada año. Estoy seguro que muy pronto podremos ver el fruto de este esfuerzo mutuo que juntos hemos hecho a lo largo de estos 7 años. Esto es para usted más que para mí, madre querida.

A mis tíos Eunice Ayala, Berta Umaña, Cristian Umaña y Pablo Umaña, así como a grandes amigas Iris Zamora y Fátima Abarca; quiénes nos brindaron de diversas maneras su apoyo incondicional a mi madre y a mí todo este tiempo, gracias por haber estado presente y haber podido contar con ustedes ante muchas de las adversidades que pasamos.

A mis grandes amigos que hice durante mi vida estudiantil en la Universidad, su afecto sincero y los momentos vividos durante las diferentes asignaturas que cursamos serán siempre para mí valiosas memorias, sin duda ustedes hicieron que todos estos años fueran la mejor etapa de mi vida a pesar de dificultades personales por las que pasé, así como el estrés, desvelos, cansancio y sueño que son propios de esta apasionante vida estudiantil; sin embargo ustedes lograron convertir todo eso en momentos gratos. Una vez más gracias amigos: Andrea Flores, Jacquelin Vásquez, Steven Díaz, María Angélica (Angie), Francisco Alvarado, Rodrigo Chávez, Valerie Valle, Gustavo Carranza, Marina Hernández, Rodrigo Sandoval, Giovanni Reyes, Bernabé Zepeda, Cristian Zelaya y a mis compañeros y amigos Armando Barrera y Nelson Morales, con quienes ha sido bastante ameno el tiempo en que trabajamos juntos desde la asignatura “Aprovechamiento Industrial de Recursos Naturales” donde comenzamos con la elaboración del anteproyecto hasta la realización de este trabajo de grado.

Al personal docente de la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos, Unidad de Ciencias Básicas y a la Escuela de Química de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática (Licda. Melany Herrera y Licda. Karina Cuchilla, quiénes impartieron la asignatura Química Orgánica el ciclo II 2015); por transmitir y compartir su conocimiento técnico, científico e ingenieril y por su admirable labor docente para formarme como profesional del área de las Ingenierías.

***Mario Eduardo Umaña Ayala.***

## RESUMEN

Se realiza una revisión bibliográfica sobre las generalidades de las torres de enfriamiento para conocer su clasificación y funcionamiento, así mismo los sistemas de distribución del agua en el equipo de enfriamiento, indagando en las propiedades fisicoquímicas de calidad de esta según los requerimientos generales y técnicos del equipo industrial. Con el uso de especificaciones técnicas de un modelo de torre de enfriamiento en particular, se logra la depuración de parámetros de diseño del equipo industrial, tales como: altura de la torre, tipo de relleno, tiro de la torre, temperatura de bulbo húmedo, diámetro de la torre, potencia del ventilador, caudales de agua y de aire, entre otros. Con lo cual, el enfoque de la investigación se centra en el análisis de variables y parámetros de calidad del agua para uso en el equipo industrial, que son determinantes para el logro de los alcances de la presente investigación.

Se ahonda en las propiedades y generalidades del agua lluvia: el ciclo hidrológico y la acción de la actividad humana que lo altera, añadiendo contaminantes en esta; de igual forma se detallan aspectos importantes sobre los sistemas de recolección del agua lluvia y su importancia en el aprovechamiento de este recurso natural. De igual manera se profundiza en los aspectos clave sobre el agua suavizada (o agua suave), descritos en la teoría del intercambio iónico de resinas poliméricas para la eliminación de sales de calcio y magnesio del agua de la red de suministro. Todo esto con el propósito de conocer aspectos claves de las partes o proporciones que contiene la mezcla a formular para uso en torre de enfriamiento.

Se realizan las mediciones de los parámetros fisicoquímicos de calidad del agua: pH, sólidos disueltos totales, dureza total, alcalinidad total y sílice; a partir de métodos instrumentales y estandarizados, con el fin de obtener variables respuesta, las cuales son los índices de estabilidad del agua: Langelier y Ryznar, así como los ciclos de concentración, tres variables clave para la evaluación de la calidad de la mezcla de agua lluvia – agua suavizada para uso en torre de enfriamiento.

Lo anterior con el previo diseño de experimentos (DOE) para conocer la cantidad de formulaciones a analizar y el número de réplicas de medición de parámetros a realizar en las muestras colectadas en una región (espacio muestral) de un universo o población establecido. Escogiendo el Diseño Factorial  $2^k$  como mejor alternativa para conocer el efecto de la interacción de los dos factores o variables independientes: agua suavizada y agua lluvia, sobre las variables respuesta.

Se analiza la normalidad de los datos con el estadístico de prueba de Anderson – Darling (AD) para determinar el uso de pruebas (de hipótesis) paramétricas o no paramétricas sobre las variables respuesta. Se realizan pruebas estadísticas inferenciales de los resultados obtenidos a través del Análisis de Varianza (ANOVA) de Fisher para la prueba de hipótesis como prueba paramétrica en el caso de las variables respuesta cuyos datos siguen o se aproximan a una distribución normal. Para el caso de variables respuesta cuyos datos no siguen o no se aproximan a una distribución normal se realiza el análisis no paramétrico de Friedman, análogo al ANOVA para pruebas paramétricas con dos factores.

Por medio de dichas pruebas estadísticas se concluye que la mejor formulación de mezcla corresponde a las proporciones (expresadas como porcentajes en volumen) de: 25% agua suavizada (A) – 75% agua lluvia (B) al obtener mayor incremento en los ciclos de concentración. De igual forma se recomienda el uso de las formulaciones de mezcla: 30% A – 70% B y 35% A – 65% B, ya que cumplen con las especificaciones técnicas de calidad de agua para uso en torre de enfriamiento, así como el incremento en los ciclos de concentración de este. Lo cual conlleva a una reducción en el consumo de agua suavizada y el aprovechamiento del recurso agua lluvia.

## ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN .....	1
1.    CAPÍTULO I. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	3
1.1.    Generalidades de las Torres de Enfriamiento.....	3
1.1.1.    Componentes y funcionamientos.....	4
1.1.2.    Clasificación de Torres de enfriamiento.....	7
1.1.2.1.    Torres de tiro mecánico.....	7
1.1.2.2.    Torres de circulación natural .....	10
1.1.3.    Influencias Externas sobre el funcionamiento.....	13
1.1.3.1.    Interferencias.....	14
1.1.3.2.    Recirculación.....	15
1.1.3.3.    Consideraciones en el emplazamiento.....	16
1.1.3.4.    Contaminación.....	17
1.1.3.5.    Sólidos Disueltos.....	17
1.2.    Sistemas de distribución de agua en torres de enfriamiento.....	18
1.2.1.    Sistemas por gravedad.....	18
1.2.2.    Sistemas por presión.....	19
1.3.    Calidad del Agua para Torres de Enfriamiento.....	21
1.3.1.    Fuentes y usos del agua.....	21
1.3.2.    Caracterización y propiedades del agua.....	22
1.3.2.1.    Conductividad.....	22
1.3.2.2.    Dureza.....	23
1.3.2.3.    Sólidos en Suspensión.....	23
1.3.2.4.    Turbidez.....	23
1.3.2.5.    Corrosividad y tendencia a la incrustación.....	24
1.3.2.6.    Microorganismos.....	24

1.3.3.	Mantenimiento de la calidad del agua para torres de enfriamiento. ....	24
1.3.3.1.	Esquema básico de control de calidad del agua. ....	26
1.3.3.2.	Tratamientos de calidad del agua. ....	27
1.3.4.	Controles en el tratamiento de agua de circulación.....	31
1.3.4.1.	Control de las incrustaciones. ....	31
1.3.4.2.	Control de la corrosión. ....	32
1.3.4.3.	Control de sólidos en suspensión (sedimentos). ....	32
1.3.4.4.	Control biológico del agua. ....	32
1.3.4.5.	Control de los sólidos disueltos. ....	32
1.3.5.	Sistemas de tratamiento de agua para torre de enfriamiento.....	33
1.3.5.1.	Ozono.....	33
1.3.5.2.	Cloro.....	36
1.3.5.3.	Floculación electroquímica. ....	37
1.3.5.4.	Sonoquímica. ....	37
1.4.	Generalidades del Agua Lluvia.....	38
1.4.1.	Ciclo Hidrológico del Agua. ....	38
1.4.2.	Calidad del Agua Lluvia.....	39
1.4.2.1.	Propiedades fisicoquímicas del agua lluvia. ....	40
1.4.3.	Contaminación del Agua Lluvia. ....	42
1.4.3.1.	Lluvia Ácida. ....	43
1.4.3.2.	Lluvia Ácida en el Área Metropolitana de San Salvador.....	46
1.4.4.	Captación o Recolección de Agua Lluvia. ....	46
1.4.4.1.	Fines de la captación de agua lluvia.....	47
1.4.4.2.	Contaminantes a considerar previo a la captación.....	47
1.4.4.3.	Cualidades del Agua Lluvia Recolectada. ....	50
1.4.4.4.	Componentes de un Sistema de Recolección de Agua Lluvia. ....	52

1.4.4.5.	Diseño de Sistemas de Recolección de Agua Lluvia.....	53
1.5.	Generalidades del agua suave.....	55
1.5.1.	Operación y tipos de suavizadores de agua.....	58
1.5.2.	Métodos históricos de regeneración.....	58
1.6.	Ciclos de concentración en agua de enfriamiento.....	58
1.6.1.	Factores limitantes de los ciclos de concentración.....	61
1.6.2.	¿Por qué ciclos de concentración? .....	62
1.6.3.	Conductividad del agua y ciclos de concentración. ....	63
1.6.4.	Reposición y purga de agua de torres de enfriamiento. ....	64
1.7.	Índices de estabilidad del agua .....	65
1.7.1.	Índice de saturación de Langelier.....	66
1.7.2.	Índice de estabilidad de Ryznar. ....	74
2.	CAPÍTULO II. DISEÑO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN. ....	80
2.1.	Tipo y área de estudio.....	80
2.2.	Universo o población y muestra. ....	81
2.3.	Selección de las muestras de agua a analizar. ....	83
2.3.1.	Descripción del recipiente colector de agua.....	84
2.4.	Sistema de hipótesis y definición de variables. ....	84
2.4.1.	Hipótesis de trabajo.....	84
2.4.2.	Hipótesis estadísticas.....	85
2.4.3.	Definición de variables .....	86
2.5.	Diseño Experimental. ....	90
2.5.1.	Definición del diseño experimental.....	90
2.5.2.	Estudio del efecto de factores sobre las variables dependientes. ....	91
2.5.3.	Análisis estadístico de los resultados del Diseño Factorial. ....	97

2.5.3.1. Diseño Factorial y Análisis de Varianza (ANOVA). .....	97
2.5.3.2. Análisis gráfico de los resultados del Diseño Factorial.....	101
2.6. Técnicas, métodos e instrumentos de investigación. ....	113
2.6.1. Medición de potencial Hidrógeno ( $pH$ ). .....	114
2.6.2. Medición de Sílice ( $S$ ).....	115
2.6.3. Medición de Dureza Total ( $D_T$ ). .....	117
2.6.4. Medición de Alcalinidad total ( $A_T$ ).....	118
2.6.5. Medición de Sólidos Totales Disueltos ( $TDS$ ). .....	120
3. CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE RESULTADOS. ....	122
3.1. Reporte de resultados experimentales. ....	122
3.1.1. Resultados de las mediciones de los parámetros fisicoquímicos. ....	123
3.1.2. Ejemplo de cálculo de parámetros fisicoquímicos. ....	127
3.1.3. Resultados de las variables respuesta para cada formulación.....	129
3.1.4. Ejemplos de cálculo de las variables respuesta. ....	130
3.1.4.1. Ejemplo de cálculo de Ciclos de Concentración.....	130
3.1.4.2. Ejemplo de cálculo del Índice de Saturación de Langelier. ....	131
3.1.4.3. Ejemplo de cálculo del Índice de Estabilidad de Ryznar. ....	133
3.2. Estadística descriptiva de los resultados. ....	133
3.2.1. Media aritmética. ....	133
3.2.2. Desviación estándar. ....	135
3.2.3. Coeficiente de variación. ....	136
3.2.4. Varianza. ....	138
3.3. Análisis de Normalidad de Anderson y Darling (AD). ....	139
3.3.1. Análisis de Normalidad AD para la variable $C_C$ . ....	140
3.3.2. Análisis de Normalidad AD para la variable $L$ . ....	142
3.3.3. Análisis de Normalidad AD para la variable $R$ . ....	143

3.4.	Estadística inferencial de los resultados.....	145
3.4.1.	ANOVA de las Variables Respuesta. ....	146
3.4.2.	Interpretación con gráficos factoriales. ....	147
3.4.2.1.	Pareto de efectos estandarizados. ....	147
3.4.2.2.	Residuos. ....	150
3.4.2.3.	Cubos. ....	153
3.4.3.	Obtención de F crítica. ....	156
3.4.4.	Prueba de Hipótesis. ....	157
3.4.5.	Prueba No Paramétrica de Friedman para la variable $C_c$ . ....	161
3.4.5.1.	Cálculo del estadístico para la Prueba de Friedman. ....	162
3.4.5.2.	Cálculo del valor p para la Prueba de Friedman. ....	165
4.	CAPÍTULO IV. EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA A UTILIZAR EN TORRE DE ENFRIAMIENTO. ....	167
4.1.	Evaluación de las Formulaciones a partir de un modelo de Torre de Enfriamiento. ....	167
4.2.	Evaluación gráfica de parámetros fisicoquímicos de las Formulaciones. ....	173
4.2.1.	pH.....	173
4.2.2.	Sólidos Disueltos Totales (TDS).....	174
4.2.3.	Alcalinidad Total .....	175
4.2.4.	Dureza Total.....	176
4.2.5.	Sílice.....	177
4.3.	Evaluación gráfica de las variables respuesta de las Formulaciones. ....	178
4.3.1.	Ciclos de concentración. ....	178
4.3.2.	Índice de Saturación de Langelier. ....	179

4.3.3. Índice de Estabilidad de Ryznar. ....	180
CONCLUSIONES.....	182
RECOMENDACIONES .....	185
REFERENCIAS.....	187
ANEXOS .....	191
Anexo A. Resultados experimentales de los parámetros fisicoquímicos de calidad del agua. ....	191
Anexo B. Resultados obtenidos de las variables respuesta $C_C$ , $L$ y $R$ . ....	197
Anexo C. Fotografías de la Etapa Experimental.....	201
Anexo D. Taylor Test Kit: Drop Test para Alcalinidad Parcial/Total y Dureza Total. ....	208
Anexo E. Licencia de Minitab. ....	210

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1.</b> Niveles de mineralización del agua medidas a partir de la variable fisicoquímica conductividad.....	23
<b>Tabla 1.2.</b> Parámetros de control del agua para equipo de enfriamiento. ....	29
<b>Tabla 1.3.</b> Objetivos de los tratamientos químicos en las torres de enfriamiento. ....	30
<b>Tabla 1.4.</b> Impurezas del agua que afectan en el tratamiento interno de los sistemas de enfriamiento. ....	30
<b>Tabla 1.5.</b> Valores de conductividad del agua según fuentes de proveniencia. ....	42
<b>Tabla 1.6.</b> Clasificación del agua lluvia de acuerdo con el pH. ....	46
<b>Tabla 1.7.</b> Factores relacionados con las variables fisicoquímicas del Índice de Saturación de Langelier (L). ....	69
<b>Tabla 1.8.</b> Interpretación del Índice de Saturación de Langelier. ....	70
<b>Tabla 1.9.</b> Clasificación del Índice de Saturación de Langelier según su valor. ....	71
<b>Tabla 1.10.</b> Límites para las condiciones del agua de la torre de enfriamiento modelo Marley Clase W400. ....	73
<b>Tabla 1.11.</b> Clasificación del Índice de Estabilidad de Ryznar según su valor. ....	76
<b>Tabla 1.12.</b> Clasificación del agua según el valor del Índice de Estabilidad de Ryznar. ....	76
<b>Tabla 2.1.</b> Detalle y definición de las variables de estudio.....	87
<b>Tabla 2.2.</b> Resumen de variables de estudio.....	90
<b>Tabla 2.3.</b> Nomenclatura del diseño factorial.....	92
<b>Tabla 2.4.</b> Réplica 1 de medidas pre experimentales para el diseño factorial. ....	94
<b>Tabla 2.5.</b> Réplica 2 de medidas pre experimentales para el diseño factorial. ....	94

<b>Tabla 2.6.</b> Réplica 3 de medidas pre experimentales para el diseño factorial. ....	95
<b>Tabla 2.7.</b> Valores obtenidos en las variables respuesta al manipular los factores en sus niveles mayor y menor. ....	96
<b>Tabla 2.8.</b> Resumen Diseño factorial completo. ....	97
<b>Tabla 2.9.</b> Análisis de Varianza de la variable Cc. ....	98
<b>Tabla 2.10.</b> Análisis de varianza de la variable L. ....	99
<b>Tabla 2.11.</b> Análisis de varianza de la variable R. ....	100
<b>Tabla 2.12.</b> Material y reactivos para la medición de dureza total. ....	117
<b>Tabla 2.13.</b> Material y reactivos para la medición de alcalinidad total. ....	119
<b>Tabla 2.14.</b> Especificaciones técnicas del medidor. ....	120
<b>Tabla 3.1.</b> Cantidades a emplear de agua suave y agua lluvia en el experimento. ....	123
<b>Tabla 3.2.</b> Resultados obtenidos de los parámetros fisicoquímicos para la réplica 1. ....	125
<b>Tabla 3.3.</b> Resultados obtenidos de los parámetros fisicoquímicos para la réplica 2. ....	125
<b>Tabla 3.4.</b> Resultados obtenidos de los parámetros fisicoquímicos para la réplica 3. ....	126
<b>Tabla 3.5.</b> Resultados de las variables respuesta a partir de los parámetros fisicoquímicos obtenidos en la réplica 1. ....	129
<b>Tabla 3.6.</b> Resultados de las variables respuesta a partir de los parámetros fisicoquímicos obtenidos en la réplica 2. ....	129
<b>Tabla 3.7.</b> Resultados de las variables respuesta a partir de los parámetros fisicoquímicos obtenidos en la réplica 3. ....	130
<b>Tabla 3.8.</b> Media aritmética de parámetros fisicoquímicos medidos para las 10 réplicas del experimento para las 4 mezclas formuladas. ....	134
<b>Tabla 3.9.</b> Media aritmética de las variables respuesta de las 10 réplicas del experimento para las 4 mezclas formuladas. ....	134

<b>Tabla 3.10.</b> Desviación estándar de parámetros fisicoquímicos medidos para las 10 réplicas del experimento para las 4 mezclas formuladas. ....	135
<b>Tabla 3.11.</b> Desviación estándar de las variables respuesta de las 10 réplicas del experimento para las 4 mezclas formuladas. ....	136
<b>Tabla 3.12.</b> Coeficiente de Variación de parámetros fisicoquímicos medidos para las 10 réplicas del experimento para las 4 mezclas.....	137
<b>Tabla 3.13.</b> Coeficiente de Variación de las variables respuesta de las 10 réplicas del experimento para las 4 mezclas formuladas.....	137
<b>Tabla 3.14.</b> Varianza de parámetros fisicoquímicos medidos para las 10 réplicas del experimento para las 4 mezclas. ....	138
<b>Tabla 3.15.</b> Varianza de las variables respuesta de las 10 réplicas del experimento para las 4 mezclas formuladas.....	139
<b>Tabla 3.16.</b> ANOVA de la variable respuesta $C_c$ contra $V_s$ y $V_L$ .....	146
<b>Tabla 3.17.</b> ANOVA de la variable respuesta $L$ contra $V_s$ y $V_L$ . ....	146
<b>Tabla 3.18.</b> ANOVA de la variable respuesta $R$ contra $V_s$ y $V_L$ .....	147
<b>Tabla 3.19.</b> Resultados de la prueba de hipótesis con el estadístico $F$ . ....	159
<b>Tabla 3.20.</b> Resultados de la prueba de hipótesis con el valor $p$ . ....	160
<b>Tabla 3.21.</b> Ordenamiento de los valores de $C_c$ para el cálculo de rangos en la prueba de Friedman.....	163
<b>Tabla 3.22.</b> Obtención de rangos para el cálculo del estadístico de Friedman.....	163
<b>Tabla 3.23.</b> Obtención del valor $p$ para la prueba Friedman a partir de hoja de cálculo.....	165
<b>Tabla 4.1.</b> Comparación de parámetros fisicoquímicos y de calidad para F1 contra lo especificado en el modelo de Torre de enfriamiento. ....	168
<b>Tabla 4.2.</b> Comparación de parámetros fisicoquímicos y de calidad para F2 contra lo especificado en el modelo de Torre de enfriamiento. ....	169

<b>Tabla 4.3.</b> Comparación de parámetros fisicoquímicos y de calidad para F3 contra lo especificado en el modelo de Torre de enfriamiento. ....	170
<b>Tabla 4.4.</b> Comparación de parámetros fisicoquímicos y de calidad de la F4 contra lo especificado en el modelo de Torre de enfriamiento. ....	171
<b>Tabla A.1.</b> Resultados experimentales de parámetros fisicoquímicos para la réplica 1. ....	191
<b>Tabla A.2.</b> Resultados experimentales de parámetros fisicoquímicos para la réplica 2. ....	192
<b>Tabla A.3.</b> Resultados experimentales de parámetros fisicoquímicos para la réplica 3. ....	192
<b>Tabla A.4.</b> Resultados experimentales de parámetros fisicoquímicos para la réplica 4. ....	193
<b>Tabla A.5.</b> Resultados experimentales de parámetros fisicoquímicos para la réplica 5. ....	193
<b>Tabla A.6.</b> Resultados experimentales de parámetros fisicoquímicos para la réplica 6. ....	194
<b>Tabla A.7.</b> Resultados experimentales de parámetros fisicoquímicos para la réplica 7. ....	194
<b>Tabla A.8.</b> Resultados experimentales de parámetros fisicoquímicos para la réplica 8. ....	195
<b>Tabla A.9.</b> Resultados experimentales de parámetros fisicoquímicos para la réplica 9. ....	195
<b>Tabla A.10.</b> Resultados experimentales de parámetros fisicoquímicos para la réplica 10. ....	196
<b>Tabla B.1.</b> Resultados obtenidos de variables respuestas para la réplica 1. ....	197
<b>Tabla B.2.</b> Resultados obtenidos de variables respuestas para la réplica 2. ....	197

<b>Tabla B.3.</b> Resultados obtenidos de variables respuestas para la réplica 3. ....	198
<b>Tabla B.4.</b> Resultados obtenidos de variables respuestas para la réplica 4. ....	198
<b>Tabla B.5.</b> Resultados obtenidos de variables respuestas para la réplica 5. ....	198
<b>Tabla B.6.</b> Resultados obtenidos de variables respuestas para la réplica 6. ....	199
<b>Tabla B.7.</b> Resultados obtenidos de variables respuestas para la réplica 7. ....	199
<b>Tabla B.8.</b> Resultados obtenidos de variables respuestas para la réplica 8. ....	199
<b>Tabla B.9.</b> Resultados obtenidos de variables respuestas para la réplica 9. ....	200
<b>Tabla B.10.</b> Resultados obtenidos de variables respuestas para la réplica 10. ....	200

## ÍNDICE DE FIGURAS.

<b>Figura 1.1.</b> Representación del funcionamiento de una torre de enfriamiento. ....	4
<b>Figura 1.2.</b> Representación de Torre de Tiro Mecánico. ....	8
<b>Figura 1.3.</b> Representación de Torre de Tiro Inducido. ....	9
<b>Figura 1.4.</b> Representación de Torre de Tiro Forzado.....	9
<b>Figura 1.5.</b> Representación de una Torre Atmosférica. ....	10
<b>Figura 1.6.</b> Representación de una Torre de Tiro Natural. ....	12
<b>Figura 1.7.</b> Clasificación de torres de tiro mecánico. ....	12
<b>Figura 1.8.</b> Clasificación de torres de circulación natural. ....	13
<b>Figura 1.9.</b> Interferencias debidas a la acción del viento entre dos torres de enfriamiento. ....	15
<b>Figura 1.10.</b> Recirculación del aire en una Torre de Enfriamiento.....	15
<b>Figura 1.11.</b> Disposiciones de pantallas correctas para torres de enfriamiento. ....	16
<b>Figura 1.12.</b> Sistemas de distribución de agua por gravedad.....	19
<b>Figura 1.13.</b> Sistemas de distribución de agua por presión.....	20
<b>Figura 1.14.</b> Ciclo Hidrológico del Agua. ....	39
<b>Figura 1.15.</b> Contaminación primaria y secundaria del agua lluvia.....	43
<b>Figura 1.16.</b> Generación de Lluvia Ácida Antropogénica.....	44
<b>Figura 1.17.</b> Instalación Residencial de un Sistema de Captación de Agua Lluvia. ....	54
<b>Figura 1.18.</b> Instalación Industrial de un Sistema de Captación de Agua Lluvia. ....	54
<b>Figura 1.19.</b> Sistema de Captación de Agua de Tormenta.....	55
<b>Figura 1.20.</b> Eliminación de Calcio del Agua Dura. ....	56
<b>Figura 1.21.</b> Esquema de un aparato industrial típico para ablandar el agua.....	57
<b>Figura 1.22.</b> Diagrama del proceso de enfriamiento de una torre.....	59
<b>Figura 1.23.</b> Tubería de hierro oxidada por la corrosión del agua. ....	67
<b>Figura 1.24.</b> Diagrama de solubilidad de distintas sales en función de la temperatura. ....	68

<b>Figura 1.25.</b> Tendencias de formación de incrustaciones por dureza cálcica del agua según Índice de Ryznar.....	75
<b>Figura 1.26.</b> Gráfico del comportamiento del pH del agua en la torre de enfriamiento (sistema) con la alcalinidad en ppm de CaCO <sub>3</sub> . .....	79
<b>Figura 2.1.</b> Mapa de relieve del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) .....	81
<b>Figura 2.2.</b> Municipios que conforman el AMSS.....	82
<b>Figura 2.3.</b> Notación de Yates representada en gráfico de cubo.....	93
<b>Figura 2.4.</b> Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la variable respuesta C <sub>c</sub> . .....	102
<b>Figura 2.5.</b> Gráfica de cubos de la variable respuesta C <sub>c</sub> . .....	103
<b>Figura 2.6.</b> Gráficas de residuos para la variable respuesta C <sub>c</sub> . .....	104
<b>Figura 2.7.</b> Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la variable respuesta L. .....	106
<b>Figura 2.8.</b> Gráfica de cubos para la variable respuesta L. .....	107
<b>Figura 2.9.</b> Gráficas de residuos para la variable respuesta L.....	108
<b>Figura 2.10.</b> Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la variable respuesta R.....	110
<b>Figura 2.11.</b> Gráfica de cubos para la variable respuesta R.....	111
<b>Figura 2.12.</b> Gráficas de residuos para la variable respuesta R. ....	112
<b>Figura 2.13.</b> Medición de pH a agua suavizada de la red de suministro ANDA.....	115
<b>Figura 2.14.</b> Colorímetro HI770 Checker ® HC para determinación de sílice en aguas domesticas e industriales.....	116
<b>Figura 2.15.</b> Análisis de dureza total a muestra de agua suavizada.....	118
<b>Figura 2.16.</b> Análisis de alcalinidad total mediante método con naranja de metilo. ....	120
<b>Figura 2.17.</b> Medición de TDS en ppm a muestra de agua suavizada. ....	121
<b>Figura 3.1.</b> Ejemplo de lectura de pH del agua de la torre para formulación F2, para réplica 2. ....	128

<b>Figura 3.2.</b>	Prueba de normalidad AD y estadísticos descriptivos para la variable respuesta C <sub>c</sub> .....	141
<b>Figura 3.3.</b>	Prueba de normalidad AD y estadísticos descriptivos para la variable respuesta L.....	142
<b>Figura 3.4.</b>	Prueba de normalidad AD y estadísticos descriptivos para la variable respuesta R. ....	144
<b>Figura 3.5.</b>	Pareto de efectos estandarizados para la variable respuesta C <sub>c</sub> .....	148
<b>Figura 3.6.</b>	Pareto de efectos estandarizados para la variable L.....	149
<b>Figura 3.7.</b>	Pareto de efectos estandarizados para la variable R. ....	150
<b>Figura 3.8.</b>	Gráficas de residuos para la variable C <sub>c</sub> .....	151
<b>Figura 3.9.</b>	Gráficas de residuos para la variable L. ....	152
<b>Figura 3.10.</b>	Gráficas de residuos para la variable R.....	153
<b>Figura 3.11.</b>	Gráfica de cubos con medias ajustadas para la variable C <sub>c</sub> .....	154
<b>Figura 3.12.</b>	Gráfica de cubos con medias ajustadas para la variable L. ....	155
<b>Figura 3.13.</b>	Gráfica de cubos con medias ajustadas para la variable R.....	156
<b>Figura 3.14.</b>	Gráfico de distribución F de Fisher.....	157
<b>Figura 4.1.</b>	Gráfica de intervalos para el promedio de mediciones de pH en cada formulación.....	173
<b>Figura 4.2.</b>	Gráfica de intervalos para el promedio de mediciones de TDS en cada formulación. ....	174
<b>Figura 4.3.</b>	Gráfica de intervalos para el promedio de mediciones de Alcalinidad Total en cada formulación. ....	175
<b>Figura 4.4.</b>	Gráfica de intervalos para el promedio de mediciones de Dureza Total en cada formulación. ....	176
<b>Figura 4.5.</b>	Gráfica de intervalos para el promedio de mediciones de Sílice en cada formulación.....	177
<b>Figura 4.6.</b>	Gráfica de intervalos del promedio obtenido para la variable Ciclos de concentración en cada formulación. ....	179

<b>Figura 4.7.</b>	Gráfica de intervalos del promedio obtenido para la variable Índice de Saturación de Langelier en cada formulación. ....	180
<b>Figura 4.8.</b>	Gráfica de intervalos del promedio obtenido para la variable Índice de Saturación de Langelier en cada formulación. ....	181
<b>Figura C.1.</b>	Determinación de Dureza Total en muestra de agua suavizada.....	201
<b>Figura C.2.</b>	Determinación de Dureza Total en muestra de agua lluvia. ....	202
<b>Figura C.3.</b>	Determinación de Sólidos Disueltos Totales en muestra de agua lluvia con medidor digital TDS y EC VIVOSUN.....	202
<b>Figura C.4.</b>	Determinación de pH en muestra de agua lluvia con pH-metro portátil VIVOSUN. ....	203
<b>Figura C.5.</b>	Determinación de Sólidos Disueltos Totales en muestra de agua suavizada con medidor digital TDS y EC VIVOSUN.....	203
<b>Figura C.6.</b>	Determinación de pH en muestra de agua suavizada con pH-metro portátil VIVOSUN. ....	204
<b>Figura C.7.</b>	Determinación de Alcalinidad Parcial del Agua Suavizada con indicador fenolftaleína. ....	204
<b>Figura C.8.</b>	Determinación de Alcalinidad Total del Agua Suavizada con indicador naranja de metilo. ....	205
<b>Figura C.9.</b>	Determinación de Alcalinidad Parcial de Agua Lluvia con indicador fenolftaleína.....	205
<b>Figura C.10.</b>	Determinación de Alcalinidad Total del Agua Lluvia con indicador naranja de metilo.....	206
<b>Figura C.11.</b>	Determinación de Sílice en muestra de Agua Suavizada con colorímetro de mano (HC) HANNA Checker ® HI 770.....	206
<b>Figura C.12.</b>	Determinación de Sílice en muestra de Agua Lluvia con colorímetro de mano (HC) HANNA Checker ® HI 770. ....	207
<b>Figura E.1.</b>	Licencia de programa estadístico Minitab. ....	210

## ÍNDICE DE ECUACIONES.

<b>Ecuación 1.1.</b>	Descomposición del ozono.....	34
<b>Ecuación 1.2.</b>	Mecanismo de reacción para la formación de ácido sulfúrico y ácido nítrico en la lluvia ácida antropogénica y de origen volcánico. ....	45
<b>Ecuación 1.3.</b>	Reacción de eliminación del Calcio del Agua Dura. Intercambio de iones calcio y sodio. ....	57
<b>Ecuación 1.4.</b>	Cálculo de los Ciclos de concentración de una torre de enfriamiento. ....	60
<b>Ecuación 1.5.</b>	Definición del Índice de Saturación de Langelier (L). ....	70
<b>Ecuación 1.6.</b>	Ecuación para el cálculo de L en función de factores relacionados. ....	70
<b>Ecuación 1.7.</b>	Definición del Índice de estabilidad de Ryznar .....	74
<b>Ecuación 1.8.</b>	Ecuación para el cálculo del pH de saturación (carbonato cálcico).....	77
<b>Ecuación 1.9.</b>	Cálculo del pH de Saturación en base a los factores de las variables relacionadas.....	77
<b>Ecuación 1.10.</b>	Ecuaciones que definen a los factores involucrados en el cálculo del pH de saturación. ....	78
<b>Ecuación 3.1.</b>	Determinación de los parámetros fisicoquímicos de las mezclas formuladas. ....	123
<b>Ecuación 3.2.</b>	Estadístico de Friedman.....	164

## INTRODUCCIÓN

Si bien el consumo del Recurso Hídrico en El Salvador, proveniente de la red de suministro, por parte del sector industrial representa un menor porcentaje en comparación con el sector residencial, es de gran importancia evaluar una mejor alternativa para la reducción de este (Teos, 2019).

Este trabajo contempla el aprovechamiento del agua lluvia para uso industrial como alternativa para la reducción del consumo del agua proveniente de la red de suministro o de pozos, ya que si bien puede hacerse uso de un suavizador para la eliminación casi en su totalidad de iones de calcio y magnesio, esto genera un costo a la empresa, además de que la reducción de sales y bicarbonatos, aunque contribuye a la reducción en la formación de incrustaciones en el equipo de enfriamiento, la ausencia de éstas es propicia a la reducción del pH del agua para enfriamiento lo que conlleva a la aparición de corrosión en el material por el aumento en la acidez. Sin embargo los suavizadores no eliminan todas las sales presentes en la red de suministro, tal es el caso del sílice ( $\text{SiO}_2$ ).

El agua lluvia por naturaleza está libre de sales en dilución (iones), sin embargo existe la posibilidad de la presencia de estas en concentraciones mínimas, provenientes del material de captación de agua lluvia. A causa de la ausencia de sales, en especial iones de calcio, magnesio y de minerales como el sílice, el agua lluvia es un recurso aprovechable para mitigar la formación de incrustaciones en el equipo; sin embargo ésta posee mayor acidez que el agua suavizada lo cual es propicio para la aparición de corrosión si se utiliza ésta en su totalidad.

Con el aprovechamiento del agua lluvia se busca además de beneficios como la reducción en el consumo de agua de la red de suministro (o de pozo) y en el uso de suavizadores, mantener un equilibrio en las propiedades fisicoquímicas de calidad del agua al formular una mezcla que cumpla con los requerimientos técnicos en torre de enfriamiento.

La finalidad de esta investigación es proponer una o más formulaciones de mezcla de agua lluvia y agua suavizada que permita un equilibrio entre la formación de incrustaciones o la aparición de corrosión en el equipo, esto se expresa a través de los índices de estabilidad del agua: Índice de Saturación de Langelier e Índice de Estabilidad de Ryznar; los cuales se evalúan a través de los parámetros fisicoquímicos: pH, sólidos disueltos totales, dureza total y alcalinidad total. Además obtener una reducción en los flujos de carga de la torre de enfriamiento, expresado en el aumento de los ciclos de concentración, los cuales se determinan a partir de la evaluación de otro parámetro fisicoquímico que es la concentración de sílice en el agua.

Esta evaluación de parámetros fisicoquímicos y de calidad del agua para uso en torre de enfriamiento, tendrá sustento con análisis estadísticos inferenciales sobre los datos experimentales obtenidos de la toma de muestras que sean representativas de la población de estudio seleccionada.

## **1. CAPÍTULO I. FUNDAMENTO TEÓRICO.**

Para llevar a cabo la propuesta de formulación de mezcla agua lluvia – agua suavizada para ser utilizada en sistema de torre de enfriamiento es necesario describir los conceptos claves que ayudarán a comprender mejor la temática, además se describirán los procesos generales de torres de enfriamiento, aspectos relevantes sobre el uso de agua suavizada y de agua lluvia, así como generalidades para la captación de esta.

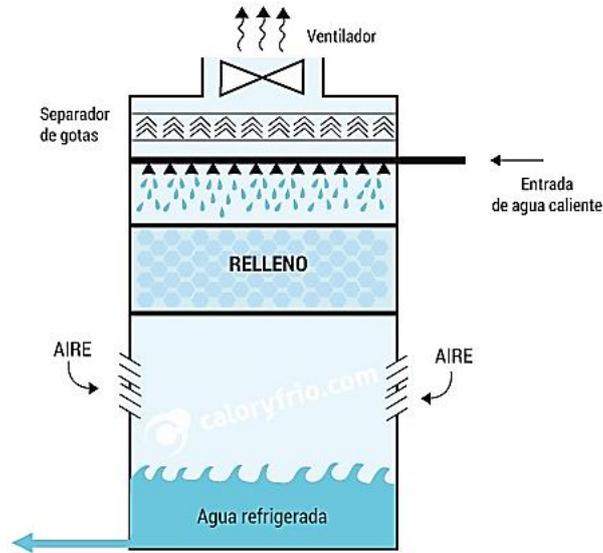
### **1.1. Generalidades de las Torres de Enfriamiento.**

(Danahé, 2016)

Puesto que el agua es un medio de transferencia de calor efectivo, pues su evaporación por libra requiere de aproximadamente un mil BTU, ya que es una de las tecnologías más económicas para dicho propósito en las áreas de aire acondicionado y de procesos industriales exotérmicos (liberación de calor), la torre de enfriamiento es el medio más eficaz para disminuir la temperatura del agua en grandes volúmenes.

Una torre de enfriamiento es una estructura que rechaza el calor residual a la atmósfera a través de la evaporación de una corriente de agua que se aproxima a la temperatura del bulbo húmedo del aire, es decir, es un equipo cuya finalidad es quitar el calor de una corriente de agua caliente, mediante aire seco y frío que circula por la torre.

Generalmente, se elimina entre 75 y 80 por ciento del calor del agua de refrigeración por evaporación y el resto se disuelve mediante transferencia al flujo de aire sustancial. En la figura 1.1 se representa el funcionamiento de una torre de enfriamiento.



**Figura 1.1.** Representación del funcionamiento de una torre de enfriamiento.  
Fuente: (Arnabat, 2018).

### 1.1.1. Componentes y funcionamientos.

(Lange, Molina y Ramos, 2010)

Las partes que conforman un sistema de enfriamiento dependerán del tipo de torre. Generalmente, cuentan con ciertos elementos básicos, como un sistema de distribución de agua, el medio o soporte donde se llevará a cabo el enfriamiento evaporativo y el sistema para la circulación de aire.

Las piezas y dispositivos específicos para cada clasificación se describen a continuación:

#### A. Cuerpo.

Es la estructura que le da forma a la torre y puede ser metálica, de madera incorruptible o de hormigón, como también de PVC.

#### B. Equipo mecánico.

Lo constituye un ventilador y motor eléctrico. Los ventiladores utilizados tienen un diámetro promedio de 24 pies y con un promedio de velocidad de 1200 a 1300 pies/min aproximadamente. Sin embargo, para los que están sobre planchas de

aluminio tienen una velocidad un poco menor. El problema referente a la vibración en los ventiladores siempre es más prominente en los que tienen 4 hojas que en los que tienen 6 hojas o más. La causa de esto es la alta proporcionalidad de carga o resistencia en cada hoja, esta carga es alternadamente incrementada y disminuida según el paso de la hoja sobre los miembros estructurales en el cuello del ventilador.

Para una mayor eficiencia del ventilador se debe tener en cuenta el ancho de la hoja, número de hojas, la amplitud, y el radio del eje del diámetro.

La eficiencia del mismo puede variar entre 65 y 80% y el promedio es aproximadamente de 65%. En la instalación de una torre de enfriamiento siempre se debe tener en cuenta la velocidad del ventilador para evitar la vibración por el alto ángulo de las hojas y la carga de potencia del ventilador, también se puede evitar la región lodosa la cual reduciría la vida del ventilador.

Para elegir el motor del ventilador se considera las condiciones atmosféricas que imperan alrededor de la torre. Industrialmente, se tiene conocimiento de los ventiladores de 22 pies de diámetro requieren frecuentemente de motores de 75 y 100 HP y a veces también de 125 HP.

### **C. Rociadores.**

Se encuentran en la parte superior de la torre y permiten que el agua caliente ingrese a la torre en forma de gotas para aumentar su superficie de contacto.

### **D. Empaquetadura.**

La empaquetadura es una estructura que se encuentra en el interior de la torre y puede ser metálica, plástica o de madera. Su función es obligar a que el agua que cae en forma de gotas permanezca la mayor cantidad de tiempo dentro del cuerpo de la torre, a fin de garantizar una óptima transferencia de calor. Así también ayuda a que el flujo de aire se distribuya uniformemente en el interior del cuerpo.

Unas de las principales características del relleno es que debe tener una máxima superficie de contacto aire-agua, debe ser resistente a temperaturas altas, corrosiones, aguas aciduladas y además de sustancias químicas que contienen ayudan a prevenir cualquier clase de hongos, algas y microorganismos.

#### **E. Reservorio.**

Se encuentra en el fondo de la torre y es un tanque en el cual se recoge el agua enfriada para regresar nuevamente al sistema.

#### **F. Eliminadores de Acarreo.**

Es una estructura ubicada en la parte superior de la torre y tiene la finalidad de evitar que las gotas pequeñas sean arrastradas por la corriente de aire fuera del sistema.

#### **G. Tubería de restitución del agua.**

Conforme se produce la evaporación del agua es necesario ir restituyéndola, para este propósito existe una tubería que mantiene el nivel del reservorio constante.

Lo más importante de este sistema es el agua que circula a través de la torre, ya que, como es un circuito cerrado, recibe el agua caliente y cuando pasa se enfría y sale con menor temperatura, después regresa al equipo que necesita agua fría, se calienta y vuelve a ir a la torre. Además, el agua no se enfría ni se descarga, realiza este proceso ininidad de veces. Se puede determinar que, dependiendo de la calidad del agua, serán las veces de los ciclos que pueda realizar.

Los operadores, por su parte, pueden reducir el consumo de agua de la torre, obteniendo el rechazo de calor a través de las siguientes consideraciones:

- I. La reducción de la carga de enfriamiento y la mejora de la torre / control de sistema

- II. La optimización de los ciclos de concentración y reducir al mínimo el volumen de purga
- III. Reducir al mínimo las pérdidas por fugas
- IV. La prevención de los desbordamientos
- V. La prevención de la pérdida de cualquier efecto del viento o salpicaduras
- VI. El mantenimiento de válvulas, sensores y todo el equipo para evitar fugas
- VII. Gestión adecuada de la química del agua y sistema de limpieza
- VIII. Proporcionar mejores prácticas de mantenimiento y formación enfocada a la conservación del agua.

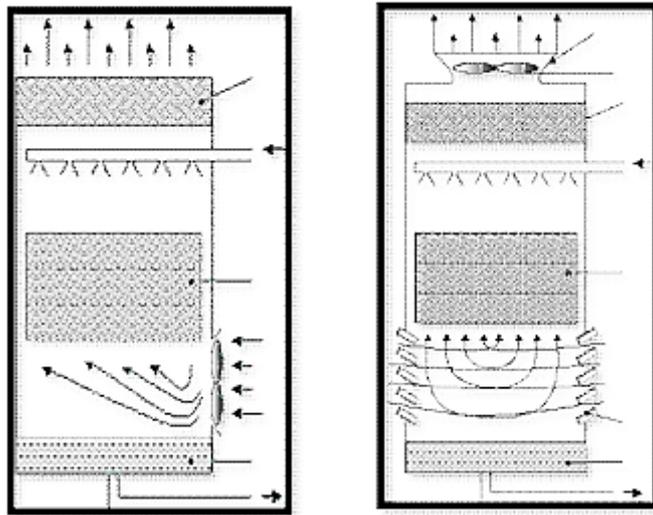
### **1.1.2. Clasificación de Torres de enfriamiento.**

Las torres de enfriamiento se clasifican de acuerdo con los medios por los que se suministra el aire. Todas emplean hileras horizontales de empaque para suministrar gran superficie de contacto entre al aire y el agua (Lange et al., 2010).

Según Lange et al. (2010), las torres de enfriamiento se clasifican en:

#### **1.1.2.1. Torres de tiro mecánico**

Las torres de tiro mecánico proporcionan un control total sobre el caudal de aire suministrado. Se trata de torres compactas, con una sección transversal y una altura de bombeo pequeñas en comparación con las torres de tiro natural. En estas torres se puede controlar de forma precisa la temperatura del agua de salida, y se pueden lograr valores de acercamiento muy pequeños (hasta de 1 o 2 °C, aunque en la práctica acostumbra a ser de 3 o 4 °C). Si el ventilador se encuentra situado en la entrada de aire, el tiro es forzado. Cuando el ventilador se ubica en la zona de descarga del aire, se habla de tiro inducido. En la figura 1.2 se muestra la representación de Torres de Tiro Mecánico.



**Figura 1.2.** Representación de Torre de Tiro Mecánico.  
Fuente: (Lange et al., 2010).

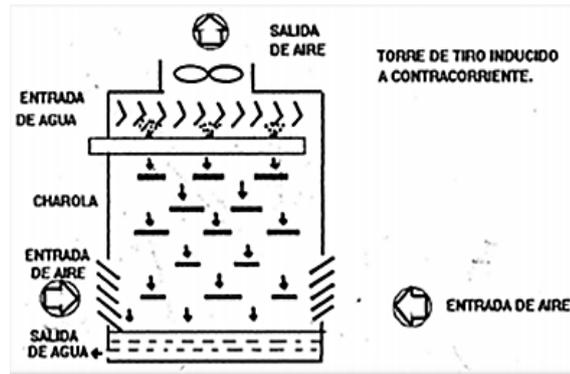
Las torres de tiro mecánico se dividen en dos categorías, esta categoría depende de donde se coloque el ventilador en la torre, dichas categorías se describen a continuación:

**A. Tiro inducido:**

El aire se succiona a través de la torre mediante un abanico situado en la parte superior de la torre.

Una corriente de aire inducido sube por la torre a contracorriente de las gotas de agua que caen a través de las bandejas. El agua de mayor temperatura está en contacto con el grueso de aire húmedo y el agua. La recirculación de aire caliente es despreciable ya que los ventiladores envían este aire caliente bastante lejos.

En la figura 1.3 se muestra la representación de torre de tiro inducido.

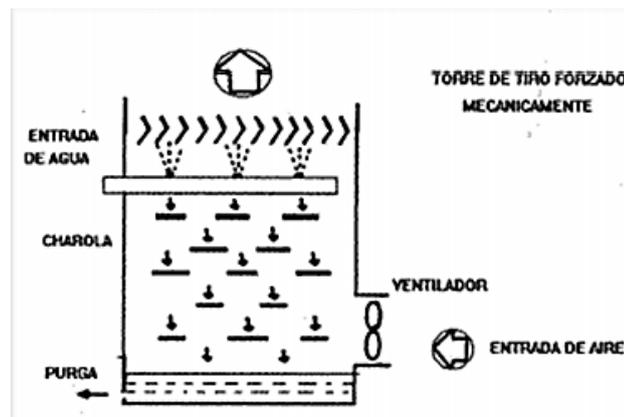


**Figura 1.3.** Representación de Torre de Tiro Inducido.  
Fuente: (Lange et al., 2010).

### B. Tiro forzado:

El aire se fuerza por un abanico en el fondo de la torre y se descarga por la parte superior.

En este tipo de sistema se emplean uno o más ventiladores para remover grandes cantidades de aire a través de las bandejas y contra las gotitas de agua. Las gotas que son arrastradas hacia arriba son detenidas por los deflectores ubicados en la parte alta de la torre. En la figura 1.4 se presenta la representación de torre de tiro forzado.



**Figura 1.4.** Representación de Torre de Tiro Forzado.  
Fuente: (Lange et al., 2010).

### 1.1.2.2. Torres de circulación natural

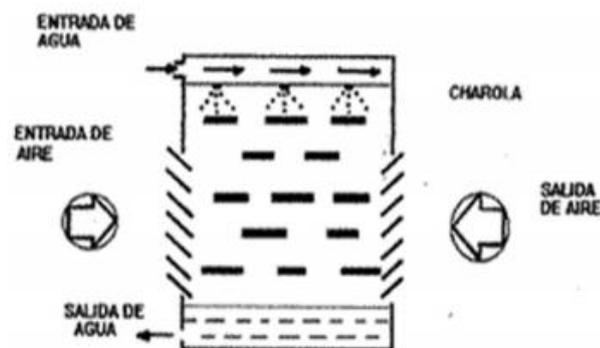
A continuación se detallan los tipos de torre de circulación natural según Lange et al. (2010), las cuales son:

#### A. Atmosféricas:

Las torres atmosféricas utilizan las corrientes de aire de la atmósfera. El aire se mueve de forma horizontal y el agua cae verticalmente (flujo cruzado). Son torres de gran altura y pequeña sección transversal. Deben instalarse en lugares muy despejados, de forma que ningún obstáculo pueda impedir la libre circulación de aire a través de la torre. Tienen un costo inicial alto por su gran tamaño, pero el costo de mantenimiento es reducido, al no existir partes mecánicas móviles.

Una torre de este tipo puede ser una solución muy económica para determinadas necesidades de refrigeración si se puede garantizar que funcionará habitualmente expuesta a vientos de velocidades iguales o superiores a los 8 km/h. Si la velocidad promedio del viento es baja, los costos fijos y de bombeo aumentan en relación a una torre de tiro mecánico y no compensan el ahorro del costo de ventilación.

De acuerdo a Lange et al. (2010), las torres atmosféricas están en desuso. En la figura 1.5 se muestra la representación de una torre atmosférica.



**Figura 1.5.** Representación de una Torre Atmosférica.  
Fuente: (Lange et al., 2010).

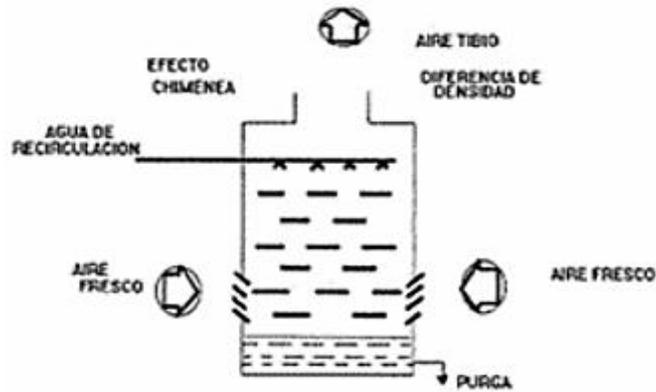
## **B. Tiro natural:**

Una torre de tiro natural es aquella en la que el aire es inducido por una gran chimenea situada sobre el relleno. La diferencia de densidades entre el aire húmedo caliente y el aire atmosférico es el principal motivo por el cual se crea el tiro de aire a través de la torre. La diferencia de velocidades entre el viento circulante a nivel del suelo y el viento que circula por la parte superior de la chimenea también ayuda a establecer el flujo de aire. Por ambos motivos, las torres de tiro natural han de ser altas, además, deben tener una sección transversal grande para facilitar el movimiento del aire ascendente.

Estas torres tienen bajos costos de mantenimiento y son muy indicadas para enfriar grandes caudales de agua. Al igual que las torres atmosféricas, no tienen partes mecánicas. La velocidad media del aire a través de la torre suele estar comprendida entre 1 y 2 m/s. Las torres de tiro natural no son adecuadas cuando la temperatura seca del aire es elevada, ya que ésta debe ser siempre inferior a la del agua caliente. No es posible conseguir un valor de acercamiento pequeño y es muy difícil controlar exactamente la temperatura del agua.

En las torres de tiro natural no se pueden utilizar rellenos de gran compacidad, ya que la resistencia al flujo de aire debe ser lo más pequeña posible. Estas torres son muy utilizadas en centrales térmicas; muy pocas veces son aplicables a plantas industriales por la fuerte inversión inicial necesaria.

En la figura 1.6 se presenta la representación de una torre de tiro natural.

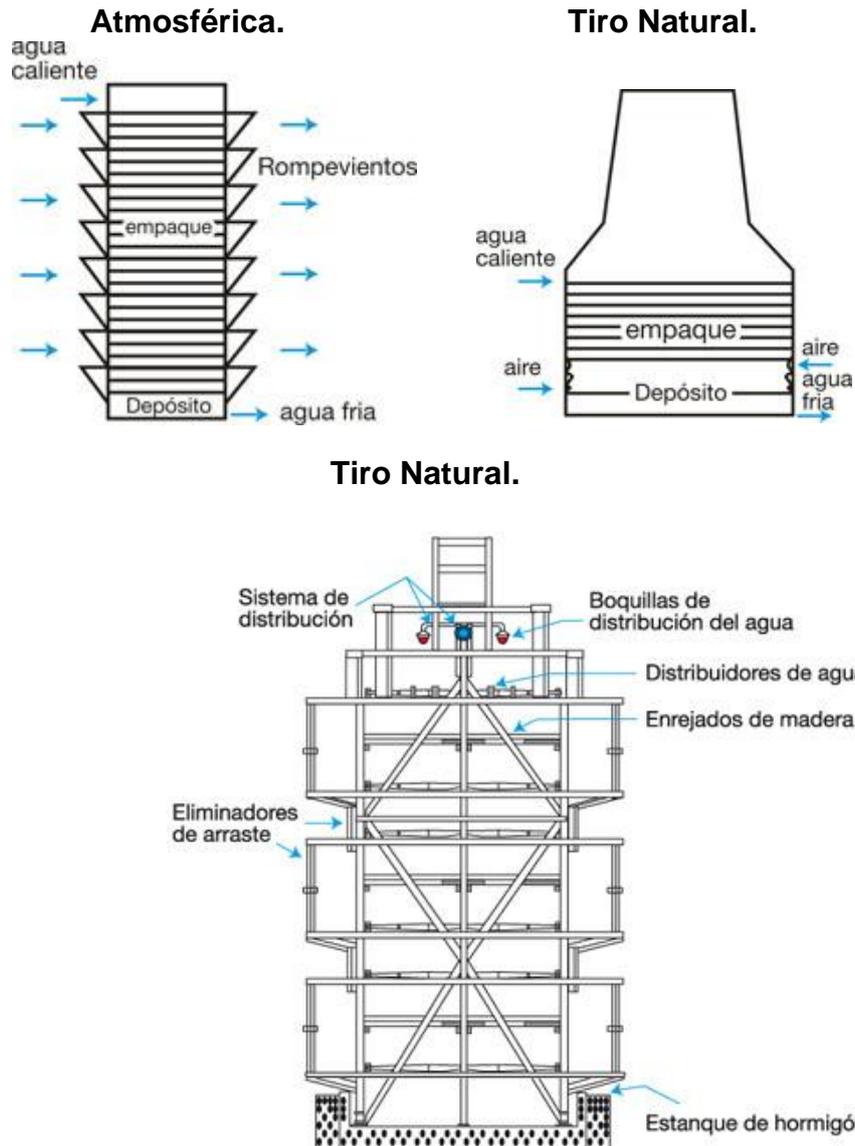


**Figura 1.6.** Representación de una Torre de Tiro Natural.  
Fuente: (Lange et al., 2010).

Las figura 1.7 resume los tipos de torres de enfriamiento de tiro mecánico y la figura 1.8 resume los de circulación natural:



**Figura 1.7.** Clasificación de torres de tiro mecánico.  
Fuente: (Lange et al., 2010).



**Figura 1.8.** Clasificación de torres de circulación natural.  
Fuente: (Lange et al., 2010).

### 1.1.3. Influencias Externas sobre el funcionamiento.

En la localidad de la implantación de la torre de enfriamiento existen factores influyentes que podrían causar problemas en el equipo, como la interferencia entre torres o la recirculación del penacho de aire (Minguito, 2015).

Además los materiales que conforman la torre son hechos de metal, madera o plástico y pueden ser afectados por las condiciones a las que estén expuestos:

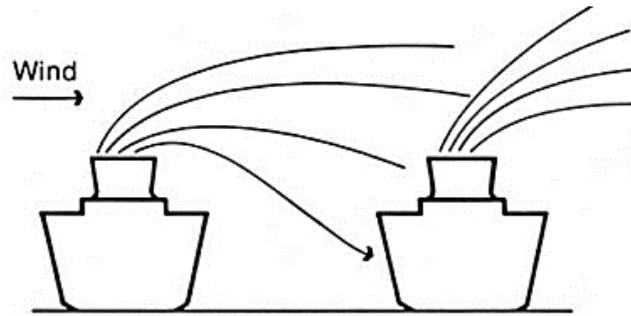
- a. **Los componentes metálicos:** son susceptibles a la corrosión y tienen una vida operativa estimada de 12 a 15 años (Minguito, 2015).
- b. **Torres de madera:** son más resistentes que las metálicas a la corrosión y al crecimiento microbiológico. Tienen un periodo de uso útil de hasta 20 años (Minguito, 2015).
- c. **Torres plásticas:** son resistentes a ácidos, bases, sales, ataques microbiológicos, oxidación y pueden tener una vida operativa de más de 20 años (Castillo, 2007).

A continuación se detallan los factores influyentes que podrían causar problemas en el equipo, según Minguito (2015):

#### **1.1.3.1. Interferencias**

El penacho de aire húmedo y caliente, visible o no, que sale por arriba de una torre de refrigeración puede ser arrastrado hacia abajo por la acción del viento, provocando que la torre que se encuentra al lado reciba un aire con una temperatura superior. Esto es perjudicial porque disminuiría el rendimiento del equipo, ya que elevaría la temperatura de bulbo húmedo (Minguito, 2015).

En la figura 1.9 se presenta la Interferencia por la acción del viento entre dos torres de enfriamiento.

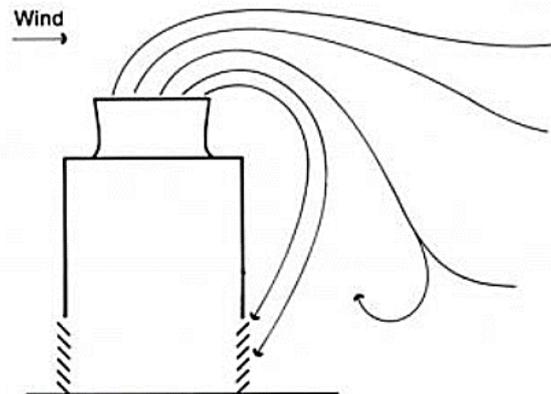


**Figura 1.9.** Interferencias debidas a la acción del viento entre dos torres de enfriamiento.

Fuente: (Minguito, 2015).

### 1.1.3.2. Recirculación.

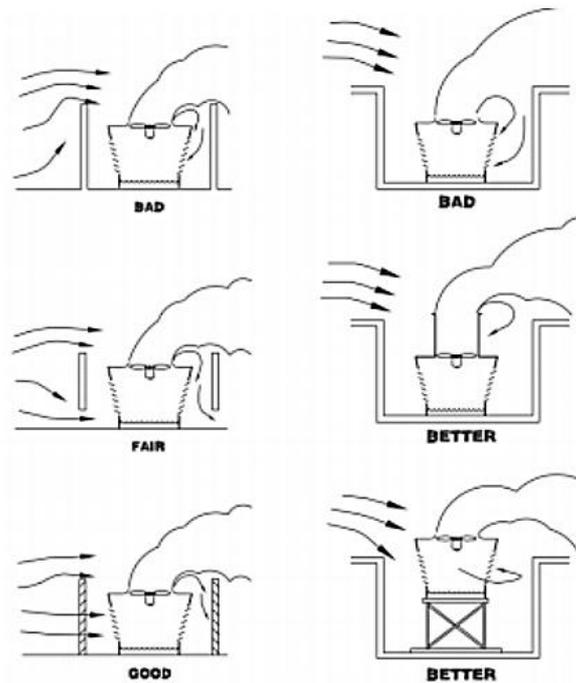
El aire caliente que sale por la torre se mezcla con el aire ambiente, pero en este caso, la mezcla de aire entra de nuevo en la misma torre. Estos fenómenos dependen de factores como: la forma de la torre, la velocidad del aire a la salida y la dirección predominante que tenga el viento en la zona donde se va a localizar la torre (Minguito, 2015). En la figura 1.10 se presenta la recirculación del aire en una torre de enfriamiento.



**Figura 1.10.** Recirculación del aire en una Torre de Enfriamiento.

Fuente: (Minguito, 2015).

Uno de los métodos para resolver el problema de recirculación de aire en estos equipos es de colocar paredes y pantallas, en la figura 1.11 se presenta las disposiciones de pantallas correctas (fair, good, better) e incorrectas (bad).



**Figura 1.11.** Disposiciones de pantallas correctas para torres de enfriamiento.

Fuente: (Minguito, 2015).

El fenómeno de las interferencias depende fundamentalmente de la dirección predominante del viento en la zona. De esta forma, se estudia la distribución más apropiada para disponer las torres.

### 1.1.3.3. Consideraciones en el emplazamiento.

(Minguito, 2015)

Según Minguito (2015), las consideraciones en el emplazamiento de torres de enfriamiento son:

- a. No situar las torres cerca de elementos de generación de calor.
- b. Selección de un emplazamiento abierto en la zona de entrada del aire, no situándola cerca de los edificios adyacentes.

- c. Calidad del aire que puede ser aspirado por el equipo. Debe evitarse la proximidad a chimeneas o emanaciones de polvo y sólidos en suspensión del aire, emanaciones corrosivas o fermentables (escapes de motores, vapores de procesos) y en definitiva, todo aquello que pueda favorecer el ensuciamiento, formación de incrustaciones o corrosión.
- d. Facilidad de acceso actual y futuro para los trabajos de revisión, así como para las limpiezas, desinfecciones y el mantenimiento mecánico.

#### **1.1.3.4. Contaminación.**

(Castillo, 2007)

Según Castillo (2007), los contaminantes del aire son depositados en el agua durante la fase evaporativa. Al incrementarse la efectividad en la operación, la transferencia de los contaminantes del aire al agua también se incrementa, lo cual tiende a disminuir la eficiencia de la torre.

El crecimiento de algas, hongos y bacterias también puede afectar la eficiencia de la operación. Todos los ingredientes necesarios para el crecimiento biológico (temperatura, humedad, luz solar, oscuridad, nutrientes) están presentes en un sistema de recirculación abierto.

Estos organismos pueden corroer metales, madera, recubrir interiores de intercambiadores de calor y en general mantener el sistema de enfriamiento sucio.

#### **1.1.3.5. Sólidos Disueltos.**

(Castillo, 2007)

Según Castillo (2007), los sólidos disueltos del agua evaporada son concentrados en el agua que permanece en la torre. Las principales sales minerales y gases disueltos en el agua consisten de Calcio y Magnesio en forma de Carbonatos y Bicarbonatos, Cloruros, Sulfatos, Silicio, Oxígeno y Dióxido de Carbono.

Cuando el nivel de sólidos disueltos se reduce, el potencial de formación de incrustaciones y corrosión también se disminuye. Al incrementarse el contenido puede favorecerse la formación de incrustaciones de sales y sólidos en la superficie de intercambiadores de calor disminuyendo así la eficiencia de la torre de enfriamiento. La principal causa de desgaste y erosión en bombas, intercambiadores de calor, tuberías y resto del equipo auxiliar lo constituyen partículas más pesadas que el agua.

El control del nivel de sólidos disueltos se da con la descarga continua de un porcentaje de agua a través de un proceso llamado "purga" y de un reabastecimiento con agua relativamente pura o "reemplazo". Es necesario, también la adición de algunos químicos para controlar la incrustación, corrosión y crecimiento microbiológico.

## **1.2. Sistemas de distribución de agua en torres de enfriamiento.**

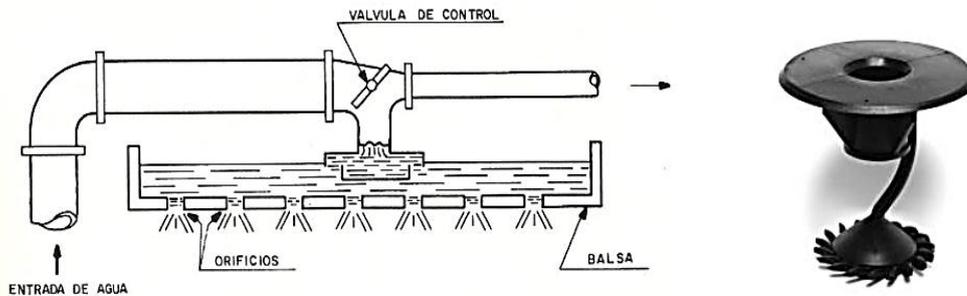
Según Lange et al. (2010) y Minguito (2015), los sistemas de distribución de agua en torres de enfriamiento se pueden clasificar como se detalla a continuación:

### **1.2.1. Sistemas por gravedad.**

El método consiste en hacer llegar el agua caliente a la parte superior de la torre, acumulándose está en una caja de alimentación, para luego distribuirse a la torre por gravedad. Este sistema presenta ventaja en cuanto a costo, teniendo una mejor distribución en el área transversal de la torre (Lange et al., 2010).

Rara vez se utiliza este sistema para diseños con flujo contracorriente, por las dificultades que se presentan en el diseño y el ajuste de la distribución del agua. Se interfiere con el flujo de aire y es difícil de mantener con su localización interna (Lange et al., 2010).

Por el contrario es muy común para diseños en flujo cruzado de la zona húmeda ya que para este caso la velocidad del aire es nula en el distribuidor. En la figura 1.12 se presenta el sistema de distribución de agua por gravedad.



**Figura 1.12.** Sistemas de distribución de agua por gravedad.

Fuente: (Minguito, 2015).

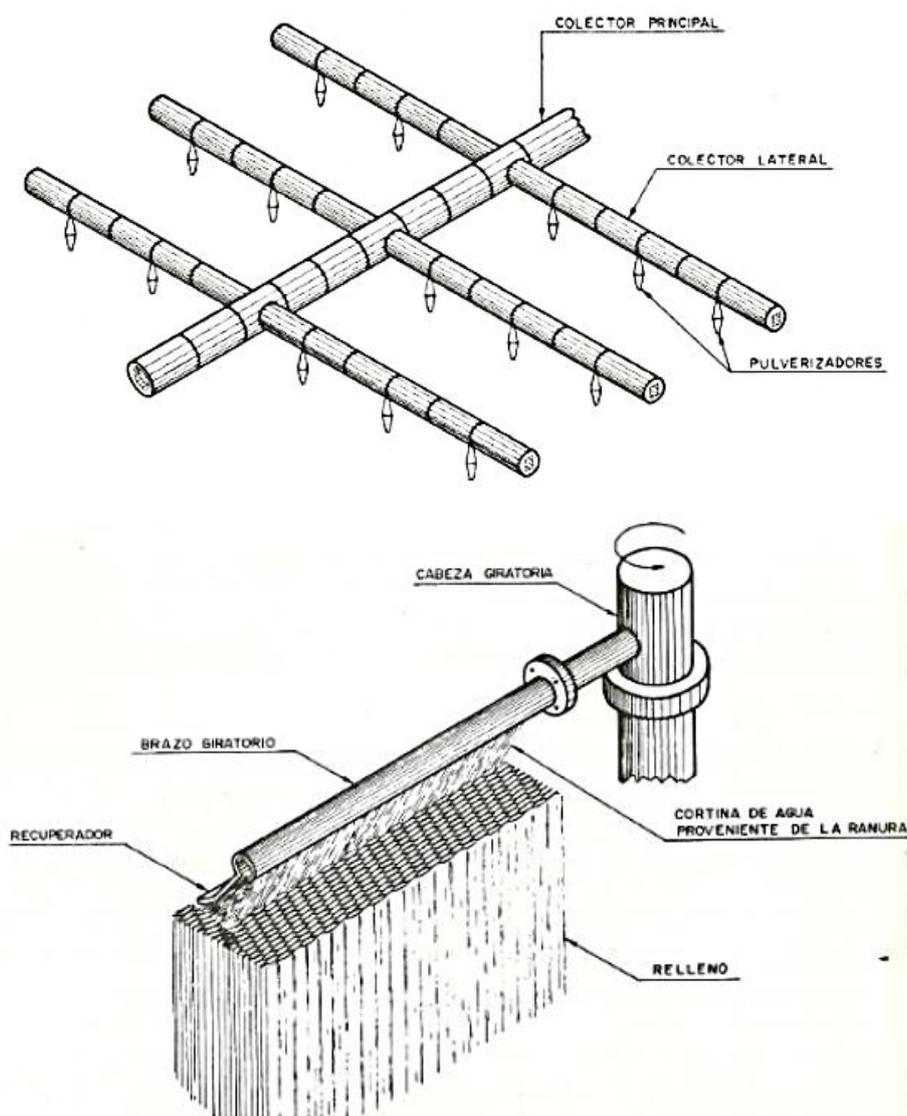
### 1.2.2. Sistemas por presión.

Consiste en la distribución por boquilla, los cuales dividen finamente las partículas de agua para ser repartidas en forma de spray y tener así una mejor área de contacto con el aire, en este caso no se requiere de caja de alimentación (Lange et al., 2010).

La mayor parte de diseños en flujo contracorriente se encuentran equipados con sistemas de pulverización a presión con las toberas dirigidas hacia abajo. Este sistema no solo actúa como distribuidor sino que contribuye directamente al rendimiento de la torre (Lange et al., 2010).

Los problemas relacionados con este sistema son principalmente de mantenimiento y de regulación del flujo de agua, ya que no es posible limpiar fácilmente la suciedad acumulada en los ramales y los pulverizadores que, además se encuentran por debajo de los eliminadores de gotas.

También presenta dificultades la tarea de igualar el caudal de cada una de las celdas, lo cual es un requisito imprescindible para lograr un funcionamiento correcto de la torre (Minguito, 2015). En la figura 1.13 se presenta el sistema de distribución de agua por presión.



**Figura 1.13.** Sistemas de distribución de agua por presión.

Fuente: (Minguito, 2015).

### **1.3. Calidad del Agua para Torres de Enfriamiento.**

En este apartado se describen la caracterización y propiedades fisicoquímicas del agua para enfriamiento, a la vez se mencionan algunas fuentes y usos de esta. Se especifican los parámetros fisicoquímicos del agua de enfriamiento, esto es de gran importancia para determinar la existencia o no de problemas de corrosión, incrustación o ensuciamiento en el material del sistema.

#### **1.3.1. Fuentes y usos del agua.**

Según Lange et al. (2010), el agua es un excelente refrigerante porque:

- a. Es normalmente abundante
- b. Es fácilmente utilizable: es de fácil manejo
- c. Es poco costosa.
- d. Puede transportar grandes cantidades de calor por unidad de volumen.
- e. No se expande ni se comprime significativamente, dentro de los rangos de temperatura normalmente usados.
- f. No se descompone.

Según Lange et al. (2010), las fuentes de agua de enfriamiento son:

- A. Agua fresca:** Es la fuente principal de agua de reposición para los sistemas de agua de enfriamiento. Puede ser:
- i. agua superficial (ríos, arroyos, reservorios);
  - ii. agua subterránea (agua de pozos poco profundos o profundos).

En general, los suministros de agua subterránea son más consistentes en composición y contienen menos materia suspendida que los suministros de agua superficiales, los cuales son directamente afectados por las lluvias, erosión y otras condiciones ambientales.

**B. Agua de mar y aguas residuales:** A causa de las consideraciones ambientales, al costo del agua y al agua utilizable, algunas plantas usan agua de mar y aguas residuales, tratadas en plantas de efluentes, como fuentes de agua de enfriamiento.

### **1.3.2. Caracterización y propiedades del agua.**

Existen cuatro problemas de los sistemas de agua de enfriamiento: **corrosión, incrustaciones, ensuciamiento y contaminación microbiológica**; sobre los cuales hay un impacto directo de las propiedades fisicoquímicas del agua para enfriamiento, que se detallan a continuación:

#### **1.3.2.1. Conductividad.**

Es una medida de la facultad para conducir la electricidad. En agua para enfriamiento, la conductividad indica la cantidad de minerales y gases disueltos en el agua. La conductividad es medida en micro-ohmios o bien en micro-siemens y puede variar de muy pocas unidades para agua destilada, a más de 10,000 micro-ohmios para el agua salada.

Los programas para tratamiento de agua de enfriamiento funcionan dentro de rangos específicos de conductividad (Lange et al., 2010).

La tabla 1.1 muestra los niveles de mineralización del agua indicados por su conductividad en micro-siemens sobre centímetro:

**Tabla 1.1.** Niveles de mineralización del agua medidas a partir de la variable fisicoquímica conductividad.

<b>Conductividad eléctrica (<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>)</b>	<b>Mineralización</b>
Menor de 100	Muy débil
100 – 200	Débil
200 – 700	Media
700 a 1000	Importante
Más de 1000	Excesiva

Fuente: (Minguito, 2015).

#### **1.3.2.2. Dureza.**

Se refiere a la cantidad de minerales de calcio y magnesio presentes en el agua. La dureza en agua natural puede variar de unas pocas partes por millón (ppm) a por encima de 800 ppm. Los niveles de dureza están usualmente asociados con la tendencia del agua de enfriamiento a formar o no incrustaciones (Lange et al., 2010).

#### **1.3.2.3. Sólidos en Suspensión.**

Comprenden todas aquellas sustancias que están suspendidas en el seno de un agua y no decantan de forma natural. Se componen de sustancias y restos minerales y orgánicos de diversa procedencia (Minguito, 2015).

#### **1.3.2.4. Turbidez.**

Propiedad de un líquido para dejar pasar la luz por la presencia de sólidos en suspensión. Su valor se expresa en unidades nefelométricas de turbidez (UNT), a partir de una concentración del producto utilizado como patrón llamado Formacina, que es una suspensión que se puede crear utilizando soluciones acuosas de Sulfato de Hidracina y Hexametilentetramina en unas proporciones conocidas para formar el patrón de turbidez de 400 NTU (Minguito, 2015).

### **1.3.2.5. Corrosividad y tendencia a la incrustación.**

Para conocer la tendencia incrustante y corrosiva del agua en un determinado circuito se utiliza el Índice de Saturación de Langelier. Este índice compara el pH del agua con el pHs (pH de saturación) teórico del agua si estuviera saturada de carbonatos.

### **1.3.2.6. Microorganismos.**

(Minguito, 2015)

Según Minguito (2015), se debe analizar el agua en busca de microorganismos, especialmente en busca de la bacteria *legionella pneumophila*. La enfermedad provocada por esta bacteria, la Legionelosis, es un riesgo en los equipos que incluyen enfriamiento por evaporación como las torres de refrigeración y condensadores evaporativos. El periodo de incubación de la bacteria es de 2 a 10 días y causa la muerte de aproximadamente el 10-20% de las personas que lleguen a padecerla.

Esta bacteria se desarrolla en medios húmedos tales como: cañerías de agua caliente sanitaria, torres de refrigeración, rociadores de agua, así como cualquier otro dispositivo que produzca gotas de agua que puedan ser inhaladas. La población de esta bacteria puede incrementarse de un modo considerable bajo unas determinadas condiciones como: el estancamiento del agua, agua a temperaturas comprendidas entre 25°C y 45°C con un nivel de pH entre 5.5 y 8.5, concentración de materias orgánicas en el agua e incluso la existencia de materiales como la madera y el plástico.

### **1.3.3. Mantenimiento de la calidad del agua para torres de enfriamiento.**

Según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, IDAE (2007), el agua que se use en la torre de enfriamiento debe cumplir con los requerimientos necesarios dentro de un rango especificado de sus parámetros de medición de propiedades fisicoquímicas y microbiológicas para que los materiales que

constituyen el circuito hidráulico del equipo resistan la acción agresiva del agua y los desinfectantes que se le agreguen con el fin de evitar o mermar los fenómenos de corrosión, de igual manera con el desarrollo de bacterias y hongos en materiales como la madera, el cuero, el plástico, fibrocemento, hormigón, y derivados de la celulosa.

La composición química del agua y la posibilidad de que sea incrustante o corrosiva, afectan en primera instancia a la eficacia de funcionamiento y a la duración de los equipos. La conservación de los equipos (torres y condensadores) depende fundamentalmente de la calidad del agua con la que trabajan, sin olvidar los requerimientos de mantenimiento mecánico.

Antes de la puesta en marcha del equipo de enfriamiento, se deben conocer las características, calidad y cantidad de agua disponible, de dónde proviene, y cualquiera que sea su origen, se ha de averiguar su temperatura, caudal y presión disponible, grado hidrotimétrico, materias sólidas en suspensión y su grado de agresividad (acidez, salinidad, alcalinidad, etc.) mediante el adecuado análisis fisicoquímico; con estos datos se tendrá previsto y podrá iniciarse un adecuado tratamiento del agua, cuando sea necesario.

La naturaleza básica o ácida del agua en niveles excesivos acarreará fenómenos de incrustación o de corrosión, así como su turbidez o ensuciamiento repercuten con facilidad en la formación de deposiciones (lodos, biocapas y/o costras), que afectan negativamente al rendimiento de los equipos y favorecen los procesos de corrosión.

Al mismo tiempo, todos esos parámetros de calidad del agua repercuten directamente en la efectividad y duración de los tratamientos de prevención y desinfección y por lo tanto en el gasto de productos y en el coste del tratamiento.

Por todo lo anterior, es fundamental la previsión y gestión permanente de la adecuada calidad del agua, contando inicialmente con las recomendaciones y limitaciones de cada fabricante para sus respectivos equipos.

#### **1.3.3.1. Esquema básico de control de calidad del agua.**

Los niveles básicos de control de la calidad del agua (IDAE, 2007), se describen como:

- a. Análisis previo del agua de aportación para determinar el equipamiento y el nivel de regulación necesario para tratamientos de descalcificación o corrección de acidez.
- b. Instauración de los procedimientos y dispositivos para evitar la formación de incrustaciones. Entre los dispositivos habituales: tratamientos de eliminación de sustancias indeseables (normalmente sales de calcio o magnesio) mediante ósmosis o descalcificación. Existen alternativas de procedimientos químicos (inhibidores) o físicos (sistemas magnéticos o electromagnéticos), siempre que la posterior eliminación de las sales en suspensión no fuerce purgas o sangrados excesivos con la consiguiente pérdida y reposición de biocidas.
- c. Previsión y/o instalación de dispositivo/s de filtrado del agua en recirculación; normalmente mediante filtro de arenas, preferiblemente autolimpiante, en circuito paralelo con la/s balsa/s. En caso necesario, apantallamiento de protección contra ráfagas de viento con arrastres sólidos o de humos grasos o corrosivos.
- d. Control biológico del agua:
  - i. Empleo de biodispersores para evitar la formación de películas de biocapa que pueden reducir la eficacia del intercambio térmico y servir de refugio o nutriente a bacterias como las legionelas.

- ii. Prevención y control del desarrollo de bacterias que puedan significar riesgo para la salud, con especial atención a la *Legionella Pneumophila*.

Se deberá hacer empleo de productos químicos, generalmente compuestos de cloro o bromo u otros, que estén debidamente registrados. Otras alternativas pueden ser el empleo de sales de plata y cobre o aplicaciones de luz ultravioleta o dosificación de ozono, cuyos resultados deben ser en todos los casos comprobados para cubrir los requisitos de los decretos o reglamentos en vigor aplicables. Los tratamientos biocidas deberán estar compensados con los correspondientes inhibidores de corrosión que resulten compatibles y no resten la debida eficacia a la acción desinfectante.

- e. Establecimiento de dispositivos de purgado automático del agua de la balsa o bandeja para mantener los niveles de concentración adecuados. El caudal de purga o sangrado del agua de la balsa se establece a partir de los denominados ciclos de concentración. Los ciclos de concentración dependen de la calidad del agua de aporte y de la que sea admisible para el agua de recirculación en función de las especificaciones del fabricante del equipo (torre o condensador) y de los materiales del sistema con los que va a estar en contacto dicha agua; así pues, difieren de uno a otro equipo o sistema.

### **1.3.3.2. Tratamientos de calidad del agua.**

(IDAE, 2007)

Según el IDAE (2007), los tratamientos de calidad del agua necesarios o recomendables dependen, en principio, de la calidad del suministro que es muy variable según el área geográfica y también de la fuente u origen, que en el caso de manantiales o pozos puede variar según la estación del año, los regímenes de lluvias, estiajes, etc.

En zonas donde habitualmente se dispone de aguas de dureza considerable, a menudo el tratamiento se ha reducido a la instalación de un descalcificador con la intención de evitar incrustaciones. Se tienen las siguientes indicaciones al respecto:

- a. Los resultados requeridos del tratamiento descalcificador dependen básicamente de su dimensionado, acorde a las necesidades reales, a partir de los caudales a tratar y la calidad del agua disponible a la entrada y exigible a la salida del aparato.
- b. Su correcto funcionamiento exige un control adecuado que no se limita al suministro de sal; se ha de controlar periódicamente el funcionamiento apropiado de su programación, la calibración de los contadores y la composición y pH del agua obtenida, sin olvidar la presión del agua a la entrada que asegure el caudal adecuado.
- c. Una excesiva descalcificación puede iniciar procesos de descincado en los materiales galvanizados, propiciando ulteriores ataques (oxidación, corrosión, etc.) sobre los aceros de base.
- d. Puede ser conveniente disponer de un depósito o balsa de adecuado tamaño para recogida del agua tratada evitando el suministro directo del descalcificador a la/s torre/s o condensador/es. Esta disposición ayuda a prevenir desequilibrios motivados por eventuales demandas extraordinarias que pueden ser superiores al caudal máximo del descalcificador durante algunos momentos y también puede compensar deficiencias en la alimentación debidas a caídas de presión o cortes de suministro durante las horas de funcionamiento, aunque requiere la adecuada elevación de tal depósito o la previsión de un sistema de bombeo para la reposición de agua a la/s torre/s.

En la tabla 1.2 se muestran los parámetros de control a tener en cuenta para el tratamiento del agua para torre de enfriamiento:

**Tabla 1.2.** *Parámetros de control del agua para equipo de enfriamiento.*

<b>Parámetro de control del agua</b>	<b>Tipo</b>
Alcalinidad	Fisicoquímico
pH	Fisicoquímico
Fosfatos	Fisicoquímico
Dureza total	Fisicoquímico
Unidades Formadoras de Colonias /mL (UFC)	Biológico
Cobre	Fisicoquímico
Cloro libre	Fisicoquímico
Sílice	Fisicoquímico
Temperatura	Fisicoquímico
Conductividad	Fisicoquímico
Dureza de calcio	Fisicoquímico
Número de algas /mL	Biológico
Hierro	Fisicoquímico
Índice de Corrosión mpy	Fisicoquímico

Fuente: (Lange et al., 2010).

Los objetivos de la dosificación de productos químicos para agua de torres enfriamiento son:

- a. Aumentar el número de ciclos de concentración con el consecuente ahorro de agua de repuesto.
- b. Prevenir incrustaciones o depósitos ocasionados por la concentración de las sales por la evaporación de agua en la torre.
- c. Mantener bajo control la corrosión en los equipos de proceso.
- d. Evitar la proliferación de microorganismos que afecten la operación de la torre y los intercambiadores de calor (Lange et al., 2010).

En la tabla 1.3 se presentan los objetivos de los tratamientos químicos más usados en las torres de enfriamiento.

**Tabla 1.3.** *Objetivos de los tratamientos químicos en las torres de enfriamiento.*

<b>Objetivo o Finalidad</b>	<b>¿Cómo se logra?</b>
Prevención de incrustación y depósitos.	Modificando la solubilidad de las sales
	Dispersando los sólidos en suspensión
Inhibición de la corrosión.	Formando película protectora sobre la superficie del metal, ya sea por reacción, adsorción o precipitación.
	Manejando un pH alto o alcalinidad alta
Control de la proliferación de microorganismos.	Aplicando biocidas eficaces y adecuados, compatibles y sinérgicos entre sí.
Biodispersión o remoción de biocapa.	Aplicando un removedor que disperse la materia orgánica depositada sobre la superficie en donde fluye al agua de enfriamiento.

Fuente: (Lange et al., 2010).

En la tabla 1.4 se muestran las impurezas más comunes encontradas en el agua para enfriamiento, que pueden dar lugar a la formación de incrustaciones o corrosión causado por la acumulación de deposiciones de estos minerales o sólidos disueltos en el agua, en las tuberías y demás accesorios que conforman el equipo:

**Tabla 1.4.** *Impurezas del agua que afectan en el tratamiento interno de los sistemas de enfriamiento.*

<b>Impureza</b>		<b>Procedencia</b>
Hierro	Fe <sup>+2</sup> Ferroso	Fuente de depósitos en las tuberías.
	Fe <sup>+3</sup> Férrico	
Oxígeno	O <sub>2</sub>	Oxidación en tuberías (hierro y acero)

Continúa...

**Tabla 1.4** Impurezas del agua que afectan en el tratamiento interno de los sistemas de enfriamiento. (Continuación).

Impureza		Procedencia
Sulfuro de hidrógeno	H <sub>2</sub> S	Corrosión
Sólidos Disueltos		Elevadas concentraciones de sólidos son indeseables ya que originan formación de lodos
Sólidos Suspendidos		Originan depósitos en equipos intercambiadores de calor y tuberías ocasionan formación de lodos o incrustación.
Microorganismos	Algas, limo y hongos	Formación de adherencias suciedad biológica, corrosión, olores desagradables

Fuente: (Lange et al., 2010).

#### **1.3.4. Controles en el tratamiento de agua de circulación.**

(Minguito, 2015)

Este dependerá de las características del agua citadas previamente, los controles que se llevarán a cabo en la torre para evitar problemas, se detallan a continuación:

##### **1.3.4.1. Control de las incrustaciones.**

Dependiendo de las características del agua de aporte, los tratamientos pueden ser diversos desde una adición de determinados ácidos que contrarresten la alta alcalinidad, a la adición de inhibidores que impidan o dificulten la formación de las sales de calcio, hasta procesos más complejos como la desmineralización por osmosis o descalcificación.

#### **1.3.4.2. Control de la corrosión.**

Para evitar este problema en la fase de diseño del equipo se opta por materiales no oxidables o cuando se trabaja se emplean productos que crean una capa protectora sobre la superficie.

#### **1.3.4.3. Control de sólidos en suspensión (sedimentos).**

La corriente de aire ascendente provoca que el agua de refrigeración se ensucie por el arrastre de partículas del ambiente exterior. Para solucionar este problema, se instala un filtro de arenas que retiene estos sólidos. En caso de ser necesario, se puede instalar un apantallamiento de protección contra ráfagas de viento con arrastres sólidos o de humos grasos corrosivos.

#### **1.3.4.4. Control biológico del agua.**

Se realiza mediante el empleo de biodispersantes para evitar la formación de películas de biocapa que pueden reducir la eficacia del intercambio térmico y servir de refugio o nutriente a bacterias como la legionella. También de modo específico a la prevención y control del desarrollo de bacterias que pueda significar riesgo para la salud, con especial atención a la *legionella pneumophila*.

Este control se suele realizar mediante el empleo de productos químicos, generalmente de cloro o bromo, que estén debidamente registrados. También existen otras alternativas como el empleo de sales de plata y cobre o aplicaciones de luz ultravioleta.

#### **1.3.4.5. Control de los sólidos disueltos.**

Se dispone de dispositivos de purgado automático del agua de la balsa o bandeja para mantener los niveles de concentración de sólidos disueltos dentro de los límites especificados.

### **1.3.5. Sistemas de tratamiento de agua para torre de enfriamiento.**

(Castillo, 2007)

La necesidad del tratamiento al agua de recirculación en un sistema de enfriamiento debe: evitar la corrosión, evitar la formación de incrustaciones y mantener el agua en condiciones no atractivas para el crecimiento biológico.

Según Castillo (2007), con esto se puede lograr:

- a. Prolongar la vida útil del sistema y equipo de enfriamiento.
- b. Evitar o disminuir paros imprevistos por mantenimiento.
- c. Aumentar o mantener la eficiencia en el sistema de enfriamiento.

Un factor importante que debe tomarse en consideración para asegurar un mantenimiento satisfactorio de las torres es el efecto de cualquier tratamiento de agua sobre los materiales usados en la construcción de la torre y su equipo auxiliar, ya que el uso frecuente de químicos para limpiar o eliminar otros químicos genera nuevos contaminantes.

A continuación se expone una serie de tratamientos alternativos para el agua de las torres, sus beneficios y posibles inconvenientes, según Castillo (2007).

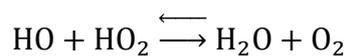
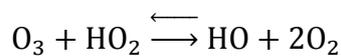
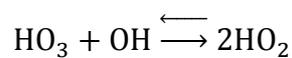
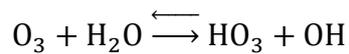
#### **1.3.5.1. Ozono.**

El ozono es un agente oxidante más fuerte y seguro que el cloro. Su potencial de oxidación de -2.07 V es mayor que la del ácido hipoclorito de -1.49 V o el cloro de -1.36 V. Puede ser obtenido a partir del aire seco y del oxígeno pasando estos gases a través de un campo eléctrico o un alto potencial suficiente para generar una "descarga corona" entre los electrodos. Luz ultravioleta y radiación de longitud de onda corta pueden también causar la conversión de  $O_2$  a  $O_3$ .

Los generadores de ozono requieren agua de enfriamiento para remover el exceso de calor que se produce, pues más del 80 % de la energía suministrada se convierte en calor. La generación de ozono no es un proceso energéticamente

eficiente por la energía eléctrica requerida. Un valor común para un generador alimentado por aire es de 15 a 26 kW por kg de O<sub>3</sub> obtenido.

El ozono es altamente inestable y debe ser generado in situ. No deja residuos o subproductos, excepto oxígeno y una mínima cantidad de dióxido de carbono y agua, en la ecuación 1.1 se muestra el proceso de descomposición del ozono:



**Ecuación 1.1.** Descomposición del ozono.

*Fuente: (Castillo, 2007).*

Los radicales libres Hidróxido y Dióxido de hidrógeno (HO<sub>2</sub> y HO) reaccionan con una variedad de impurezas tales como metálicas, materia orgánica incluyendo microorganismos, hidrógeno e iones de hidrógeno.

Las ventajas del uso del ozono en una torre de enfriamiento son:

- I. Control más efectivo de bacterias.
- II. Control del acumulamiento de residuos biológicos (biofouling).
- III. No hay problemas de desechos o residuos peligrosos.
- IV. Elimina o reduce grandemente la necesidad de la purga.
- V. Disminuye la incrustación en las superficies de los intercambiadores de placas.
- VI. No hay incremento en los índices de corrosión.

El ozono es un germicida más potente que el hipoclorito por factor de 10 a 100 y desinfecta 3.125 veces más rápido que el cloro.

El ozono no solo desinfecta: El ozono "mata" virus en aguas de desecho, donde el cloro no lo hace. También oxida compuestos orgánicos e inorgánicos, remueve compuestos causantes de olores, colores y neutraliza la carga superficial de los sólidos suspendidos.

Otra razón por la cual el ozono ha ganado popularidad sobre el cloro es la seguridad; el olor del ozono lo hace rápidamente notable, pero no lo hace necesariamente peligroso. Exposiciones a concentraciones de 1000 ppm de ozono por 30 segundos puede tener efectos irritantes; una exposición equivalente de gas cloro normalmente es fatal.

A niveles de 0.3 mg/L de ozono al máximo flujo de agua recirculante es adecuado en la mayoría de los casos. La vida media del ozono en el agua de una torre de enfriamiento a pH de 8 es aproximadamente 30 minutos y 1 minuto a pH de 9.5. Bajando el pH sustancialmente se incrementa la vida efectiva del ozono.

Las concentraciones de ozono en las zonas de contacto varían entre 100 y 2000 ppm. Sin embargo, a causa de que el ozono es corrosivo a los metales y dañino a los humanos en concentraciones altas, no se debe permitir el escape de gas sin tratar.

La Oficina para la Administración de la Seguridad y Salud Ocupacional de los Estados Unidos (OSHA, por sus siglas en inglés), establece una concentración máxima de 0.1 ppm en el venteo. Por lo cual, todo el ozono que se libera a la atmósfera pasa primero por un proceso de "destrucción" que puede ser catalítica, térmica, térmica-catalítica o carbón activado.

### **1.3.5.2. Cloro.**

Desde el inicio del siglo XIX, la cloración ha sido práctica estándar para la destrucción de microorganismos patógenos. Tal aceptación se debe a su gran poder germicida en comparación con otros conocidos germicidas. En los últimos años el uso del cloro se ha diversificado abarcando desde las aguas para uso humano hasta el agua circulante de los sistemas de enfriamiento. La prevención o eliminación de pérdidas de transferencia de calor a través del control de la formación de incrustaciones o recubrimiento interno en las unidades intercambiadoras de calor por medio de la cloración ha sido útil en las plantas industriales.

El proceso de eliminación de dichos recubrimientos mediante la clorinación se basa en el reconocimiento de que la mayoría de dichos depósitos en la superficie interna de intercambiadores (generalmente sitios de baja temperatura), tienen origen orgánico; acumulados por la acción de algas y bacterias.

Cuando se aplica el cloro al agua, una parte reacciona con materia orgánica presente, con gases disueltos, aceites y en pequeñas proporciones con sales inorgánicas. La cantidad de cloro requerido para satisfacer estas reacciones es conocido como la demanda de cloro en el agua y no es un factor constante. El exceso o cloro residual disponible después de satisfacer estas demandas (expresado en ppm) constituye el criterio de esterilización y se debe manifestar dicha demanda en relación al tiempo de contacto y el residual mantenido.

El exceso de cloro puede dañar la madera y otros materiales orgánicos de una torre de enfriamiento. Por lo cual debe ser añadido intermitentemente sin exceder 1.0 ppm evitando también altas concentraciones en el punto de dosificación que puedan bajar los valores de pH incrementando así los riesgos de corrosión. Por ésta razón el análisis exacto de cloro residual es el factor más importante en el tratamiento del agua.

Una determinación mayor que la real causa un insuficiente control biológico. Mientras que en el caso contrario los residuos de cloro tienen una severa acción corrosiva.

Los equipos de cloración deben contar con accesorios suficientes para asegurar la correcta dosificación del gas y la mezcla correcta con el agua circulante. Además de requerir sistemas de alarma en caso de fuga del gas, ya que éste ataca las mucosas y una sobreexposición usualmente es fatal.

#### **1.3.5.3. Floculación electroquímica.**

Es el proceso de aplicar una corriente eléctrica directa o alterna, y con una variación en la intensidad del voltaje a unos electrodos en contacto con el agua, lo cual provoca la precipitación de sólidos suspendidos y/o disueltos en flóculos o coágulos de tamaño suficiente para ser removidos del líquido por filtración.

#### **1.3.5.4. Sonoquímica.**

Se emplea ultrasonido (350 a 550 kHz), el cual trabaja en burbujas inducidas por la cavitación. Estas burbujas se llenan con gases y vapor, crecen e implotan violentamente cuando alcanzan una resonancia crítica. El colapso es tan rápido dentro de la burbuja alcanzando temperaturas entre 3500 a 4900 K y presiones de 700 a 900 bares. Bajo éstas condiciones las moléculas se vaporizan en las burbujas así como los compuestos presentes en las inmediaciones, sufriendo reacciones comparables a aquellas por altas temperaturas (Ultra-High temperature combustion).

La reacción de cavitación puede destruir el material o cápsula que cubre bacterias, virus y otros parásitos, exponiendo así sus ácidos nucleicos a la destrucción.

## 1.4. Generalidades del Agua Lluvia.

En este apartado se describen las generalidades sobre el agua lluvia: ciclo hidrológico, propiedades fisicoquímicas medibles para la determinación de la calidad de esta, contaminantes presentes en esta e información relevante en el área de estudio, además de detalles importantes para un sistema básico de captación de este recurso.

### 1.4.1. Ciclo Hidrológico del Agua.

El agua es una sustancia cuya molécula está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno,  $H_2O$ , presentándose en tres estados: sólido, líquido y gaseoso.

El ciclo hidrológico comienza con la evaporación del agua desde la superficie del océano. A medida que se eleva, el aire humedecido se transforma en agua: condensación; las gotas se juntan y forman una nube, luego, caen por su propio peso: precipitación (Mejía y Salamea, 2011).

El ciclo hidrológico consta de tres subsistemas (Hernández y Ortez, 2006), que son:

- a. **Agua atmosférica:** contiene los procesos de precipitación, intercepción, evaporación y transpiración. El Salvador cuenta con una evapotranspiración del 66.67%, del destino del agua lluvia precipitada en un año, el resto se considera potencialmente utilizable.
- b. **Agua superficial:** contiene los procesos de escurrimiento, esorrentía, flujo sub-superficial, flujo subterráneo, el cual ocurre en estratos profundos o rocosos del suelo y aporte a los océanos.

- c. **Agua sub-superficial:** contiene los procesos de infiltración, recarga del agua subterránea profunda, flujo sub-superficial, el cual toma lugar en el suelo cerca de la superficie y flujo subterráneo.

En la figura 1.14 se presenta el ciclo hidrológico del Agua.



**Figura 1.14.** Ciclo Hidrológico del Agua.

Fuente: (Mejía y Salamea, 2011).

#### 1.4.2. Calidad del Agua Lluvia.

Para Mejía y Salamea (2011), la lluvia (del latín pluviam) es un fenómeno atmosférico de tipo acuático que se inicia con la condensación del vapor de agua contenido en las nubes. Es la precipitación de partículas líquidas de agua de diámetro mayor de 0.5 mm. Depende de tres factores: la presión, la temperatura y especialmente la radiación solar.

La lluvia, en su caída, se distribuye de forma irregular: una parte será aprovechada para las plantas, otra se irá a los caudales de los ríos, otra se infiltrará a través del suelo que también puede ser utilizada o aprovechada para reciclarla y volverla

a utilizar en los hogares (incluso en actividades industriales), por último una parte se evaporará antes de llegar a la superficie por acción del calor.

La cantidad de lluvia que cae en un lugar se mide por los pluviómetros, que es un instrumento que se emplea en las estaciones meteorológicas para la recogida y medición de la precipitación. La cantidad de lluvia se expresa en milímetros (mm) de altura.

Las características del agua lluvia la hacen perfectamente utilizable para uso doméstico e industrial. Las ventajas de esta son:

- a) Es más limpia, “destilada” por el sol y las nubes.
- b) Es agua potable, si se cosecha, almacena y filtra cuidadosamente.
- c) Está accesible en cualquier lugar donde hay lluvia.
- d) No se necesitan filtros sofisticados para cosecharla.

#### **1.4.2.1. Propiedades fisicoquímicas del agua lluvia.**

Se listan y detallan las propiedades fisicoquímicas del agua lluvia, según Mejía y Salamea (2011):

- A. **Es insípida e inodora** en condiciones normales de presión y temperatura. El color varía según su estado: como líquido, se puede observar incolora en pequeñas cantidades, aunque en el espectrógrafo se puede observar que tiene un ligero tono azul verdoso.
- B. **Capilaridad y tensión superficial:** La capilaridad es la propiedad que tiene un líquido a subir por un tubo, el nivel que alcanza es directamente proporcional a la tensión superficial del líquido e inversamente proporcional al grosor interno del tubo. Los enlaces de hidrógeno provocan que el agua tenga una gran tensión superficial, por lo que ésta busca adherirse a las paredes del tubo, esto hace que tenga una gran capilaridad.

- C. **Temperatura de ebullición:** Es la temperatura con la que el agua se convierte en gas (vapor de agua) y depende de la altitud (presión atmosférica): a mayor altitud (menor presión), menor temperatura de ebullición. La temperatura de ebullición del agua es mayor a 100°C a nivel del mar.
- D. **Solubilidad:** El agua pura no existe en la naturaleza, pues se disuelve fácilmente con otras sustancias, algunas de estas son fundamentales para la vida. Esta característica es fundamental para la vida, pero su inconveniente es que el agua es fácil de contaminar.
- E. **Calor específico:** Es la cantidad de calor necesaria para elevar o descender la temperatura de una cierta cantidad de agua de una sustancia. Así, la caloría es la cantidad de calor necesaria para elevar o descender 1° la temperatura de 1 gramo de agua. El agua tiene muy alta su capacidad calórica (4200 J/kg-K) y se necesita aplicar calor para elevar poco su temperatura.
- F. **Conductividad eléctrica:** Es la capacidad de que una sustancia pueda conducir la corriente eléctrica. En medios líquidos (disolución), está relacionada con la presencia de sales en solución, cuya disociación genera iones positivos y negativos capaces de transportar la energía eléctrica si se somete el líquido a un campo eléctrico. Estos conductores iónicos se denominan *electrolitos* o *conductores electrolíticos*.

El agua pura tiene conductividad relativamente baja, pero se incrementa significativamente con la disolución de una pequeña cantidad de material iónico. Las unidades de medición son el siemens sobre centímetro (S/cm) y mili-ohm sobre centímetro (ohm/cm).

Para ilustrar todo lo anterior a manera de síntesis, en la tabla 1.5 se muestran los valores de conductividad del agua según la fuente de agua de proveniencia, en micro siemens sobre centímetro.

**Tabla 1.5.** Valores de conductividad del agua según fuentes de proveniencia.

Fuente de proveniencia	Valor de conductividad
Agua ultra pura	0.055 $\mu\text{S/cm}$
Agua destilada	0.5 $\mu\text{S/cm}$
Agua de montaña	1.0 $\mu\text{S/cm}$
Agua doméstica	500 a 800 $\mu\text{S/cm}$
Máximo para agua potable	1055 mS/cm
Agua de mar	56 mS/cm
Agua salobre	100 mS/cm

Fuente: (Mejía y Salamea, 2011).

### 1.4.3. Contaminación del Agua Lluvia.

Una atmósfera contaminada puede cambiar el clima, producir lluvia ácida o destruir el ozono, es resultado de las actividades del hombre (Hernández y Ortez, 2006).

Las causas que originan esta contaminación son diversas, pero el mayor índice es provocado por las actividades industriales, comerciales, domésticas y agropecuarias.

La contaminación puede dividirse en dos grandes grupos, (Hernández y Ortez, 2006), se describen a continuación:

- a. **Contaminantes primarios:** Aquellos procedentes directamente de las fuentes de emisión: óxidos de azufre, monóxido de carbono, óxido de nitrógeno, hidrocarburos y partículas.
- b. **Contaminantes secundarios:** Aquellos originados en el aire por interacción entre dos o más contaminantes primarios, o por sus reacciones con los constituyentes normales de la atmósfera. Entre ellos destacan oxidantes fotoquímicos y algunos radicales de corta existencia como el ozono ( $\text{O}_3$ ). Ambas contaminaciones son presentadas en la figura 1.15:



**Figura 1.15.** Contaminación primaria y secundaria del agua lluvia.

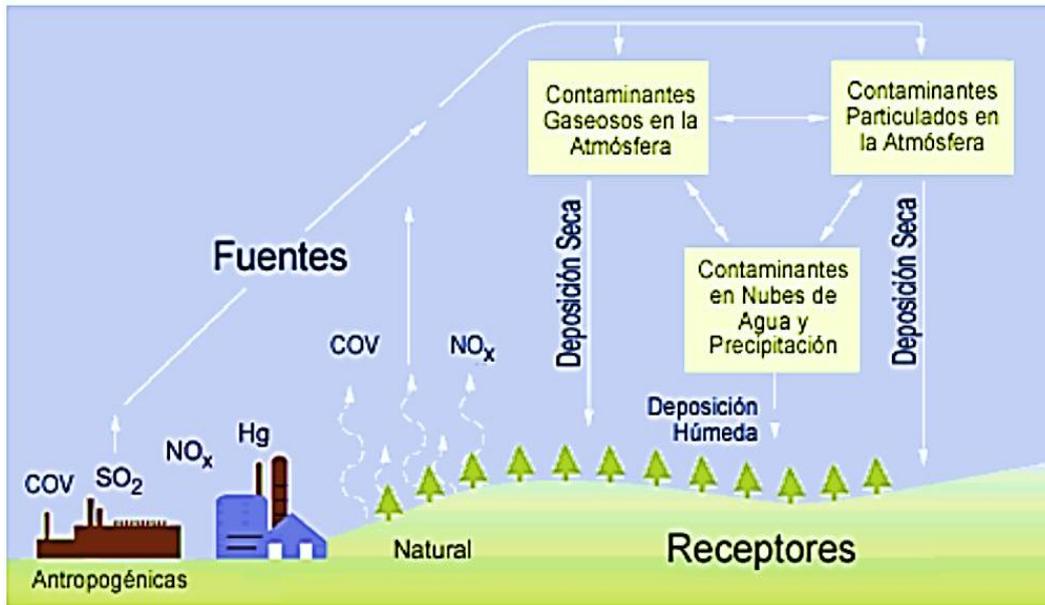
Fuente: (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2017).

#### 1.4.3.1. Lluvia Ácida.

Según Hernández y Ortez (2006), existen dos tipos de lluvia ácida, la provocada por el hombre (antropogénica) y la de origen natural, causado por los gases volcánicos. Los cuales se detallan a continuación:

- a. **La lluvia ácida de origen antropogénica:** Esta es generada básicamente por el desarrollo industrial, la quema de combustibles fósiles o por la quema de vegetación lo cual produce un gas contaminante, el cual viaja a la atmósfera ocasionándole daños irreversibles. Estos aerosoles contaminantes al hacer contacto con el vapor de agua atmosférico regresan como lluvia ácida.
- b. **La lluvia ácida de origen volcánico:** Es la lluvia que posee cantidades intolerables de Ácido Sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) y Ácido Nítrico ( $HNO_3$ ) disueltos en sus gotas de agua. Ambos ácidos se forman al reaccionar el trióxido de azufre ( $SO_3$ ) y el dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) con el agua ( $H_2O$ ). De manera que la

acidez del agua lluvia alcanza significativamente niveles que oscilan entre 3.5 a 5.5 con respecto al pH normal del agua que es aproximadamente 6.5, dando paso a la generación de lluvia ácida como lo esquematiza la figura 1.16.

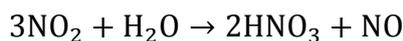
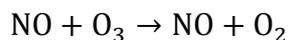
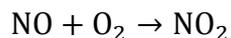
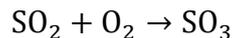


**Figura 1.16.** Generación de Lluvia Ácida Antropogénica.

Fuente: (IDEAM, 2017).

Tanto la lluvia ácida de origen volcánico como la lluvia ácida de procedencia antropogénica, se forman por la secuencia de las siguientes reacciones químicas, donde son los compuestos azufrados y nitrogenados los principales contaminantes.

Lo anterior se expresa en la ecuación 1.2:



**Ecuación 1.2.** Mecanismo de reacción para la formación de ácido sulfúrico y ácido nítrico en la lluvia ácida antropogénica y de origen volcánico.

Fuente: (Hernández y Ortez, 2006).

Entre los daños ocasionados por la deposición ácida en la salud de las personas se encuentran:

- a. Afecta la respiración en especial a niños/as y personas de edad avanzada con enfermedades pulmonares crónicas.
- b. Puede provocar episodios de tos y asfixia.
- c. Crecientes índices de asma crónico y agudo.
- d. Bronquitis aguda y enfisema.
- e. Cambios en el sistema de defensa de los pulmones, lo cual se agudiza en personas con desórdenes cardiovasculares y pulmonares.
- f. Irrita los ojos y los conductos respiratorios, entre otros.

Según las dos vías principales (antropogénica y origen volcánico) por las que se generan los dos precursores más importantes de la lluvia ácida (ácido sulfúrico y ácido nítrico), la clasificación de esta de acuerdo con el pH, se muestra en la tabla 1.6:

**Tabla 1.6.** Clasificación del agua lluvia de acuerdo con el pH.

<b>pH</b>	<b>Clasificación de la lluvia</b>
pH > 5.6	Lluvia no ácida
4.7 < pH < 5.6	Lluvia ligeramente ácida
4.3 < pH < 4.7	Lluvia medianamente ácida
pH ≤ 4.3	Lluvia fuertemente ácida

Fuente: (IDEAM, 2017).

#### **1.4.3.2. Lluvia Ácida en el Área Metropolitana de San Salvador.**

Según el estudio preliminar presentado por Hernández y Ortez (2006), sobre Lluvia Ácida en el Área Metropolitana de San Salvador y alrededores del año 1991, el pH promedio del agua lluvia se reportó de 5.63 (lo cual fue considerado no muy grave).

En forma local en varios puntos del Área Metropolitana de San Salvador y alrededores, se reportaron valores de pH bajos, hasta 4.15, por lo que para 1991 las lluvias ácidas en San Salvador, ocasionalmente estaban precipitando. En la zona industrial de Soyapango resultó ser la de mayor acidez en la lluvia de San Salvador con pH de 4.15.

La zona de mayor contaminación con CO<sub>2</sub> en el agua lluvia fue Ciudad Merliot con un promedio de 3.12 mg/L y el dato promedio anual de 2.64 mg/L. También reportan que la Ciudad de Soyapango presentó el mayor contenido de nitratos con 0.697 mg/L y el valor promedio anual del AMSS de 0.57 mg/L.

#### **1.4.4. Captación o Recolección de Agua Lluvia.**

En el presente apartado se describen generalidades a tener en cuenta para la captación de agua lluvia: su finalidad, contaminantes presentes, cualidades que debe tener el agua lluvia recolectada y componentes de un sistema de recolección (captación) de agua lluvia.

#### **1.4.4.1. Fines de la captación de agua lluvia.**

(Poczatek, 2019)

La captación de agua de lluvia (también conocida como recolección de agua de lluvia) es la contención deliberada de lluvia u otra agua precipitada natural con la intención de una descarga controlada o uso beneficioso en aplicaciones potables o no potables. Los usos del agua de lluvia incluyen beber, cocinar, lavarse las manos, lavar platos, bañarse o cualquier otro propósito que pueda provocar la ingestión de agua o agua que toque la piel.

Las aplicaciones no potables para agua de lluvia incluyen el riego de jardines, el lavado de ropa y la descarga de inodoros. La forma más utilizada de captación de agua de lluvia es la basada en el techo, donde el agua de lluvia se recoge cuando cae en el techo de una casa.

Durante miles de años se ha utilizado la captación de agua lluvia como fuente de agua y en los últimos años ha habido un renovado interés en tal práctica, la razón incluye una mayor conciencia y preocupación por los problemas de calidad del agua, el aumento de los costos del agua de tratamiento centralizado y de pozos privados, así como la eficiencia de los costos asociados con la recolección de agua de lluvia.

#### **1.4.4.2. Contaminantes a considerar previo a la captación.**

(Poczatek, 2019)

El agua lluvia corre el riesgo de recoger contaminantes; el riesgo de contaminación microbiológica ha sido bien estudiado y se ha desarrollado en un estándar para abordar estas preocupaciones previo a la captación y utilización del recurso.

La investigación ha demostrado que, además de los contaminantes microbiológicos, otros contaminantes pueden estar presentes. El agua destinada a aplicaciones

potables requerirá un mayor nivel de tratamiento que el agua de lluvia destinada a aplicaciones no potables.

Los contaminantes que pueden estar presentes en el agua de lluvia incluyen microbiológicos (parásitos, bacterias, virus), metales, químicos orgánicos y escombros. Estos varían en el camino por el cual son recogidos por el agua de lluvia. Las vías principales son la deposición atmosférica, la lixiviación y la erosión de los materiales del techo, la contaminación fecal y la lixiviación de los materiales que se producen a través del sistema de almacenamiento y transporte.

Otros factores que afectan la presencia de contaminantes en el agua de lluvia incluyen las condiciones climáticas, los materiales utilizados en los sistemas de captación, las prácticas de uso del suelo y las características del techo, como los materiales, el diseño, la edad y el estado.

Las áreas urbanas y/o industriales tienden a tener mayor cantidad de metales pesados, contaminación debida a la combustión de combustibles fósiles y otras emisiones, mientras que los sistemas de captación en áreas agrícolas tienden a tener mayores concentraciones de residuos de pesticidas, fertilizantes y otros productos químicos orgánicos. La contaminación microbiana y fecal tiende a ser mayor en los sistemas de captación rural.

#### **A. Contaminantes microbiológicos.**

Los contaminantes microbiológicos pueden incluir tanto organismos patógenos como no patógenos.

- a. **Los organismos no patógenos** no causan enfermedades, pero pueden reducir la calidad estética del agua.
- b. **Los organismos patógenos** causan enfermedades y pueden contaminar el agua de lluvia si la recolección o el almacenamiento del agua de lluvia ha sido contaminada por material fecal.

Los patógenos que se han encontrado en el agua de lluvia recolectada incluyen *Giardia*, *Lambli*a, *Cryptosporidium parvum*, *Toxoplasma gondii*, *Campylobacter spp.*, *Salmonella spp.*, *E. coli*, *Shigella spp.*, *Pseudomonas spp.*, y *Hantavirus spp.*

## **B. Contaminantes químicos.**

Los contaminantes químicos también se pueden encontrar en el agua de lluvia. El agua de lluvia puede contaminarse al absorber los productos químicos en el aire (especialmente en las zonas urbanas); sin embargo, la mayoría de los químicos en el agua de lluvia se recogen durante la recolección y el almacenamiento.

- a. **Los productos químicos orgánicos volátiles** (COV por sus siglas en inglés) se pueden introducir en el agua de lluvia cuando las gotas de lluvia caen a través del aire que contiene gasolina o vapores de solventes, o cuando el agua encuentra materiales que contienen plásticos, pegamentos, solventes, gasolina, grasas y aceites. Esto ocurre cuando los materiales utilizados para construir el sistema de captación y almacenamiento no fueron diseñados para usarse con agua potable.
- b. **Los productos químicos orgánicos sintéticos** (SOC por sus siglas en inglés) son productos químicos que se encuentran en pesticidas, herbicidas y otros productos artificiales. Los SOC se pueden introducir cuando el polvo y las hojas ingresan a un sistema de captación o cuando el agua de lluvia se recolecta cerca de un área agrícola donde ocurre la aplicación de estos químicos.

## **C. Contaminación por metales pesados.**

El agua de lluvia puede recoger metales como plomo, arsénico y cobre. Los óxidos metálicos que pueden estar en el aire en áreas industriales pueden ser absorbidos por el agua de lluvia, pero más comúnmente los metales se introducen cuando el agua de lluvia entra en contacto con soldadura de plomo, tuberías de hierro y cobre y accesorios de latón. Estos metales se pueden recoger de techos metálicos,

sistemas de captación y tanques de almacenamiento. El agua de lluvia es ligeramente ácida y, como resultado, tiende a ser agresiva y corrosiva con estos materiales.

#### **D. Otros tipos de contaminantes.**

Los desechos que se encuentran comúnmente en el agua de lluvia incluyen hojas, ramitas, polvo, tierra, excrementos de pájaros y animales, insectos y otros materiales visibles. Los desechos generalmente se recogen en el agua de lluvia a medida que el agua de lluvia se recoge en el techo, las canaletas, etc. A menudo, los desechos solo reducen la calidad estética del agua, pero los desechos pueden filtrar contaminantes químicos como herbicidas y pesticidas (hojas y polvo), así como parásitos, bacterias y virus (excrementos de aves y animales).

#### **1.4.4.3. Cualidades del Agua Lluvia Recolectada.**

(Cartwright, 2017)

Si bien, los estándares de calidad del agua potable son cada vez más estrictos, el tratamiento del agua de lluvia generalmente requiere menos tecnología que para cualquier otra fuente de aguas residuales. La razón es porque el agua de lluvia es la más pura de todas las fuentes de agua, es naturalmente blanda y está libre de DBP (por sus siglas en inglés, Disinfectant By Product – Sub Productos de la Desinfección, SPD). Cuando se usa para la mayoría de las aplicaciones no potables (como el riego de jardines), requiere poco o ningún tratamiento.

Los atributos del agua de lluvia cosechada (Cartwright, 2017), incluyen:

- a. Es gratis. Los únicos costos de servicios públicos son de recolección y uso.
- b. El agua recolectada se usa cerca de la fuente. Poco costo de distribución.
- c. La recolección reduce los flujos a los desagües de aguas pluviales y reduce la contaminación no puntual.
- d. La recolección reduce la presión de expansión en las plantas municipales de tratamiento de agua.
- e. Los desbordamientos del tanque de recolección pueden recargar los acuíferos.

- f. Aumenta o reemplaza cantidades limitadas de agua subterránea.
- g. Proporciona una alternativa de calidad aceptable si la calidad del agua subterránea es inaceptable.
- h. Proporciona una fuente si las cargas de grifo son demasiado altas para la conexión del suministro de agua.
- i. Reduce la erosión en entornos urbanos.
- j. Fuente de agua que es naturalmente blanda (no necesita ablandadores de agua)
- k. Proporciona agua con pH neutro o ligeramente ácido.
- l. Agua sin sodio, importante para aquellos con dietas bajas en sodio
- m. Agua de calidad aceptable para riego de jardines.
- n. Agua para uso interior no potable.
- o. Agua segura para consumo humano, después del tratamiento adecuado.
- p. Ayuda a los servicios públicos a reducir la demanda máxima de agua en el verano.
- q. Proporciona agua para plantas de refrigeración y aire acondicionado.
- r. Proporciona agua para protección contra incendios.
- s. Ahorra dinero para las facturas de servicios públicos.

La recolección de agua de lluvia también proporciona varios beneficios adicionales: como es suave, no produce acumulación de incrustaciones en calentadores de agua caliente, plomería, grifos y duchas.

El agua de lluvia requiere menos jabón y detergente que la mayoría de los suministros públicos de agua por su suavidad natural. La recolección de agua de lluvia es aplicable no solo para casas, sino para todos los demás edificios y estructuras. Una pulgada de lluvia proporciona 620 galones de agua por cada 1,000 pies cuadrados de área de techo. En el sistema métrico, un centímetro de lluvia en un metro cuadrado de superficie de recolección depositará aproximadamente 10 litros de agua.

Según Cartwright (2017), el hecho de que tanto los tipos como las concentraciones de contaminantes en el agua de lluvia recolectada son menores que los que se encuentran en la mayoría de los suministros de agua subterránea y superficial. Este es un incentivo principal para considerar el agua de lluvia como un recurso para aumentar (o reemplazar) otras fuentes de agua en aplicaciones residenciales, comerciales, industriales y agrícolas.

#### **1.4.4.4. Componentes de un Sistema de Recolección de Agua Lluvia.**

Un sistema de recolección de agua de lluvia se compone de los siguientes componentes (Cartwright, 2017):

- a. Superficie de recolección (generalmente un techo).
- b. Sistema de transporte (canaletas, bajantes y tuberías).
- c. Desviador y filtros 'First Flush' para eliminar la basura del techo.
- d. Tanque de recogida / cisterna.
- e. Sistema de distribución.

Si es necesario, el agua recolectada se trata directamente con tecnologías dictadas por el uso previsto y/o los requisitos reglamentarios y se envía para su uso. Un enfoque opcional es incluir un 'tanque de día' para almacenamiento interno, distribución y composición del agua municipal.

**Superficie de captación:** Este suele ser un techo inclinado o plano. Como el material del techo puede tener un impacto significativo en la calidad del agua de lluvia recolectada. Según Cartwright (2017), los materiales de la superficie de captación pueden ser:

##### **A. Metales:**

- I. El aluminio es el mejor material para techos de metal, ya que es muy inerte y libera solo pequeñas cantidades en el agua recolectada.

- II. Las chapas galvanizadas están disponibles en varias formulaciones de aleaciones, con o sin superficies pintadas.
- III. La chapa de acero, por su pobre resistencia a la intemperie, ya no se usa ampliamente.
- IV. No se recomienda el tapajuntas de plomo y cobre por la posibilidad de que estos metales se filtren al agua.

#### **B. Materiales cerámicos:**

- I. Las baldosas de arcilla son muy inertes; sin embargo, a menos que estén sellados, son porosos y tienden a absorber un porcentaje (hasta un 10 por ciento) del agua de lluvia.
- II. Las baldosas de hormigón tienen características de absorción similares a las de la arcilla, pero tienden a neutralizar el pH ácido de la mayoría del agua de lluvia.
- III. Las baldosas de pizarra son inertes, lisas y densas. Como resultado, son un material para techos apropiado.

#### **C. Materiales compuestos:**

Las tejas de láminas generalmente están basadas en asfalto, a menudo contienen rellenos y cualquier cantidad de materiales potencialmente contaminantes. Esto, más el hecho de que son bastante porosas, las hace generalmente indeseables como superficies de recolección.

##### **1.4.4.5. Diseño de Sistemas de Recolección de Agua Lluvia.**

El diseño de un sistema de recolección de agua de lluvia está influenciado por las siguientes consideraciones (Cartwright, 2017):

- a. Tipo de edificio (residencia, edificio de oficinas, etc.).
- b. Usos previstos del agua (descarga de inodoros, culinarios, etc.).

- c. Regulaciones aplicables.
- d. Clima local.
- e. Situación económica.

La selección y el ensamblaje de los componentes básicos del sistema de recolección de agua de lluvia y posibles componentes adicionales, el grado de automatización y monitoreo, etc., son parte del diseño total del sistema. Las figuras 1.17 y 1.18 son ilustraciones de una gran instalación residencial y una instalación de oficina, respectivamente.



**Figura 1.17.** *Instalación Residencial de un Sistema de Captación de Agua Lluvia.*

*Fuente: (Cartwright, 2017).*

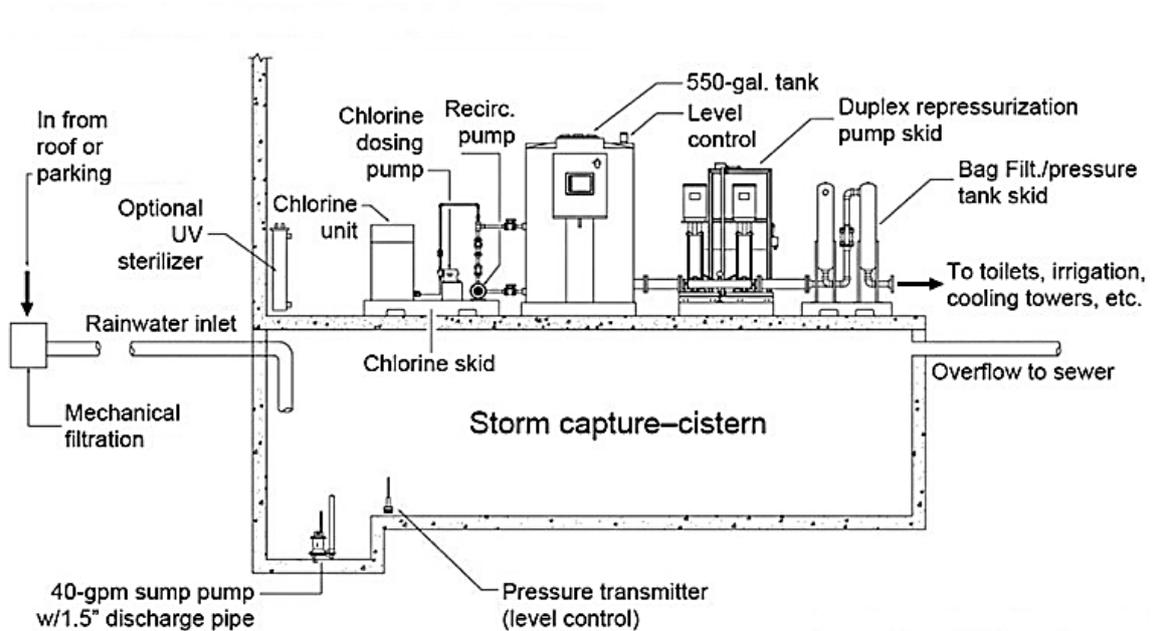


**Figura 1.18.** *Instalación Industrial de un Sistema de Captación de Agua Lluvia.*

*Fuente: (Cartwright, 2017).*

El agua de lluvia que cae sobre superficies a nivel del suelo como estacionamientos, entradas de vehículos, calles, aceras, etc., se puede definir como **agua de tormenta**, la cual es menos limpia que el agua lluvia. También puede incluir aguas de inundación por desbordamiento de ríos o lagos, u otros eventos similares.

Al igual que con la recolección de agua de lluvia, se usa un tanque o cisterna para recoger el agua de tormenta para su tratamiento y uso posterior. Un ejemplo de esto se ilustra en la figura 1.19.



**Figura 1.19.** Sistema de Captación de Agua de Tormenta.

Fuente: (Cartwright, 2017).

## 1.5. Generalidades del agua suave

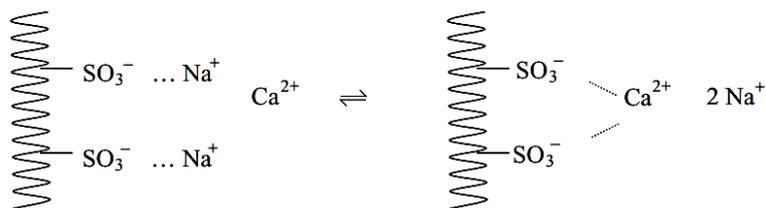
(Pérez y Urrea, 2015)

En contraposición con el agua dura, las aguas blandas o también conocidas como suaves, son aquellas que poseen mínimas cantidades de sales disueltas en el agua.

El ablandamiento del agua (es decir, eliminación de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ) por intercambio catiónico se utiliza en todo el mundo. En este proceso, el agua cruda se pasa a través de un recipiente que contiene perlas de resina de intercambio iónico.

Las resinas están compuestas de un polímero al que se unen grupos funcionales cargados. Los grupos funcionales atraen y unen libremente contra iones de carga opuesta (para garantizar la neutralidad de carga). Los contra-iones se pueden transferir de la resina a la solución, a cambio de otros tipos de iones, es decir, los iones pueden intercambiarse.

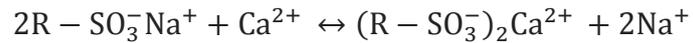
En suavizantes domésticos, por ejemplo, el polímero en la resina ha cargado grupos funcionales  $-\text{SO}_3^-$ . Los cationes se sienten atraídos por el grupo negativo  $-\text{SO}_3^-$  para neutralizar carga eléctrica. La eliminación de calcio del agua dura se produce por la reacción química de intercambio iónico, la cual se presenta en la figura 1.20:



**Figura 1.20.** Eliminación de Calcio del Agua Dura.

Fuente: (Pérez y Urrea, 2015).

La reacción anterior se desplaza hacia la derecha mientras pasa agua dura a través de la columna de intercambio iónico y los iones de calcio y magnesio en solución se reemplazan con sodio. La reacción se desplaza hacia la derecha porque la resina tiene una afinidad inherente por el calcio y el magnesio, en referencia al sodio. Hay que tener en cuenta que la unión de un divalente ion calcio a la resina requiere la eliminación de dos iones monovalentes de sodio de la resina (para preservar la neutralidad de la carga eléctrica). Para facilitar la notación, reemplazamos el polímero representado con "R" y la reacción química se reescribe como se muestra en la ecuación 1.3:

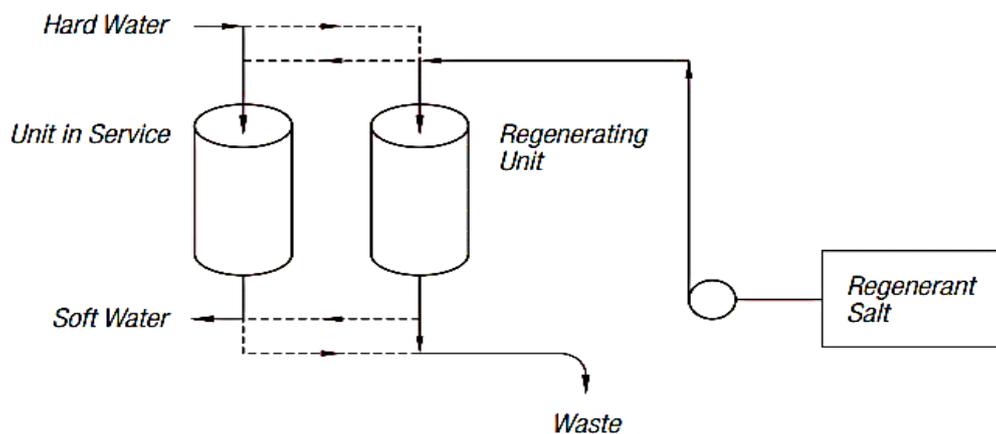


**Ecuación 1.3.** Reacción de eliminación del Calcio del Agua Dura. Intercambio de iones calcio y sodio.

Fuente: (Pérez y Urrea, 2015).

Cuando un volumen adecuado de agua dura ha atravesado la cama de resina de intercambio iónico, las perlas se saturarán con calcio y magnesio; el agua que pase a través de la resina no será ablandado en ese momento la columna se regenera pasando una fuerte solución de cloruro de sodio a través del suavizador.

El exceso de sodio desplaza la ecuación de intercambio iónico a la izquierda, y la resina de intercambio iónico en la columna se recarga con sodio. Las cantidades excesivas de sodio son requeridas para recargar la resina para superar la afinidad inherente para el calcio y magnesio. Un circuito de ablandamiento industrial típico se diseñará con dos columnas de intercambio catiónico separadas, de modo que una unidad pueda estar en línea mientras el otro se está regenerando, como se muestra en la figura 1.21:



**Figura 1.21.** Esquema de un aparato industrial típico para ablandar el agua.  
Fuente: (Pérez y Urrea, 2015).

### **1.5.1. Operación y tipos de suavizadores de agua.**

El diseño de los ablandadores de agua ha evolucionado a lo largo de los años y varios tipos de unidades están disponibles comercialmente. Todos los suavizantes comerciales confían en los mismos elementos clave: una resina de intercambio catiónico dentro de un recipiente a presión junto con una fuente de sal regenerante. Sin embargo, hay muchas diferencias en la naturaleza del sistema de salmuera y el ciclo de regeneración.

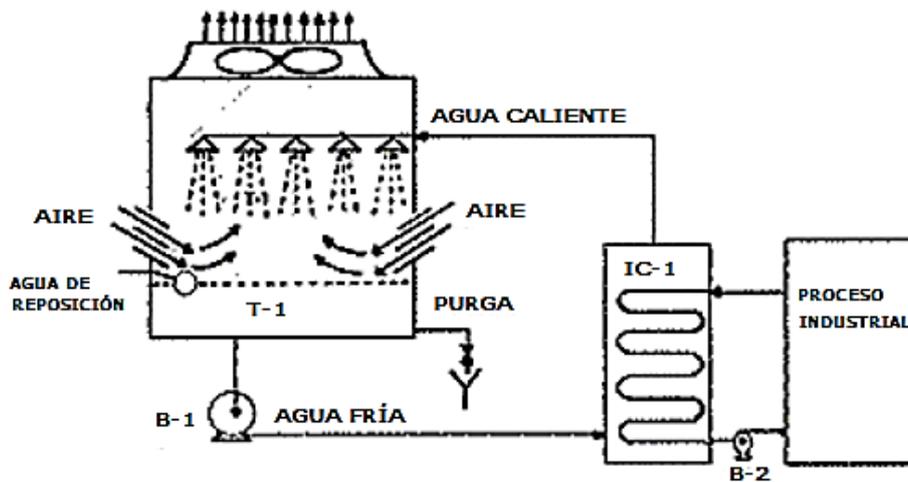
### **1.5.2. Métodos históricos de regeneración.**

Algunos de los primeros ablandadores de agua utilizaron un método simple de regeneración en la que simplemente se vierte sal fina sobre el ion intercambio de resina. El flujo de agua disuelve la sal fina y una gota de la solución de salmuera fuerte fluye a través de las perlas de resina, regenerando la resina en el proceso.

Los métodos posteriores de regeneración incluyen un tanque para el almacenamiento de sal y generación de salmuera que es transferida al lecho de intercambio iónico por presión. Tales sistemas logran la regeneración con salmuera completa.

### **1.6. Ciclos de concentración en agua de enfriamiento.**

Al recircular el agua de una torre, para su enfriamiento, parte de ella sufre una “evaporación flash” al pasar por la torre, cuando esta tiene contacto con el aire de enfriamiento, reduciendo la cantidad de agua misma, así también, concentrando los sólidos encontrados en solución. Este efecto, al realizar una vuelta en el sistema de la torre es llamado ciclo de concentración. En la figura 1.22 se puede ilustrar el proceso de enfriamiento.



**Figura 1.22.** Diagrama del proceso de enfriamiento de una torre.  
Fuente: (Arenas, 2015).

El agua circula a través de los intercambiadores del proceso de condensación y sobre la torre de refrigeración, a un caudal conocido como el caudal de recirculación. El agua se pierde del sistema a través de la evaporación y de la purga. A efectos de cálculo, la purga se define como todas las pérdidas de agua que no haya sido por medio de la evaporación (efecto del viento, la deriva y fugas). Para que no se pierda el volumen de agua, es añadida agua nueva al sistema para reemplazar la evaporación y purga.

A medida que se evapora el agua, los minerales se quedan en el agua de circulación, por lo que es más concentrada que el agua de reposición. Tener en cuenta que la purga tiene la misma composición química como agua circulante. “Ciclos de concentración” (o ciclos) son una comparación del nivel de sólidos disueltos de la purga con el agua de reposición. A los 3 ciclos de concentración de purga tiene tres veces la concentración de sólidos de la composición.

Los ciclos pueden calcularse por la comparación de las concentraciones de un componente soluble en los flujos del agua nueva y de la purga. Puesto que la sílice se mantiene en concentraciones constantes, es una opción aceptable para la medición.

Sin embargo, los resultados de los cálculos pueden tener una leve variación, si existe la alimentación de cloro o ácido sulfúrico al sistema como parte de un programa de tratamiento de agua.

Los ciclos basados en la conductividad se utilizan a menudo como una manera fácil de automatizar la purga a los 3 ciclos de concentración, ya que esto demuestra que se tiene tres veces la concentración de sólidos (Arenas, 2015).

El concepto de ciclos de concentración se define como el cociente entre el número de sólidos disueltos en el agua de recirculación y el número de sólidos disueltos en el agua de aportación, como se muestra en la ecuación 1.4:

$$C_C = \frac{C_{SAR}}{C_{SAT}}$$

**Ecuación 1.4.** Cálculo de los Ciclos de concentración de una torre de enfriamiento.  
Fuente: (IDAE, 2007).

Donde:

- i.  $C_C$ : Ciclos de concentración.
- ii.  $C_{SAR}$ : Concentración de sólidos en el agua de recirculación.
- iii.  $C_{SAT}$ : Concentración de sólidos en el agua de aportación a la torre.

En otras palabras, representa cuántas veces la cantidad de sólidos disueltos en el agua de aportación puede estar contenida en el agua de recirculación.

Por ejemplo: si un determinado equipo puede funcionar con una concentración máxima recomendada de cloruros de 150 ppm (mg/L) y el análisis del agua de aporte indica que contiene 50 ppm de cloruros, los ciclos de concentración a los que se tendrá que trabajar serán:

$$C_C = \frac{150 \text{ ppm}}{50 \text{ ppm}} = 3$$

Lo que significa que el agua de la torre tendría 3 veces más cloruros que el agua de aportación (IDAE, 2007).

### **1.6.1. Factores limitantes de los ciclos de concentración**

Según Arenas (2015), los factores limitantes de los ciclos de concentración son:

#### **A. Limitaciones Físicas:**

Hay un límite para el número de ciclos alcanzables en una torre de refrigeración. Pérdidas de hasta el 0.2 % de la tasa de recirculación en torres de categoría antigua, puede limitar los ciclos de 5-10.

Las pérdidas adicionales, consecuencia de las fugas y resistencia al viento pueden limitar aún más algunos sistemas viejos. Las nuevas torres, a menudo llevan garantías de un 0.02 % de pérdidas. Sistemas de nueva construcción, que utilizan torres con separadores de gotas de alta eficiencia, pueden ser mecánicamente capaces de alcanzar 50 a 100 ciclos o más.

#### **B. Limitaciones Químicas:**

A medida que los sólidos disueltos del agua aumentan, la tendencia a la corrosión y deposición aumentan directamente. La corrosión se da por una reacción electroquímica: a mayor conductividad por los sólidos disueltos, aumenta la velocidad de corrosión. Cuando existe, en el agua de la torre, una conductividad muy alta, se hace progresivamente más difícil y costoso inhibir la corrosión, cuando los enfoques de conductancia específicas exceden a los 10,000  $\mu$ Mohs.

La mayoría de las sales tienden a cambiar su solubilidad al cambiar la temperatura; es decir, que son menos solubles a temperaturas más altas y por lo tanto, tienden a formar depósitos en los tubos del intercambiador de calor. Muchas sales también son menos solubles a pH más alto. Como el agua de torre de refrigeración se concentra y a su vez aumenta su pH, la tendencia a precipitar sales aumenta de escala.

Puesto que el carbonato de calcio es una de las sales menos solubles, es una escala común de medición de los ciclos de concentración en sistemas de refrigeración de recirculación abierta. El calcio, silicato de magnesio, sulfato de calcio y otros tipos de sales de formación, son una escala también de medir.

Comúnmente es utilizada la medición de sales de sílice, por su constante concentración en pozos y por la peligrosidad de esta sal al provocar incrustaciones, en concentraciones mayores de 150 ppm.

Las incrustaciones de las sales antes mencionadas se pueden predecir cualitativamente por el índice de saturación de Langelier.

### **1.6.2. ¿Por qué ciclos de concentración?**

(IDAE, 2007)

Una pregunta común es, ¿Porque se utilizan tratamientos químicos para operar a ciclos elevados cuando frecuentemente no hay precipitación cuando se opera a ciclos bajos? La mejor respuesta es que a ciclos elevados, se reducen significativamente los requerimientos de reposición y purga, reduciendo los costos de agua fresca y de disposición del drenaje. En materia de corrosión, incrementar los ciclos de modo de que el agua sea menos corrosiva, es una forma barata de mejorar el control de la corrosión.

Otro punto es que la operación a ciclos altos, permite la utilización de inhibidores de corrosión que son demasiado costosos para ser empleados a ciclos con elevada purga. En algunas oportunidades, los niveles de sales disueltas son tan elevados, que los inhibidores de incrustación deben ser utilizados simplemente para poder emplear el agua para enfriamiento. En esos casos incrementar los ciclos reduce el costo del inhibidor de incrustaciones al punto en el que se convierte económicamente viables. Se encuentra que la operación de las torres de enfriamiento entre 3 y 6 ciclos, es el rango más económico. Otras causas que obligan la operación de torres a ciclos más altos son los requerimientos ambientales y la escasez de agua fresca para reposición.

### **1.6.3. Conductividad del agua y ciclos de concentración.**

(Pérez y Urrea, 2015)

La conductividad del agua aumenta en función de la concentración de sólidos disueltos (al aumentar la concentración de sólidos, aumenta la conductividad). La cantidad máxima admisible de sólidos disueltos en el agua de recirculación, es decir, el agua que está en contacto permanente con el equipo de enfriamiento evaporativo (y con el circuito del sistema al que sirve, en el caso de torres de circuito abierto) viene fijado, como se ha dicho, por la recomendación del fabricante del equipo en función de sus características constructivas y por el proyectista en función de las temperaturas y de los materiales del sistema que estarán en contacto con el agua de la torre, prevaleciendo el más exigente de los dos (el que prescriba menor cantidad).

Los sólidos disueltos que llegan con el agua de aportación irán decantándose o reaccionando químicamente al contacto con los materiales, el aire y las bacterias que encuentre en el equipo. Pero además y de manera más rápida se irán concentrando al quedar separados del agua que se evapora, de manera que su concentración tiende a aumentar progresivamente hasta extremos que resultan muy agresivos sobre los materiales o se depositan sobre ellos en forma de incrustación o de sedimento, más o menos difíciles de eliminar según sean sus características y composición.

Los sedimentos ofrecen abrigo y a veces nutrientes a protozoos y bacterias, resguardándolas de la acción de los biocidas; incluso según los casos, reaccionando con los propios biocidas y restándoles o anulando eficacia.

En cuanto a las incrustaciones, obstruyen el paso entre los rellenos o recubren con una capa aislante térmica a los tubos de los serpentines, según sea el equipo; rellenan los álabes o las hélices de los ventiladores, obstruyen los rociadores, agarrotan y dificultan el movimiento de los dispositivos de llenado (válvulas de flotador o electromagnéticas); y dan como resultado una notable pérdida de eficiencia y un funcionamiento anómalo del equipo.

#### **1.6.4. Reposición y purga de agua de torres de enfriamiento.**

(Pérez y Urrea, 2015)

La reposición normal del agua evaporada no soluciona el problema de las deposiciones de sales o el crecimiento microbiológico en la torre y superficies de transferencia de calor, sino que lo agrava al aportar nuevas cantidades de sólidos disueltos. El problema se soluciona mediante una adecuada purga o sangrado del agua de la balsa.

Este proceso retira agua con un alto índice de concentración, y provoca la entrada de mucha más agua “fresca” de aporte que la que se evapora, de manera que los sólidos concentrados se diluyan y baje su concentración. Naturalmente, si esto se realiza desde el inicio del funcionamiento se evita el exceso de sólidos en el agua y se mantiene una concentración adecuada.

La purga o sangrado se puede realizar de una manera rudimentaria regulando manualmente la válvula de purga que suele proveer el fabricante del equipo, o elevando el nivel de agua de la balsa para provocar un rebose continuado. Este sistema no es del todo eficiente porque las tasas de evaporación no son constantes, dependen de la carga térmica del sistema y de las condiciones meteorológicas. Más aún, no es correcto, porque puede resultar insuficiente o excesivo, provocando la pérdida incontrolada de biocidas y otros productos de tratamiento caros y necesarios.

La dosificación adecuada de la purga se puede realizar mediante la medida de la conductividad del agua, que normalmente aumenta cuando lo hace la concentración de sólidos disueltos. Ese control transmite sus señales a una válvula electromagnética que da paso al agua de purga.

Esta válvula tiene muchas posibilidades (que se dan con frecuencia en la práctica) de quedar obstruidas o agarradas, por lo que se ha de tener la precaución de dotarla de un filtro adecuado y de una válvula manual anterior (aguas arriba) que permita

su desmontaje frecuente para limpieza y revisión, siendo conveniente un dispositivo de bypass para mantener un servicio automático o manual durante las revisiones o reparaciones.

En el caso de torres de circuito abierto la conexión de purga debe hacerse desde la tubería de llegada de agua caliente a la torre. De hecho, hay fabricantes que incluyen una adecuada toma en la conexión de entrada de agua a la torre, con un circuito que la conecta al rebosadero de la propia torre intercalando una válvula manual.

En el caso de los condensadores y torres de circuito cerrado, la toma de la purga suele llegar realizada de fábrica, conectada a la impulsión de la bomba recirculadora y llevada hasta el rebosadero con la correspondiente válvula manual intercalada, en ocasiones con tramos transparentes que permitan ver el flujo de agua, lo que durante un corto periodo de tiempo permitiría una rudimentaria regulación, si no se produjera ensuciamiento interior que anulara la transparencia. En ambos casos, tal dispositivo debería tomarse como recordatorio de la necesidad de establecer la purga. A partir de ahí se debe proceder a la automatización anteriormente descrita.

### **1.7. Índices de estabilidad del agua**

(Moreno, 2011)

Los índices de estabilidad del agua son indicadores que dan, con suficiente aproximación, la tendencia al depósito del carbonato cálcico o a su disolución, evaluando el estado de equilibrio del agua en relación con su carácter incrustante o agresivo.

El principal objetivo en la utilización de los índices de estabilidad es ajustar las aguas de refrigeración a condiciones no incrustantes. Los índices más generalizados son los de Langelier y de Ryznar, aunque existen otros índices, algunos de ellos adaptados a ciertas condiciones específicas.

### 1.7.1. Índice de saturación de Langelier

(Pauta y Quezada, 2017)

El índice de saturación de Langelier ( $L$ ) es un modelo de estabilidad que deriva del concepto del equilibrio de solubilidad o saturación de sales poco solubles, y que proporcionan un indicador fiable del grado de saturación del agua con respecto al carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ).

El  $L$  correlaciona la solubilidad de las sales poco solubles con el pH como variable principal. El  $L$  se puede interpretar como el cambio necesario de pH requerido para llevar el agua a su estado de equilibrio.

Así, por ejemplo, el agua con un  $L$  de 1,0 es agua cuyo pH de saturación se halla una unidad de pH por encima de su pH de equilibrio; esto significa que la reducción de su pH en una unidad llevaría esta masa de agua nuevamente a su condición de equilibrio y la haría, por lo tanto, no corrosiva ni incrustante.

Es decir, este índice es indicativo del grado de inestabilidad del agua con respecto al depósito de solubilidad del carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Langelier consideró que este índice es sólo una relación cualitativa de la agresividad del agua y que su valor no ayuda para juzgar sobre su actividad real, ya que un valor mayor del índice de Langelier no coincide necesariamente con una mayor agresividad del agua.

Dos muestras de agua con la misma agresividad, pueden tener diferente índice de saturación, también puede existir el caso que dos muestras de agua con el mismo índice de saturación puedan tener agresividad diferente.

El Índice de Langelier fue desarrollado por Dr. Wilfred Langelier a principio del siglo XX. Tenía la firme intención de conocer el motor de la floculación y precipitación de la sal en el agua, o en el caso contrario conocer cuando estas sales se disolvían. El estudio arrojó luz sobre el funcionamiento de la corrosión y de la sedimentación a causa de los solutos en el agua. La ecuación finalmente necesitó

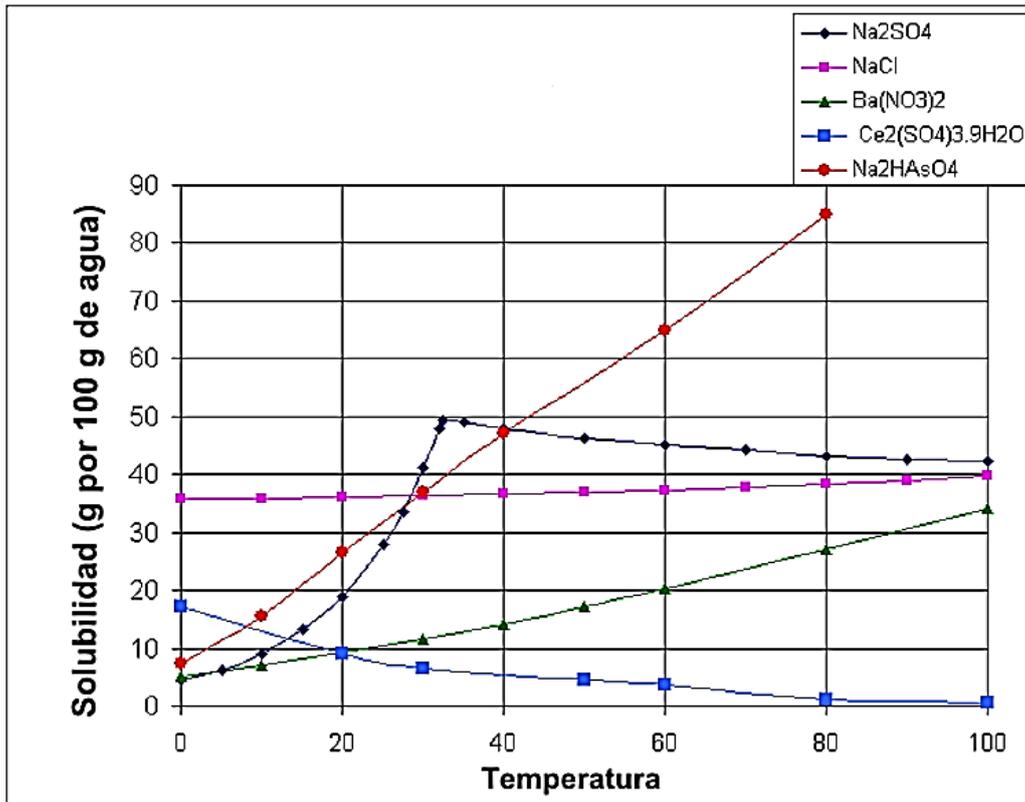
de las siguientes variables fisicoquímicas del agua para calcular el Índice de Saturación de Langelier ( $L$ ):

- A. pH:** Es la representación numérica de la cantidad de iones de hidrógeno en una disolución y colabora muy activamente en la solución o precipitación de los elementos disueltos en el agua. El hidrógeno es un elemento muy reactivo que puede modificar los compuestos presentes en el agua haciéndolos más o menos solubles. El Índice de Saturación de Langelier resume en un valor el riesgo de obstrucción o corrosión. En la figura 1.23 se ilustra una tubería de hierro oxidada por la corrosión del agua.



**Figura 1.23.** Tubería de hierro oxidada por la corrosión del agua.  
Fuente: (Delrey, 2019).

- B. Temperatura:** Afecta a la capacidad de que un compuesto quede disuelto en el agua o que en su lugar precipite. Cada sal actúa de forma distinta respecto a otra. Algunas son más solubles conforme aumenta la temperatura. Otras aumentan la solubilidad con la bajada de temperatura. También existen las sales que mantienen su solubilidad independientemente de la temperatura. La figura 1.24 muestra la relación solubilidad – temperatura para distintas sales en agua.



**Figura 1.24.** Diagrama de solubilidad de distintas sales en función de la temperatura.  
Fuente: (Delrey, 2019).

**C. Dureza cálcica:** Se representa por ppm o mg/L de Carbonato cálcico (CaCO<sub>3</sub>). Indica la concentración de calcio y magnesio presente en el agua. Estos son los elementos más propensos a la formación de obstrucciones en tuberías. Su solubilidad depende de los factores que contempla el Índice de Langelier.

**D. Alcalinidad:** A veces se confunde con el concepto de pH alcalino, pero no tiene una relación tan directa. La alcalinidad se define como la cantidad de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos que tiene el agua disuelta. Las aguas con estos solutos generalmente tienen un pH básico o alcalino además de proveer un pH muy estable. El agua con alcalinidad baja facilita la corrosión de los materiales por donde ésta fluya como pueden ser metales o rocas y provoca un pH con poca estabilidad. Y si la alcalinidad es alta se incrementa el riesgo de padecer incrustaciones.

**E. Sólidos Disueltos Totales (TDS):** Esta medida representa a todos los solutos, flóculos o cualquier tipo de material que quedará de forma residual al hacer evaporar el agua. El peligro de la obstrucción es que tiene como consecuencia que taponan la tubería lentamente hasta dañar toda una red de riego.

La ecuación del Índice de Saturación de Langelier se calcula en base a factores relacionados con cada una de las variables, como se muestra en la tabla 1.7 y en las ecuaciones 1.5 y 1.6. Los valores intermedios se obtienen a través de una interpolación lineal simple.

**Tabla 1.7.** Factores relacionados con las variables fisicoquímicas del Índice de Saturación de Langelier (L).

<b>DATOS PARA EL CÁLCULO RÁPIDO DEL ÍNDICE DE SATURACIÓN</b>							
<b>Índice de saturación = <math>pH_{(real)} - (9.3 + A + B) + (C + D)</math></b>							
<b>A</b>		<b>B</b>		<b>C</b>		<b>D</b>	
Sólidos totales mg/L	Valor de A	T del agua °C	Valor de B	Dureza de calcio mg/L	Valor de C	Alcalinidad mg/L	Valor de D
50-300	0.1	0-1	2.6	10-11	0.6	10-11	1.0
400-1000	0.2	2-6	2.5	12-13	0.7	12-13	1.1
		7-9	2.4	14-17	0.8	14-17	1.2
		10-13	2.3	18-22	0.9	18-22	1.3
		14-17	2.2	23-27	1.0	23-27	1.4
		18-21	2.1	28-34	1.1	28-34	1.5
		22-27	2.0	35-43	1.2	35-43	1.6
		28-31	1.9	44-55	1.3	44-55	1.7
		32-37	1.8	56-69	1.4	56-69	1.8
		38-43	1.7	70-87	1.5	70-87	1.9
		44-50	1.6	88-110	1.6	88-110	2.0
		51-56	1.5	111-138	1.7	111-138	2.1
		57-63	1.4	139-174	1.8	139-174	2.2
		64-71	1.3	175-220	1.9	175-220	2.3
		72-81	1.2	230-270	2.0	230-270	2.4
				280-340	2.1	280-340	2.5
				350-430	2.2	350-430	2.6
				440-550	2.3	440-550	2.7
				560-690	2.4	560-690	2.8
				700-870	2.5	700-870	2.9
				880-1000	2.6	880-1000	3.0

(Basado en las fórmulas de Langelier, residuos de Larson-Buswell, ajustes de temperatura y dispuestos por Eskel Nordell).

Fuente: (Marley, 2009).

La ecuación 1.5 muestra el cálculo del Índice de Saturación de Langelier ( $L$ ):

$$L = \text{pH}_{(\text{real})} - \text{pH}_s$$

**Ecuación 1.5.** Definición del Índice de Saturación de Langelier ( $L$ ).

Fuente: (Pauta y Quezada, 2017).

O bien, expresada en función de factores relacionados a los parámetros fisicoquímicos, como se muestra en la ecuación 1.6:

$$L = \text{pH}_{(\text{real})} - (9.3 + A + B) + (C + D)$$

**Ecuación 1.6.** Ecuación para el cálculo de  $L$  en función de factores relacionados.

Fuente: (Pauta y Quezada, 2017).

La simbología de las ecuaciones 1.5 y 1.6 es la siguiente:

- a.  $\text{pH}_s$  es el pH de saturación del sistema.
- b. El  $\text{pH}_{\text{real}}$  se refiere al pH del sistema de enfriamiento (torre).
- c.  $A$  es la constante del efecto de la conductividad.
- d.  $B$  es la constante del efecto de la temperatura.
- e.  $C$  es la constante del efecto de la dureza.
- f.  $D$  es la constante de la alcalinidad.

Dependiendo del valor, el Índice de Saturación de Langelier puede ser positivo, negativo o neutro. En la tabla 1.8 se presenta la interpretación del índice de saturación de Langelier.

**Tabla 1.8.** Interpretación del Índice de Saturación de Langelier.

Valor de $L$	Interpretación
$L < 0$	El agua será corrosiva. Este tipo de agua tiene potencial para disolver los materiales de su cauce. El carbonato de calcio tiende a disolverse
$L = 0$	Es un agua equilibrada que respeta la forma físico-química de los materiales de su cauce. Sin equilibrio de saturación, sin costras.

Continúa...

**Tabla 1.8** Interpretación del Índice de Saturación de Langelier. (Continuación).

Valor de $L$	Interpretación
$L > 0$	El agua es incrustante. Este tipo de agua está saturada de elementos y durante su cauce intentara disminuir su concentración dejando en el transcurso de su cauce los materiales que tenga en saturación. El carbonato de calcio tiende a depositarse.

Fuente: (Pauta y Quezada, 2017).

También se puede resumir la indicación anterior de los valores numéricos del Índice de Saturación de Langelier como se muestra en la tabla 1.9 para varios rangos numéricos:

**Tabla 1.9.** Clasificación del Índice de Saturación de Langelier según su valor.

Rango de valores para $L$	Indicación
$L \leq -5.0$	Corrosión severa.
$-5.0 < L < -4.0$	Corrosión fuerte.
$-2.0 < L < -0.5$	Corrosión significativa.
$-0.5 < L < 0.0$	Ligeramente corrosiva pero sin formación de incrustaciones.
$L = 0$	Equilibrada pero posible corrosión por picadura.
$0.0 < L < 0.5$	Ligeramente incrustante y corrosivo.
$0.5 < L < 2.0$	Moderada formación de incrustaciones pero no corrosiva.
$2.0 < L < 4.0$	Formación media de incrustaciones.
$L \geq 4.0$	Formación severa de incrustaciones.

Fuente: (Pauta y Quezada, 2017).

Entonces se puede afirmar que:

- Si el  $L$  es bajo (“agua blanda”) el agua que recircula disuelve los carbonatos y bicarbonatos (fundamentalmente de calcio y magnesio) evitando que se

forme en las superficies de intercambio una placa calcárea contra la corrosión.

Esta agua es agresiva para estas superficies promoviendo la corrosión ya que no existe costra calcárea que pueda pasivarla.

- b. Si el  $L$  es alto (“agua dura”) los carbonatos precipitarán sobre las superficies aumentando el coeficiente de ensuciamiento, obstruyendo aspersores y favoreciendo la proliferación de microorganismos (Minguito, 2015).

El Índice de Langelier resulta útil como:

- a. Un control durante el proceso de desacidificación del agua. Si el agua es agresiva por desacidificación, se puede llevar a su estabilización los valores de pH, alcalinidad y contenido de  $\text{Ca}^{2+}$ .
- b. Para calcular el pH que tendrá el agua agresiva al estabilizarse. El exceso de  $\text{CO}_2$  se elimina por el proceso de aireación.
- c. Para evaluar cualitativamente al agua, es decir, definir si es agresiva, está en equilibrio o es incrustante (Pauta y Quezada, 2017).

En la tabla 1.10 se muestra un detalle de los límites preferidos de las variables fisicoquímicas de interés expuestas en este trabajo, así como otras adicionales (pero no menos importantes) y del Índice de Saturación de Langelier para el modelo de torre de enfriamiento Marley Clase W400:

**Tabla 1.10.** Límites para las condiciones del agua de la torre de enfriamiento modelo Marley Clase W400.

<b>LÍMITES PREFERIDOS PARA LAS CONDICIONES DEL AGUA DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO PARA MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN ESTÁNDAR</b>	
pH	De 6.5 a 9.0
Temperatura máxima del agua	48.9 °C
Índice de saturación de Langelier	De 0.0 a 1.0
M-Alcalinidad	De 100 a 500 mg/L como CaCO <sub>3</sub>
Sílice	150 mg/L como SiO <sub>2</sub>
Hierro	3 mg/L
Manganeso	0.1 mg/L
Aceite y grasa	10 mg/L para torres con surtidores por salpicadura. Ninguno permitido para las torres con surtidor de película.
Sulfuros	1 mg/L
Amoniaco	50 mg/L si están presentes aleaciones de cobre
Cloro	1 mg/L de residuales libres intermitentemente (choque), o 0.4 mg/L de modo continuo
Solventes orgánicos	Ninguno permitido
Sólidos totales disueltos	Más de 5000 mg/L pueden afectar la eficiencia térmica e ir en detrimento de la madera en ciertas áreas de la torre
Cationes:	
Calcio	800 mg/L como CaCO <sub>3</sub>
Magnesio	Depende del pH y del nivel de silicio
Sodio	Sin límite
Aniones:	
Cloruros	750 mg/L como NaCl, 455 mg/L como Cl <sup>-</sup>
Sulfatos	800 mg/L como CaCO <sub>3</sub>
Nitratos	300 mg/L (nutrientes para bacterias)
Carbonatos/Bicarbonatos	300 mg/L como CaCO <sub>3</sub> máximo para la madera
Biológico/Bacterias	
Surtidores tipo película:	Conteo de placas de bacterias aeróbicas:
MC75	Menos de 10,000 UFC/mL
MCR 12/16	Menos de 1,000,000 UFC/mL cuando TSS<25 mg/L y menos de 100,000 UFC/mL cuando TSS>25 mg/L
Sólidos totales en suspensión.	
Surtidor tipo película:	Menos de 25 mg/L como valor preferido; el conteo de placas de bacterias es particularmente importante si el TSS está por encima de 25 mg/L
Surtidor tipo salpicadura:	Sin límite específico
Sólidos varios:	Para surtidores por película, evite la contaminación con fibras, grasas, sebo o alquitrán

Continúa...

**Tabla 1.10.** Límites para las condiciones del agua de la torre de enfriamiento modelo Marley Clase W400. (Continuación).

<b>LÍMITES PREFERIDOS PARA LAS CONDICIONES DEL AGUA DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO PARA MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN ESTÁNDAR</b>	
Otros nutrientes	Para surtidores por película, evite las grasas, los glicoles, los alcoholes, los azúcares y los fosfatos
REGLA GENERAL:	Los surtidores de tipo película no deben usarse para ciertas aplicaciones en plantas de acero, plantas de elaboración de papel o en operaciones de procesamiento de alimentos

Fuente: (Marley, 2009).

### 1.7.2. Índice de estabilidad de Ryznar.

(Pauta y Quezada, 2017)

El Índice de Estabilidad de Ryznar ( $R$ ) es una modificación al Índice de Saturación de Langelier ( $L$ ) para proporcionar una mejor indicación en la tendencia a la formación de incrustaciones de carbonato de calcio. Es más exacto que el Índice de Saturación de Langelier y muestra hasta qué grado el agua forma carbonato de calcio bajo condiciones establecidas.

Es un método empírico para predecir las tendencias de escala de agua basada en el estudio de los resultados operativos con muestras de agua a diferentes índices de saturación entre ellas. El índice de Ryznar es otro indicador de la saturación del agua, es decir, también considera el valor del pH de saturación de la misma.

El  $R$  toma como base los mismos parámetros que  $L$ , pero siempre da un valor positivo, el cual provee una idea del nivel corrosivo o incrustante del agua. Ryznar detectó que aguas de baja dureza y alta dureza pudieran tener ( $L$ ) similares. Por ello, modificó la formula tal como se muestra en la ecuación 1.7:

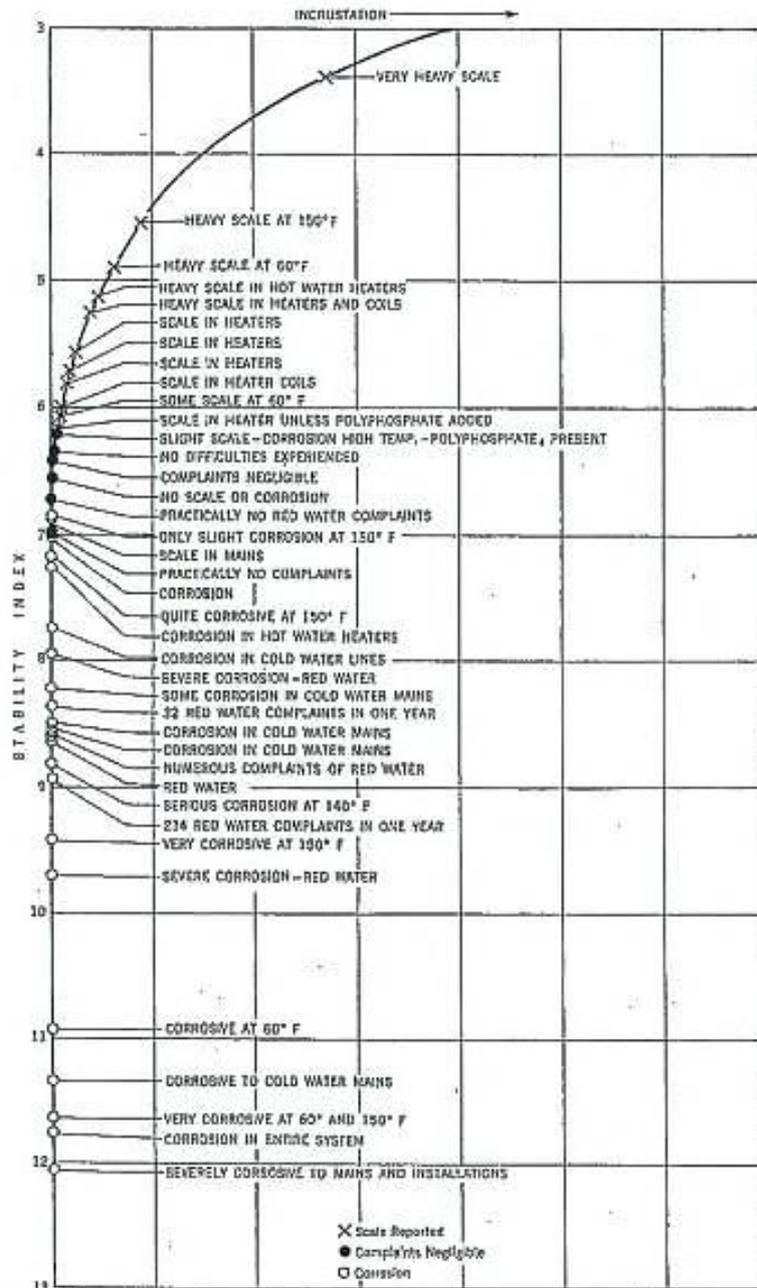
$$R = 2pH_s - pH_{real}$$

**Ecuación 1.7.** Definición del Índice de estabilidad de Ryznar

Fuente: (Pauta y Quezada, 2017).

El  $pH_{real}$  de la ecuación 1.7 se refiere al  $pH$  del sistema de enfriamiento,  $pH_s$  al  $pH$  de saturación y  $R$  al Índice de Estabilidad de Ryznar

En la figura 1.25 se muestra cómo se comporta la tendencia del agua en el interior de un sistema de enfriamiento del Índice de Ryznar.



**Figura 1.25.** Tendencias de formación de incrustaciones por dureza cálcica del agua según Índice de Ryznar.  
Fuente: (Delrey, 2019).

De manera análoga se puede conocer el comportamiento del agua con la indicación de los valores numéricos del Índice de Estabilidad de Ryznar por medio de los siguientes rangos numéricos mostrados en la tabla 1.11:

**Tabla 1.11.** Clasificación del Índice de Estabilidad de Ryznar según su valor.

Rango de Valores	Tendencia del agua
$4.0 \leq R < 5.0$	Muy incrustante
$5.0 \leq R < 6.0$	Débil incrustación
$6.0 \leq R < 6.5$	Débil incrustación y corrosión
$6.5 \leq R < 7.5$	Corrosiva
$7.5 \leq R \leq 9.0$	Fuertemente corrosiva

Fuente: (Jimeno y Olmos, 1999).

O de manera general:

- i.  $R < 6.0$ , el agua es incrustante;
- ii.  $R > 6.0$ , no hay tendencia de incrustación.

También con valores de los Índices de Saturación de Langelier  $L$  y el Índice de Estabilidad de Ryznar  $R$ , se puede clasificar de la siguiente manera, según su valor numérico, como se muestra en la tabla 1.12 para  $R$ :

**Tabla 1.12.** Clasificación del agua según el valor del Índice de Estabilidad de Ryznar.

Valor del Índice	Comportamiento del agua.
$R \leq 6.0$	Sobresaturados, tienden a precipitar $\text{CaCO}_3$ . El agua es incrustante.
$6.0 < R < 7.0$	Saturado, el $\text{CaCO}_3$ está en equilibrio. La formación de carbonato de calcio no conduce a una película inhibidora de la corrosión protectora.
$R \geq 7.0$	Bajo saturación, tienden a disolverse $\text{CaCO}_3$ . El agua es corrosiva.

Fuente: (Pauta y Quezada, 2017).

Este índice ha sido propuesto como una medida más cuantitativa de la tendencia del agua a depositar (incrustación) o disolver (corrosión) el  $\text{CaCO}_3$ .

La determinación de ambos índices,  $L$  y  $R$ , está basada en el cálculo del **pH de saturación,  $pH_s$** , del carbonato cálcico, como se muestra en la ecuación 1.8:

$$pH_s = (pK_2 - pK_s) + pCa + pT_{AC}$$

**Ecuación 1.8.** Ecuación para el cálculo del pH de saturación (carbonato cálcico).  
Fuente: (Pauta y Quezada, 2017).

Siendo:

- i.  $pK_2$  el logaritmo negativo de la constante de la segunda disociación del ácido carbónico.
- ii.  $pK_s$  el logaritmo negativo de la constante del producto de solubilidad.
- iii.  $pCa$  el logaritmo negativo de la concentración de calcio.
- iv.  $pT_{AC}$  el logaritmo negativo de la alcalinidad.

También se puede calcular el pH de saturación en función de los factores de las variables relacionadas de la tabla 1.7, al igual que en la ecuación 1.6 para el Índice de Saturación de Langelier, como se muestra en la ecuación 1.9:

$$pH_s = (9.3 + A + B) - (C + D)$$

**Ecuación 1.9.** Cálculo del pH de Saturación en base a los factores de las variables relacionadas.

Fuente: (Pauta y Quezada, 2017).

Anteriormente se definió el significado de las constantes A, B, C y D en la ecuación 1.5 y se obtienen de la figura 1.23. Pero que también pueden ser calculados como se muestra en la ecuación 1.10:

$$A = \frac{(\log_{10} \text{TDS}_{[en \text{ mg/L}]} - 1)}{10}$$

$$B = [-13.12 \log_{10}(T_{[en \text{ } ^\circ\text{C}]} + 273)] + 34.55$$

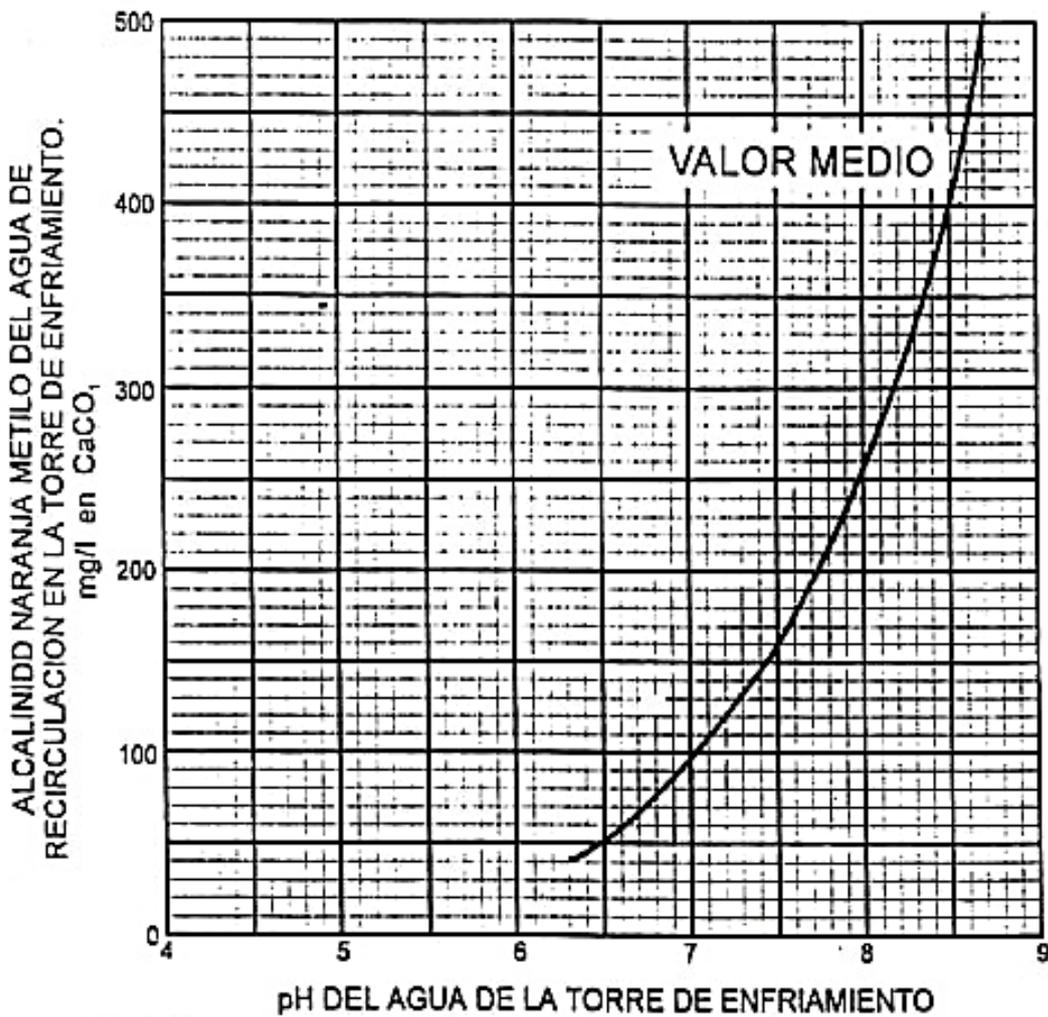
$$C = \log_{10}[\text{Dureza total como CaCO}_3] = \log_{10}[\text{Ca}^{+2} \text{ en mg/L}]$$

$$D = \log_{10}[\text{Alcalinidad en mg/L como CaCO}_3]$$

**Ecuación 1.10.** Ecuaciones que definen a los factores involucrados en el cálculo del pH de saturación.

Fuente: (Pauta y Quezada, 2017).

Para conocer el pH del agua en el sistema de enfriamiento (real) se procede a la lectura del siguiente gráfico ilustrado en la figura 1.26, a partir del valor de la alcalinidad total del sistema de enfriamiento (agua de la torre de enfriamiento):



NOTA: Normalmente, el pH del 90% de las torres está dentro de la superficie sombreada.

**Figura 1.26.** Gráfico del comportamiento del pH del agua en la torre de enfriamiento (sistema) con la alcalinidad en ppm de CaCO<sub>3</sub>.  
Fuente: (Betz, 1991).

## 2. CAPÍTULO II. DISEÑO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.

En el presente capítulo se especifican el tipo y el área en donde se lleva a cabo la investigación, el universo o población de donde se tomarán las muestras y la forma en la que se lleva a cabo. Se definen el sistema de hipótesis y variables utilizadas, así como el diseño de experimento (DOE) como técnica estadística para la identificación y cuantificación de las causas de los efectos de las variables independientes sobre las variables respuesta, para posteriormente realizar la prueba de hipótesis. Finalmente se exponen las técnicas, métodos e instrumentos para la realización de la etapa experimental.

### 2.1. Tipo y área de estudio.

En la presente investigación se ha empleado el **estudio descriptivo correlacional**. Los estudios descriptivos “buscan especificar propiedades y características importantes de cualquier fenómeno que se analice”; para este caso se han detectado ciertas variables de interés que se medirán, para luego establecer cómo o en qué grado se relacionan, es decir, para entrar a un estudio correlacional, en el que “se pretende conocer la relación o grado de asociación que exista entre dos o más conceptos, categorías o variables en una muestra o contexto en particular” (Sampieri, 2014).

En este estudio se definen las variables involucradas: pH, concentración de sílice, sólidos disueltos totales, alcalinidad total, dureza total, temperatura; cómo se relacionan estas a través de los índices de estabilidad del agua para un sistema de enfriamiento y los ciclos de concentración; el efecto que tengan estos sobre las proporciones en volumen de agua lluvia y agua suave en la mezcla a formular.

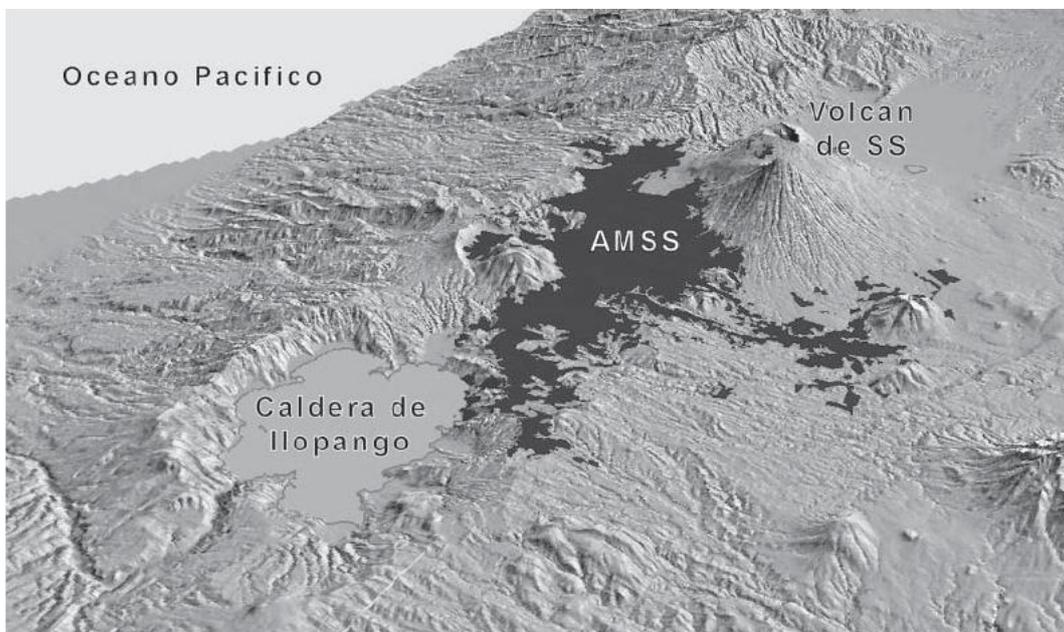
El área de estudio es ‘acondicionamiento de aguas para uso industrial’: el uso de una mezcla de agua suavizada y agua lluvia que cumpla con los requerimientos técnicos de una torre de enfriamiento.

## 2.2. Universo o población y muestra.

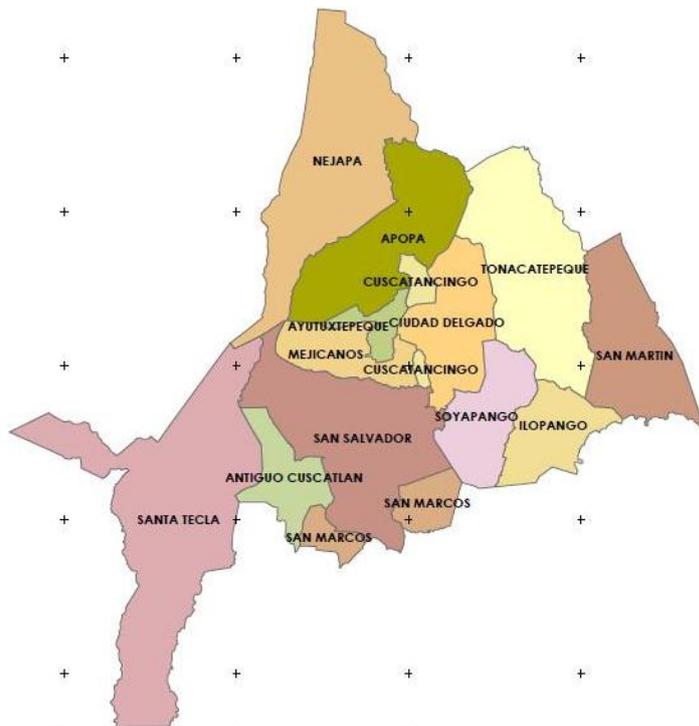
### UNIVERSO O POBLACIÓN:

Se identifica la zona geográfica con mayor presencia de industrias en el país correspondiente al **Área Metropolitana de San Salvador (AMSS)** (ilustrada en las figuras 2.1 y 2.2), conformada por los municipios:

- I. En el departamento de San Salvador: San Salvador, Soyapango, Mejicanos, Apopa, Ciudad Delgado, Ilopango, Tonacatepeque, San Martín, Cuscatancingo, San Marcos, Ayutuxtepeque y Nejapa;
- II. En el departamento de La Libertad: Santa Tecla y Antigua Cuscatlán.



**Figura 2.1.** Mapa de relieve del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS).  
Fuente: (Chávez, Hernández y Kopecky, 2012).



**Figura 2.2.** Municipios que conforman el AMSS.

Fuente: (Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador [OPAMSS], 2014).

Se delimita la población objeto de estudio todo el sector industrial del AMSS.

Se delimita la fecha factible para el estudio que la toma de muestras de agua lluvia se realiza dentro del lapso de la época de invierno en el país que comprende de **mayo a noviembre de 2020** (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales [MARN], 2020)

#### MUESTRA:

En la delimitación de la región de estudio, el AMSS, no representa inconvenientes al analizar el agua lluvia en cualquiera de los municipios que la conforman, por tratarse de una zona urbanizada, es decir, que cada punto en cualquier municipio o elemento de la población, tiene la misma probabilidad de ser elegido, por lo que la **muestra** es del tipo **probabilística** (Sampieri, 2014).

Por la limitación de recursos financieros, los efectos de la pandemia por el COVID19 y que se requiere de periodos de tiempo de varios días hasta semanas

para la colección de agua lluvia, se opta por un **muestreo por racimos o clusters** (Sampieri, 2014).

Es decir que la colección de agua lluvia (así como de agua suavizada) se realizará en los municipios (unidades de muestreo) del domicilio (racimo) de los autores de esta investigación: **San Salvador e Ilopango**.

### **2.3. Selección de las muestras de agua a analizar.**

La medición de los parámetros fisicoquímicos del agua lluvia y agua suavizada, se realiza mediante los análisis establecidos en los “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” (Métodos Estándar para el Análisis de Aguas y Aguas Residuales), por la “American Public Health Association” (Asociación Estadounidense de Salud Pública), la “American Water Works Association” (Asociación Estadounidense de Obras Hidráulicas) y la “Water Environment Federation” (Federación Ambiental del Agua); APHA, AWWA y WEF, por sus siglas en inglés respectivamente. Se conoce por medio de estos a manera cuantitativa las características fisicoquímicas que intervienen en los requerimientos técnicos de calidad del agua para torres de enfriamiento para la posterior formulación de la mezcla.

Los procedimientos de captación de las muestras, tanto de agua lluvia como de agua suave, se realizan de manera simple:

- I. Para el caso del agua lluvia se procede a la elección del recipiente adecuado para su captación durante un periodo de tiempo conveniente en el que se aproveche la obtención de precipitaciones que puede darse en días o semanas.
- II. Para el caso del agua suave de igual forma se escoge el recipiente adecuado para el almacenamiento y la muestra de agua de un suavizador, independientemente de la capacidad de este, debe proceder de la red de suministro de ANDA.

### **2.3.1. Descripción del recipiente colector de agua.**

El recipiente destinado para la captación de agua lluvia es de material plástico con una capacidad de hasta 20 litros de agua (5 galones), se mantendrá abierto mientras se llena, colocado en una zona donde no se contamine con hojas u otros objetos; una vez lleno se coloca la tapadera sobre el recipiente que lo cierra herméticamente.

Para el caso de la toma de muestra de agua suave, el recipiente también es de material plástico con capacidad de hasta 10 litros de agua. Se llena directamente de la llave hasta llenar y se cierra herméticamente para evitar contaminación por objetos extraños.

Para ambos casos (agua lluvia y agua suave) los recipientes no deben lavarse con jabón, detergente ni lejía o cloro para evitar interferencias durante la toma de medidas, únicamente se debe enjuagar para eliminar cualquier tipo de suciedad con al menos 3 enjuagues de la muestra a analizar.

Para la toma de muestras para el análisis se utilizan recipientes de plástico con capacidad de 100 mL.

### **2.4. Sistema de hipótesis y definición de variables.**

Se muestran las hipótesis de trabajo, las hipótesis estadísticas que a su vez conforman las hipótesis nulas y alternativas, las cuales se comprobarán con la respectiva prueba de hipótesis en el capítulo subsecuente.

#### **2.4.1. Hipótesis de trabajo.**

- I. Los valores obtenidos de los índices de estabilidad Langelier ( $L$ ) y Ryznar ( $R$ ) muestran una calidad del agua para enfriamiento aceptable, mediante los resultados de los análisis fisicoquímicos.

$$0.0 \leq L \leq 1.0$$

$$6.0 < R < 7.0$$

- II. La mezcla de agua con proporción de agua lluvia mayor a la proporción de agua suave aumenta los Ciclos de concentración ( $C_c$ ) del sistema de enfriamiento provocando una reducción en los flujos de purga.

$$C_c > 1$$

#### 2.4.2. Hipótesis estadísticas.

Hipótesis nulas ( $H_0$ ):

- I. Los resultados de los análisis fisicoquímicos muestran que los índices de estabilidad del agua (Langelier y Ryznar) no determinan una calidad del agua para enfriamiento aceptable, siendo esta corrosiva o incrustante.

$$0.0 > L > 1.0$$

$$6.0 > R > 7.0$$

- II. La mezcla de agua con proporción de agua lluvia mayor a la proporción de agua suave disminuye los ciclos de concentración del sistema de enfriamiento provocando un aumento en los flujos de purga.

$$C_c \leq 1$$

Hipótesis alternativas ( $H_a$  o  $H_1$ ): Con fines interpretativos, corresponden a los enunciados de las hipótesis de trabajo.

### **2.4.3. Definición de variables**

En la presente investigación se miden los parámetros fisicoquímicos de la mezcla agua lluvia – agua suave que son evaluados para la correcta operación de una torre de enfriamiento, a partir de estos se determinan los índices de estabilidad del agua (Langelier y Ryznar) y los ciclos de concentración de la torre.

Se observarán los efectos que estos parámetros tengan sobre los requerimientos técnicos del equipo de enfriamiento, con lo cual se permite la manipulación de la proporción de volúmenes de agua lluvia y agua suave a utilizar para la formulación de la mezcla que cumpla con las especificaciones de la torre.

En las tablas 2.1 y 2.2 se presentan en detalle y resumen de las variables de esta investigación:

**Tabla 2.1.** Detalle y definición de las variables de estudio.

Variable	Definición
<p><b>Variable dependiente:</b> No se sujeta a manipulación, sino que se mide para obtener el efecto producido al manipular las variables independientes</p>	<p><b>pH:</b> representa la cantidad de iones hidrogeno. Mide la acidez del agua lluvia y del agua suave, así como la de la mezcla formulada. Se relaciona con los índices de estabilidad.</p>
	<p><b>Temperatura:</b> Afecta la solubilidad de compuestos presentes en el agua. Relacionado con el índice de saturación de Langelier y el pH de saturación.</p>
	<p><b>Alcalinidad total:</b> Expresa la cantidad de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos que tiene el agua disuelta. Indica el riesgo del equipo de padecer incrustaciones. Relacionado con el índice de saturación de Langelier y el pH de saturación.</p>
	<p><b>Dureza total:</b> Representa la presencia de carbonatos de calcio y de magnesio en el agua, los cuales son propensos a la formación de incrustaciones en el equipo. Relacionado con el índice de saturación de Langelier y el pH de saturación.</p>
	<p><b>Sólidos Disueltos Totales (TDS):</b> Representa todos los solutos, flóculos o cualquier material residual al hacer evaporar el agua, los cuales provocan con el tiempo taponamiento de tuberías. Relacionado con el índice de saturación de Langelier y el pH de saturación.</p>

Continúa...

**Tabla 2.1.** Detalle y definición de las variables de estudio. (Continuación).

Variable	Definición
<p><b>Variable dependiente:</b> No se sujeta a manipulación, sino que se mide para obtener el <b>efecto</b> producido al manipular las variables independientes</p>	<p><b>Concentración de Sílice:</b> Su presencia en el agua para enfriamiento está relacionada con la concentración máxima de este con la que funciona el equipo. Es decir determina los ciclos de concentración.</p>
	<p><b>PH de saturación:</b> En este se basa también el cálculo de los índices de estabilidad: de Langelier y Ryznar.</p>
	<p><b>Índice de Saturación de Langelier:</b> Indicador fiable del grado de saturación del agua con respecto al carbonato de calcio, y modelo de estabilidad de equilibrio de solubilidad de sales.</p>
	<p><b>Índice de Estabilidad de Ryznar:</b> Modifica al índice de saturación de Langelier para una mejor indicación en la tendencia a la formación de incrustaciones de carbonato de calcio.</p>
	<p><b>Ciclos de Concentración:</b> Representa la cantidad de sólidos en agua de aportación que puede estar contenida en el agua de recirculación, se determinan a partir de la concentración de sílice ya que a partir de esta se obtienen valores más precisos para esta variable, a diferencia de los TDS con los que se pueden obtener valores demasiado altos y poco precisos al no diferenciar entre sólidos por agua de reposición o por tratamiento químico.</p>

Continúa...

**Tabla 2.1.** Detalle y definición de las variables de estudio. (Continuación).

Variable	Definición
<p><b>Variable independiente:</b> Sujeta a manipulación (<b>causa</b>) para conocer su efecto sobre la variable dependiente.</p>	<p><b>Proporción volumen de agua lluvia:</b> Proporción a utilizar en la mezcla óptima que cumpla los requerimientos técnicos del equipo (reflejados en los índices de estabilidad y ciclos de concentración), a partir de un valor cualquiera de volumen total de la mezcla a utilizar.</p>
	<p><b>Proporción volumen de agua suave:</b> Proporción de agua suave a utilizar en la mezcla óptima que cumpla los requerimientos técnicos del equipo (reflejados en los índices de estabilidad y ciclos de concentración), a partir de un valor cualquiera de volumen total de la mezcla a utilizar.</p>
<p><b>Variable Respuesta (no controlables):</b> Cambia su valor a medida que se alteran las variables de manipulación.</p>	<p><b>Índice de Estabilidad de Langelier (L), Índice de Estabilidad de Ryznar (R), Ciclos de Concentración (C<sub>c</sub>).</b></p>
<p><b>Variables de manipulación (controlables):</b> Al cambiar las propiedades o valores de éstas, se obtiene una mejor noción de su efecto sobre las variables respuesta.</p>	<p><b>Proporción volumen de agua suave (V<sub>s</sub>) y Proporción volumen de agua lluvia (V<sub>L</sub>).</b></p>

**Tabla 2.2.** Resumen de variables de estudio.

<b>Variable</b>	<b>Tipo</b>
Proporción volumen de agua suave ( $V_S$ ) y Proporción volumen de agua lluvia ( $V_L$ ).	Independiente (causa)
Temperatura ( $T$ ), potencial Hidrógeno ( $pH$ ), Alcalinidad total ( $A_T$ ), Dureza total ( $D_T$ ), Sólidos Disueltos Totales ( $TDS$ ), Concentración de Sílice ( $S$ ), pH de saturación ( $pH_s$ ), Índice de Estabilidad de Langelier ( $L$ ), Índice de Estabilidad de Ryznar ( $R$ ), Ciclos de Concentración ( $C_C$ ).	Dependiente (efecto)
Índice de Estabilidad de Langelier ( $L$ ), Índice de Estabilidad de Ryznar ( $R$ ), Ciclos de Concentración ( $C_C$ ).	Variables Respuesta
Proporción volumen de agua suave ( $V_S$ ) y Proporción volumen de agua lluvia ( $V_L$ ).	Variables de Manipulación

## 2.5. Diseño Experimental.

En el presente apartado se define el diseño experimental a emplear en la investigación, el estudio de los efectos de los factores (variables independientes) sobre las variables dependientes y el análisis estadístico correspondiente.

### 2.5.1. Definición del diseño experimental.

(Montgomery, 2004)

Como se menciona en el apartado anterior, se van a manipular dos variables independientes que son la proporción volumen de agua lluvia ( $V_L$ ) y la proporción volumen de agua suave ( $V_S$ ) para conocer el efecto que tengan estas especialmente en 3 variables dependientes (variables respuesta) que son el índice de saturación de Langelier ( $L$ ), el índice de estabilidad de Ryznar ( $R$ ) y los Ciclos de concentración ( $C_C$ ), las cuales proporcionan información valiosa sobre los requerimientos de calidad del agua para una torre de enfriamiento.

Se procede al diseño del experimento, teniendo dos factores que son las variables independientes  $V_L$  y  $V_S$ , con la finalidad de conocer el efecto de estos sobre las variables respuesta, con lo cual se identifican dos niveles de prueba (uno mínimo y uno máximo) para cada factor. Entendiéndose que estos niveles serán las cantidades a emplear de sílice que tendrán los factores, por medio de la variación en las proporciones de agua lluvia y agua suave ( $V_L$  y  $V_S$  respectivamente) al momento de realizar las mediciones.

Por tanto se trabaja con el **diseño factorial  $2^k$**  (donde  $k$  son los factores y el número 2 representa la cantidad niveles), con el cual se estudia si al utilizar un determinado tratamiento que se le da a las variables independientes, se tienen las condiciones óptimas de los parámetros de calidad para agua de enfriamiento.

El diseño se reduce teniendo dos factores con dos niveles cada uno, por tanto se define como **diseño factorial  $2^2$** , que geoméricamente se representa como un cuadrado con  $2^k = 2^2 = 4$  ensayos o corridas, es decir 4 combinaciones de tratamientos.

Los tratamientos se replican 3 veces, es decir se hacen 3 repeticiones de medición de los parámetros fisicoquímicos del agua con los que se determinarán las variables de interés que son  $L$ ,  $R$  y  $C_c$ . Se toma al azar esta cantidad de réplica, teniendo un total de 12 observaciones para cada variable respuesta.

### **2.5.2. Estudio del efecto de factores sobre las variables dependientes.**

Se estableció que los factores a evaluar son  $V_S$  y  $V_L$  y que los niveles que tendrán estos son la cantidad de sílice presente en la mezcla que se formule, tomándose como el nivel menor (-1) aquel en el cual se tenga en la mezcla la menor concentración o presencia de sílice, esto se logra reduciendo  $V_S$  y aumentando  $V_L$  ya que esta por su naturaleza, posee una concentración de sílice cerca de 0 ppm; y el nivel mayor (+1) corresponde a la mayor cantidad de sílice a emplear que se logra aumentando  $V_S$  y por tanto disminuyendo  $V_L$  (Montgomery, 2004).

En la tabla 2.3 se muestra la nomenclatura a seguir en el tratamiento durante el diseño experimental para las cuatro corridas que se realizan en el pre experimento:

**Tabla 2.3.** Nomenclatura del diseño factorial.

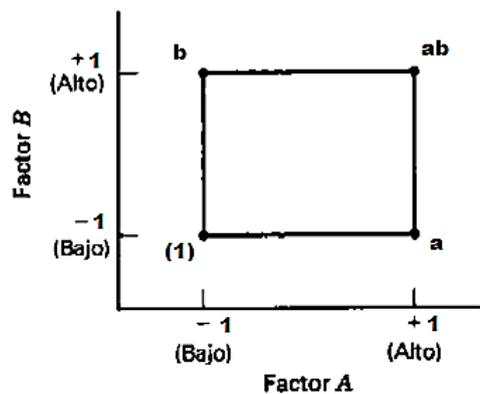
<b>Nº de corridas</b>	<b>A: Agua suave</b>	<b>B: Agua lluvia</b>	<b>Nivel para A</b>	<b>Nivel para B</b>	<b>Notación de Yates</b>
1	30%	70%	-1	-1	(1)
2	35%	65%	+1	-1	a
3	40%	60%	-1	+1	b
4	50%	50%	+1	+1	ab

De la tabla 2.3 se muestra que se varían las proporciones del factor A (agua suave) y del factor B (agua lluvia) según estos adopten el nivel mayor o menor:

- a. La menor cantidad a emplear de sílice cuando se tenga 30% agua suave y 70% agua lluvia, ambos con notación -1, siendo para este caso la notación de Yates (1) que indica que ambos factores A y B están en el nivel menor (-1).
- b. Cuando se tenga el mayor de A (+1) y menor de B (-1) se incrementa la cantidad de sílice incrementando la proporción de agua suave a 35% y para agua lluvia corresponde 65%, siendo la notación de Yates “a” que indica que el factor A se encuentra en el nivel mayor y B en el nivel menor.
- c. Para el caso en el que A se encuentre en el nivel menor (-1) y B en el nivel mayor (+1) se reduce la proporción de agua lluvia para disminuir el nivel del factor B hasta 60% y el factor A (agua suave) se incrementa su proporción a 40%, en notación de Yates “b” indica que el factor B se encuentra en el nivel mayor y A en el nivel menor.

- d. Cuando A y B están en el nivel mayor (ambos denotados como +1) se usan en ambas proporciones, es decir 50% agua suave y 50% agua lluvia (el propósito de esta investigación es la reducción de agua suave y el aprovechamiento del recurso agua lluvia, no se busca tener una proporción mayor de esta última), en notación de Yates se representa como “ab” que indica que ambos están en el nivel mayor (+1).

En la figura 2.3 se muestra un gráfico de cubo usado en diseños factoriales donde se ilustra la notación de Yates (se muestra una región plana ya que solo se han tomado dos factores A y B):



**Figura 2.3.** Notación de Yates representada en gráfico de cubo.  
Fuente: (Montgomery, 2004).

En el pre experimento que se realiza en tres réplicas para el diseño factorial, se obtuvieron los siguientes datos que muestran el efecto en la manipulación de factores en sus dos niveles sobre las variables respuesta, mostrados en las tablas 2.4 a la 2.6:

**Tabla 2.4.** Réplica 1 de medidas pre experimentales para el diseño factorial.

Parámetros Fisicoquímicos	Unidades	Agua Suave	Agua Lluvia	F 1: 30%A-70%B		F 2: 35%A-65%B		F 3: 40%A-60%B		F 4: 50%A-50%B	
		A	B	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre
pH		7	5.7	6.09	8.4	6.16	8.4	6.22	8.4	6.35	8.4
TDS	ppm	310	20	107.00	636.90	121.50	619.90	136.00	607.14	165	589.29
Dureza total	ppm	0	10	7	40	7	30	6	30	5	20
Alcalinidad Total	ppm	187	10	60	380	70	370	80	360	100	350
Sílice	ppm	84	0	25.20	150	29.40	150	33.60	150	42	150

**Tabla 2.5.** Réplica 2 de medidas pre experimentales para el diseño factorial.

Parámetros Fisicoquímicos	Unidades	Agua Suave	Agua Lluvia	F 1: 30%A-70%B		F 2: 35%A-65%B		F 3: 40%A-60%B		F 4: 50%A-50%B	
		A	B	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre
pH		7.2	6.1	6.43	8.5	6.49	8.4	6.54	8.4	6.65	8,4
TDS	ppm	309	20	106.70	620.35	121.15	603.74	135.60	591.28	164.5	573.84
Dureza total	ppm	0	10	7	40	7	30	6	30	5	20
Alcalinidad Total	ppm	190	10	60	370	70	360	80	360	100	350
Sílice	ppm	86	0	25.80	150	30.10	150	34.40	150	43	150

**Tabla 2.6.** Réplica 3 de medidas pre experimentales para el diseño factorial.

Parámetros Físicoquímicos	Unidades	Agua Suave	Agua Lluvia	F 1: 30%A-70%B		F 2: 35%A-65%B		F 3: 40%A-60%B		F 4: 50%A-50%B	
		A	B	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre
pH		7.2	6.4	6.64	8.4	6.68	8.4	6.72	8.35	6.8	8.25
TDS	ppm	311	20	107.30	631.18	121.85	614.37	136.40	601.76	165.5	584.12
Dureza total	ppm	0	10	7	40	7	30	6	30	5	20
Alcalinidad Total	ppm	180	10	60	360	70	350	80	340	100	340
Sílice	ppm	85	0	25.50	150.00	29.75	150.0	34.00	150.00	42.50	150.00

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las 3 réplicas en la tabla 2.7, para las variables respuesta:  $C_c$ ,  $L$  y  $R$ :

**Tabla 2.7.** Valores obtenidos en las variables respuesta al manipular los factores en sus niveles mayor y menor.

<b>Réplica</b>	<b>Variable respuesta</b>	<b>Corrida 1: 30%A-70%B</b>	<b>Corrida 2: 35%A-65%B</b>	<b>Corrida 3: 40%A-60%B</b>	<b>Corrida 4: 50%A-50%B</b>
1	Ciclos de Concentración ( $C_c$ )	6.0	5.1	4.5	3.6
	Índice de Saturación de Langelier ( $L$ )	1.15	1.04	0.95	0.76
	Índice de Estabilidad de Ryznar ( $R$ )	6.09	6.31	6.51	6.88
2	Ciclos de Concentración ( $C_c$ )	5.8	5.0	4.4	3.5
	Índice de Saturación de Langelier ( $L$ )	1.26	1.06	0.96	0.77
	Índice de Estabilidad de Ryznar ( $R$ )	5.97	6.29	6.49	6.86
3	Ciclos de Concentración ( $C_c$ )	5.9	5.0	4.4	3.5
	Índice de Saturación de Langelier ( $L$ )	1.13	1.03	0.88	0.59
	Índice de Estabilidad de Ryznar ( $R$ )	6.13	6.35	6.60	7.07

### 2.5.3. Análisis estadístico de los resultados del Diseño Factorial.

En el presente apartado se expone el diseño factorial con el correspondiente análisis estadístico para la posterior prueba de hipótesis, también se muestran gráficos factoriales del diseño tales como: gráficos de Pareto de efectos estandarizados, gráficos de cubos y gráficos de residuos con el fin de tener una interpretación complementaria. Tanto el diseño factorial como los gráficos factoriales se realizan con el programa estadístico Minitab (véase información de licencia en Anexo E).

#### 2.5.3.1. Diseño Factorial y Análisis de Varianza (ANOVA).

Con el análisis estadístico del DOE se puede comprobar cuantitativamente que para la variable respuesta 'Ciclos de concentración' los factores A y B son significativos pero la interacción entre estos no, para la variable respuesta 'Índice de Saturación de Langelier' la interacción de los factores individuales lo son, pero su interacción no, al igual que para la variable 'Índice de Estabilidad de Ryznar'; todos con un valor de significancia del 5%.

La tabla 2.8 muestra un resumen del diseño factorial completo que consta de dos factores (A:  $V_S$  y B:  $V_L$ ), 12 corridas de datos experimentales, 3 réplicas y diseño de base  $2 \times 4$ .

**Tabla 2.8.** Resumen Diseño factorial completo.

Diseño Factorial Completo	
Factores: 2	Diseño de la base: 2;4
Corridas: 12	Réplicas: 3

En la tabla 2.9 se muestra el análisis de varianza (ANOVA) del efecto de los factores sobre la variable respuesta  $C_c$ .

**Tabla 2.9.** Análisis de Varianza de la variable  $C_c$ .

<b>Análisis de Varianza. Regresión Factorial <math>C_c</math> contra <math>V_s</math> y <math>V_L</math></b>					
<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Modelo	3	8.94250	2.98083	596.17	0.000
Lineal	2	8.94167	4.47083	894.17	0.000
Agua Suave	1	2.34083	2.34083	468.17	0.000
Agua Lluvia	1	6.60083	6.60083	1320.17	0.000
Interacciones de 2 términos	1	0.00083	0.00083	0.17	0.694
Agua suave*Agua Lluvia	1	0.00083	0.00083	0.17	0.694
Error	8	0.04000	0.00500		
Total	11	8.98250			

Para el ANOVA que muestra la regresión factorial de los Ciclos de concentración contra Agua suave y Agua lluvia, se puede interpretar lo siguiente:

- a. Se establece primero la hipótesis nula ( $H_0$ ) para los factores: el efecto de estos (A y B) y de su interacción (AB) es nulo, es decir  $A=0$ ,  $B=0$ ,  $AB=0$ .
- b. Así también se establece como hipótesis alternativa ( $H_a$ ): los efectos serán distintos de cero, es decir  $A \neq 0$ ,  $B \neq 0$ ,  $AB \neq 0$ .
- c. El criterio de rechazo es que si el valor p (probabilidad que mide la evidencia en contra de la hipótesis nula) es menor que el nivel de significancia ( $\alpha$ ), se rechaza  $H_0$ .

De la tabla anterior se puede estimar que para los efectos de agua suave (A) y agua lluvia (B), en ambos el valor  $p=0$  es menor que el nivel de significancia  $\alpha=0.05$ , sin embargo para la interacción de factores agua suave – agua lluvia el valor  $p=0.694$  es mayor al nivel de significancia  $\alpha=0.05$ .

Una interpretación preliminar indicada por los datos estadísticos del diseño experimental es que con un nivel de significancia del 5% **“se acepta” la hipótesis nula para la interacción de agua lluvia – agua suave**, manifestando que **su interacción no tiene efecto significativo sobre la variable de respuesta** que es **C<sub>c</sub>**. Por otro lado, **“se rechaza” la hipótesis nula para agua suave y para agua lluvia**; es decir estos dos factores **de forma individual si tienen efecto significativo sobre la variable C<sub>c</sub>**.

Sin embargo se dijo que es presuroso rechazar o aceptar estas hipótesis ya que no se cuenta con la suficiente evidencia de que los datos obtenidos de las muestras se asemejen a los de la población (no se puede inferir).

La tabla 2.10 muestra el ANOVA para la regresión factorial de la variable respuesta *L*.

**Tabla 2.10.** *Análisis de varianza de la variable L.*

<b>Análisis de varianza. Regresión Factorial <i>L</i> contra <i>V<sub>s</sub></i> y <i>V<sub>L</sub></i></b>					
<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Modelo	3	0.360967	0.120322	27.87	0.000
Lineal	2	0.355333	0.177667	41.16	0.000
Agua Suave	1	0.097200	0.097200	22.52	0.001
Agua Lluvia	1	0.258133	0.258133	59.80	0.000
Interacciones de 2 términos	1	0.005633	0.005633	1.31	0.286
Agua suave*Agua Lluvia	1	0.005633	0.005633	1.31	0.286
Error	8	0.034533	0.004317		
Total	11	0.395500			

Se plantean hipótesis nulas para el ANOVA (los efectos de los factores individuales y el de su interacción son nulos o cero) e hipótesis alternativas (los efectos de los factores individuales y el de su interacción son distintos de cero), de igual manera que en el caso de la variable respuesta *C<sub>c</sub>*.

Puesto que para los efectos de los factores agua suave (A) y agua lluvia (B) su valor p es menor que el nivel de significancia  $\alpha=0.05$  ( $p_A=0.001$  y  $p_B=0.000$ ), y para la interacción de factores agua suave – agua lluvia, su el valor  $p_{AB}=0.286$  es mayor al nivel de significancia  $\alpha=0.05$ , se dice que si hay efectos individuales pero no hay efectos de la interacción de las variables sobre la variable respuesta L. Preliminarmente, con este análisis estadístico de los resultados del diseño se puede interpretar que:

Con un nivel de significancia del 5% **“se acepta” la hipótesis nula para la interacción de agua lluvia – agua suave**, manifestando que **su interacción no tiene efecto significativo sobre la variable de respuesta** que es L.

Pero, **“se rechaza” la hipótesis nula para los efectos individuales de los factores agua suave y agua lluvia** sobre la variable respuesta L.

Se dice que es una interpretación preliminar porque no se tiene aún evidencia suficiente de que los datos muestrales se comporten de manera semejante a los de la población de estudio (se necesita un mayor número de réplicas), por lo que el “aceptar”  $H_0$  se hace a manera de análisis previo a la realización del experimento.

La tabla 2.11 muestra el ANOVA para la variable respuesta R:

**Tabla 2.11.** Análisis de varianza de la variable R.

<b>Análisis de varianza. Regresión Factorial R contra <math>V_s</math> y <math>V_L</math></b>					
<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Modelo	3	1.231360	0.410453	66.38	0.000
Lineal	2	1.214480	0.607242	98.21	0.000
Agua Suave	1	0.323410	0.323408	52.30	0.000
Agua Lluvia	1	0.891080	0.891075	144.11	0.000
Interacciones de 2 términos	1	0.016880	0.016880	2.73	0.137

Continúa...

**Tabla 2.11.** Análisis de varianza de la variable R. (Continuación).

<b>Análisis de varianza. Regresión Factorial R contra <math>V_s</math> y <math>V_L</math></b>					
<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Agua suave*Agua Lluvia	1	0.016880	0.016880	2.73	0.137
Error	8	0.049470	0.006183		
Total	11	1.280830			

Como se observa en la tabla anterior, se tiene un comportamiento similar que en el de la variable respuesta Índice de Saturación de Langelier, el valor p para los factores individuales y la interacción entre estos es mayor que el nivel de significancia ( $p > \alpha$ ). Se puede especular entonces que:

Con un nivel de significancia del 5% **“se acepta” la hipótesis nula para la interacción de agua lluvia – agua suave**, manifestando que **su interacción no tiene efecto significativo sobre la variable de respuesta R.**

Pero, **“se rechaza” la hipótesis nula para los efectos individuales de los factores agua suave y agua lluvia** sobre la variable respuesta R.

Es de recalcar que con las variables respuesta  $C_c$ ,  $L$  y  $R$  no se tiene aún evidencia suficiente para rechazar o para aceptar  $H_0$ , por lo que esto sólo es a manera de un previo análisis representativo de acuerdo a los resultados de este diseño experimental, en el siguiente capítulo se detalla el experimento completo con el correspondiente análisis estadístico.

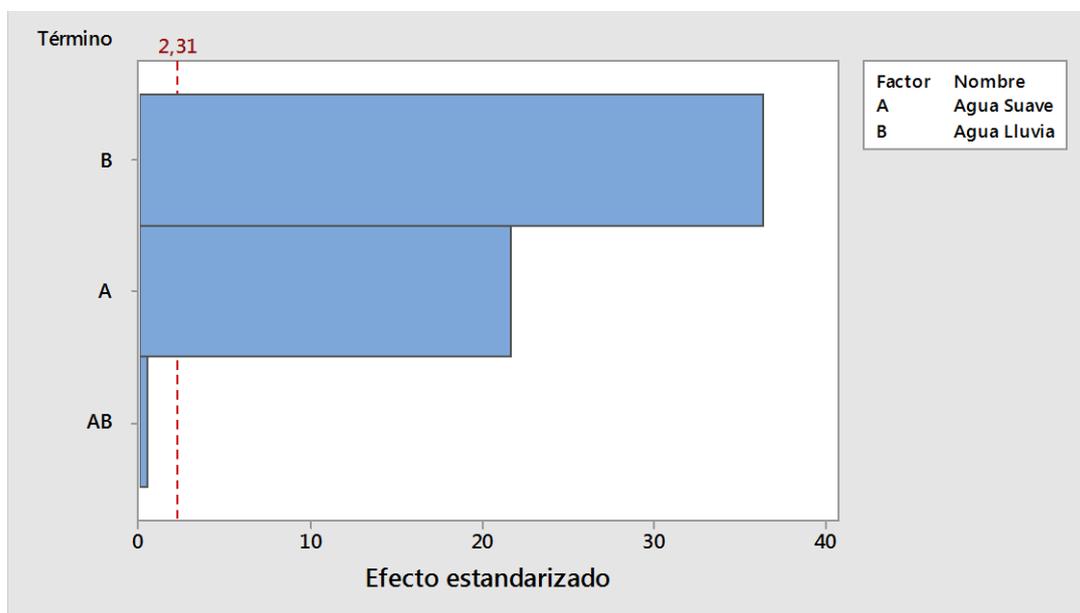
### **2.5.3.2. Análisis gráfico de los resultados del Diseño Factorial.**

#### **A. Variable de respuesta: Ciclos de Concentración ( $C_c$ ).**

Los resultados del análisis factorial se pueden representar gráficamente para interpretar los efectos de estos factores y de la interacción de estos sobre cada una de las variables respuesta, utilizando los gráficos: Pareto de efectos principales y de interacción y gráfico de cubo; se usa también gráficos de residuos para conocer la

normalidad de los datos, recordando que la distribución normal utiliza la media aritmética como medida de tendencia central y la varianza como medida de dispersión; es decir si los datos deben seguir una distribución normal para conocer si se podrá rechazar o no las hipótesis nulas según lo planteado previamente, de lo contrario, si se sigue una distribución libre, se procede con una prueba no paramétrica.

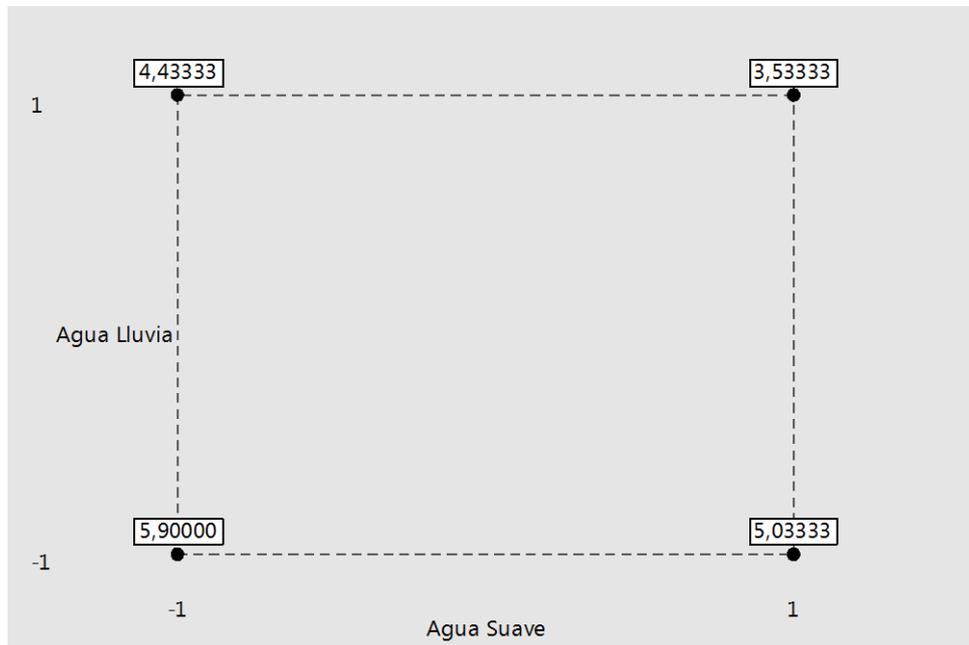
A continuación se muestran el gráfico factorial Pareto de efectos estandarizados en la figura 2.4 que ilustra los efectos de los factores y su interacción sobre la variable respuesta  $C_C$ .



**Figura 2.4.** Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la variable respuesta  $C_C$ .

El diagrama de Pareto de efectos estandarizados muestra que son los factores A (agua suave) y B (agua lluvia) que individualmente tienen efecto significativo sobre la variable respuesta  $C_C$ , esto se muestra porque las barras correspondientes a estos factores cruzan la línea roja de 2.31 que representa la línea de referencia que determina la significancia estadística. Sin embargo se observa que para la interacción AB no cruza esta línea por lo que la interacción de factores no tiene efectos significativos sobre la variable respuesta.

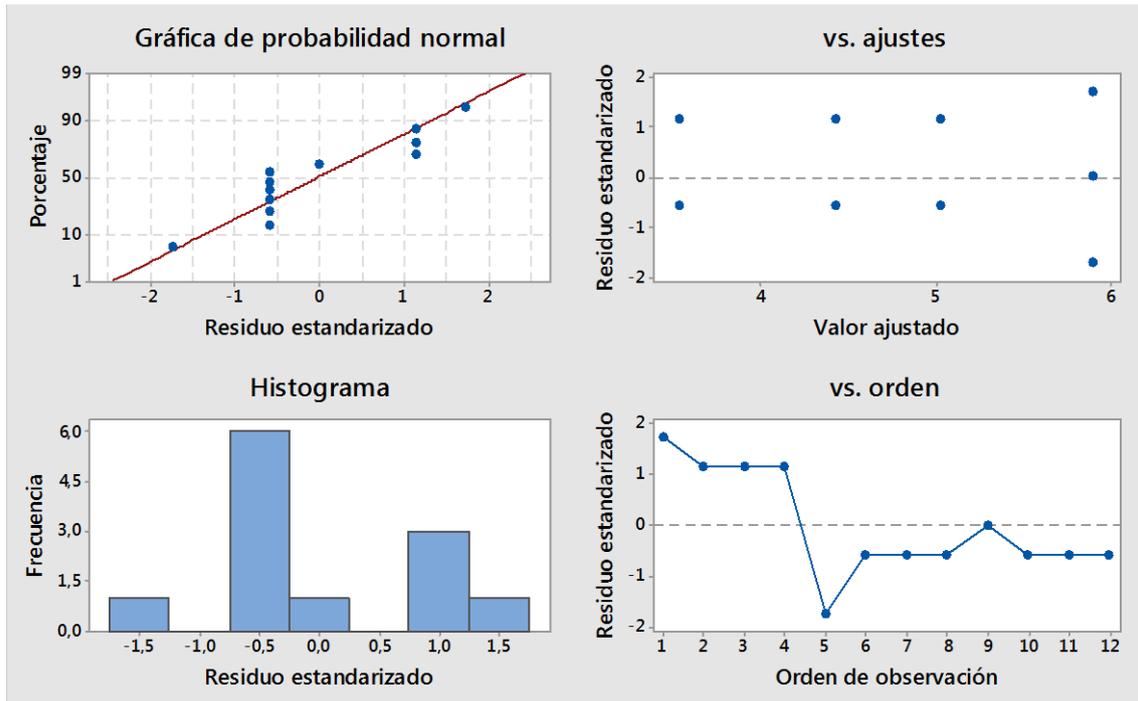
Se puede profundizar más en la interpretación con el gráfico de cubos de la figura 2.5:



**Figura 2.5.** Gráfica de cubos de la variable respuesta  $C_c$ .

En este gráfico se ilustra que cuando ambos factores están en el menor nivel (menor cantidad empleada de sílice) se tiene el mayor número de ciclos de concentración (5.90); y cuando ambos están en el mayor nivel (mayor cantidad empleada de sílice) se tiene el menor número de ciclos de concentración (3.53). Se puede decir entonces que a medida se encuentren ambos factores en su nivel menor (cuanta menor sílice se emplee) se tendrá un mayor número de ciclos de concentración, y a medida los factores llegan a su nivel inferior (cuanta menor sílice se emplee) se tendrá un menor número de ciclos de concentración.

La figura 2.6 muestra los gráficos de residuos donde se analiza la normalidad y variabilidad de los datos:



**Figura 2.6.** Gráficas de residuos para la variable respuesta  $C_c$ .

A partir de la figura 2.6 se puede interpretar:

- Del gráfico de probabilidad normal: se observa que los datos no siguen la tendencia de la línea recta (roja), por lo que no siguen la distribución de probabilidad normal.
- Del gráfico de residuos versus ajustes: se observa que los puntos quedan distribuidos en ambos lados (positivo y negativo) del valor cero y poco alejados de este, hay cierta aleatoriedad y muestran varianza (separación en el eje de abscisas) constante.
- Del gráfico de residuos versus orden: los puntos muestran distintas tendencias alineadas a ambos lados del valor cero (se muestra decreciente–constante–decreciente–creciente–constante–decreciente–constante), es decir los residuos no muestran independencia unos de otros y no hay aleatoriedad alrededor de la línea central.

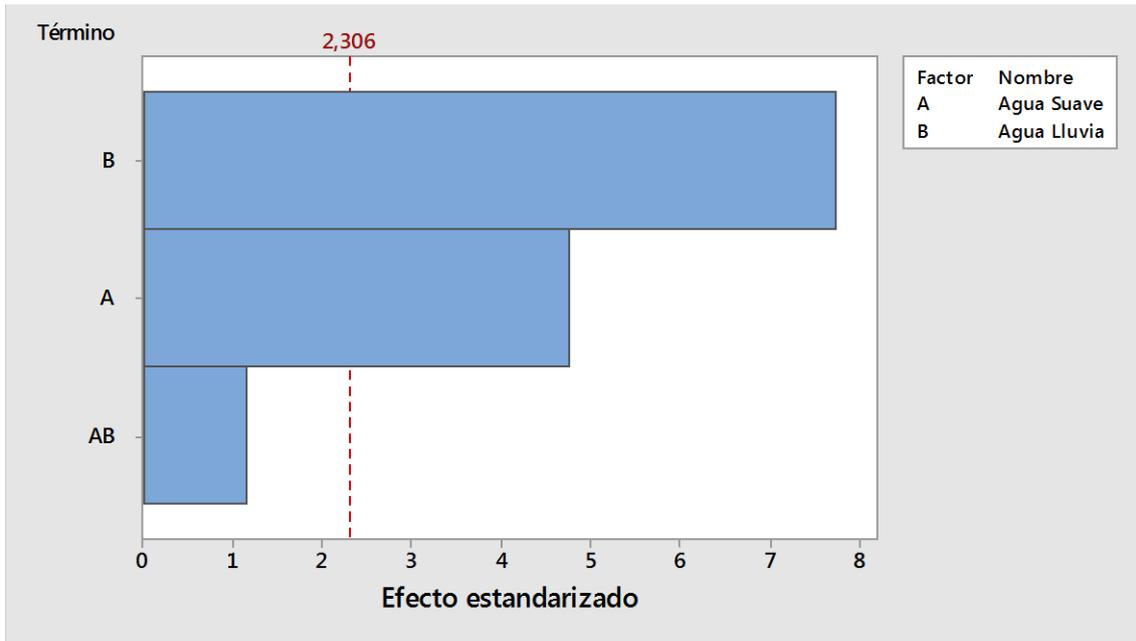
- d. Del histograma: este gráfico no es más que otra representación de la curva de probabilidad normal, la cual no está definida, porque no se visualizan barras altas agrupadas en el valor cero de residuos, por lo que no se muestra distribución normal.

La causa de que los datos no muestren una distribución normal se debe a que no se tomaron los suficientes datos experimentales de las muestras analizadas, por lo que no son representativos de la población de estudio.

Al no presentar los datos una distribución normal, se debe realizar otra toma con mayor cantidad de datos de las muestras de agua lluvia y agua suave colectadas (mayor cantidad de réplicas) que mostrarían un comportamiento cercano al de una distribución normal, es decir que la muestra sea característica de la población; o bien, de no ser el caso de una distribución normal, sino de una distribución no normal o “distribución libre”, se realizará una prueba no paramétrica que dé resultados confiables para realizar la prueba de hipótesis (Minitab, 2019).

### **B. Variable de respuesta: Índice de Saturación de Langelier (L).**

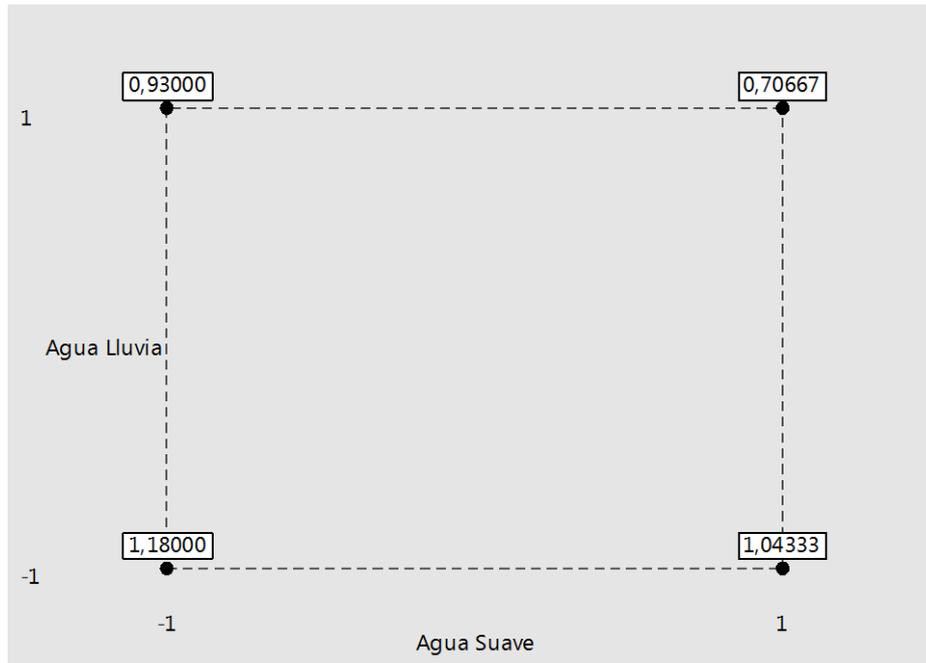
En este apartado se muestra la interpretación gráfica de los efectos de los factores (individuales e interacción) y los gráficos de residuos para conocer la significancia estadística, la normalidad y la aleatoriedad de los datos para la variable de respuesta *L*.



**Figura 2.7.** Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la variable respuesta *L*.

La figura 2.7 muestra el diagrama de Pareto donde se observa que los factores A y B si tienen efecto individualmente sobre la variable respuesta *L*, pero la interacción AB no sobrepasan la línea color rojo con valor de 2.306 que representa la referencia que determina la significancia estadística, por lo que la interacción de los factores no tiene efecto significativo sobre la variable respuesta *L*.

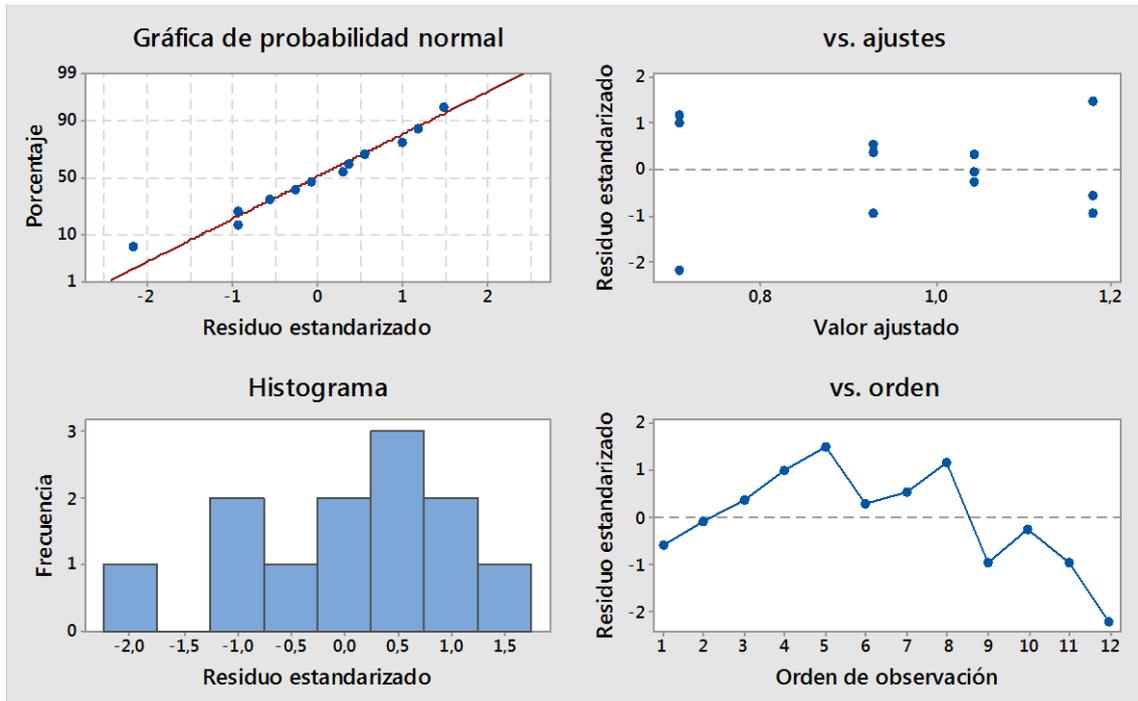
Se muestra a manera de visualización, el gráfico de cubos de la figura 2.8:



**Figura 2.8.** Gráfica de cubos para la variable respuesta L.

El gráfico de la figura 2.8 ilustra que al estar ambos factores en su menor nivel se tiene un Índice de Saturación de Langelier (con valores de medias ajustadas) de 1.18 y que disminuye cuando ambos factores están en su mayor nivel.

La figura 2.9 muestra los gráficos de residuos que ilustran la normalidad, variabilidad y aleatoriedad de los datos:



**Figura 2.9.** Gráficas de residuos para la variable respuesta *L*.

A partir de la figura 2.9 se puede interpretar lo siguiente:

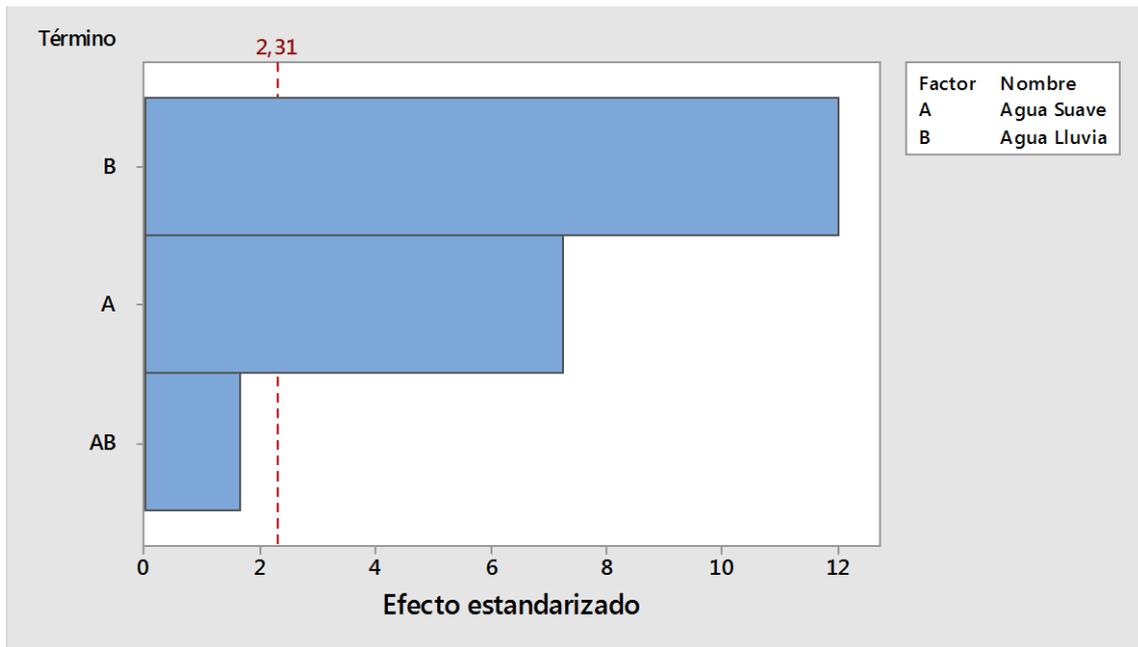
- a. Del gráfico de probabilidad normal: se observa que los datos siguen una tendencia cercana a la línea recta con algunos puntos que se desvían.
- b. Del gráfico de residuos versus ajustes: se observa que los puntos quedan distribuidos en ambos lados del cero (positivo y negativo) con cierta aleatoriedad con dos puntos poco alejados en el lado derecho correspondiente al valor arriba de 1.2 de *L* y al lado izquierdo en el valor cercano a 0.8 de *L*, se observa varianza casi constante al haber separación no muy grande entre los valores ajustados, siendo alrededor de 0.8.
- c. Del gráfico de residuos versus orden: los puntos muestran un patrón creciente pasando encima de la línea central (valor cero) luego decreciente-creciente-decreciente-creciente-decreciente, por lo que no hay aleatoriedad.

- d. Del histograma: no se muestra que los datos están agrupados cerca del valor cero de residuos por lo que la curva de probabilidad normal no se define como una campana, sino con concentración de valores a la derecha y un sesgo a la izquierda, por lo que no muestra distribución normal.

Como ya se mencionó, la causa de una distribución no normal se debe a que no se tomaron las mediciones suficientes, al hacerlo incrementando las réplicas se puede tener que los datos se comporten con distribución normal, otra manera de plantear la prueba de hipótesis sin ningún inconveniente es a través de las pruebas no paramétricas, con las que no se necesita obtener tantos datos para establecer si se rechaza la hipótesis nula. Las pruebas no paramétricas trabajan con la mediana como medida de tendencia central (Minitab, 2019).

### **C. Variable respuesta Índice de Estabilidad de Ryznar (*R*).**

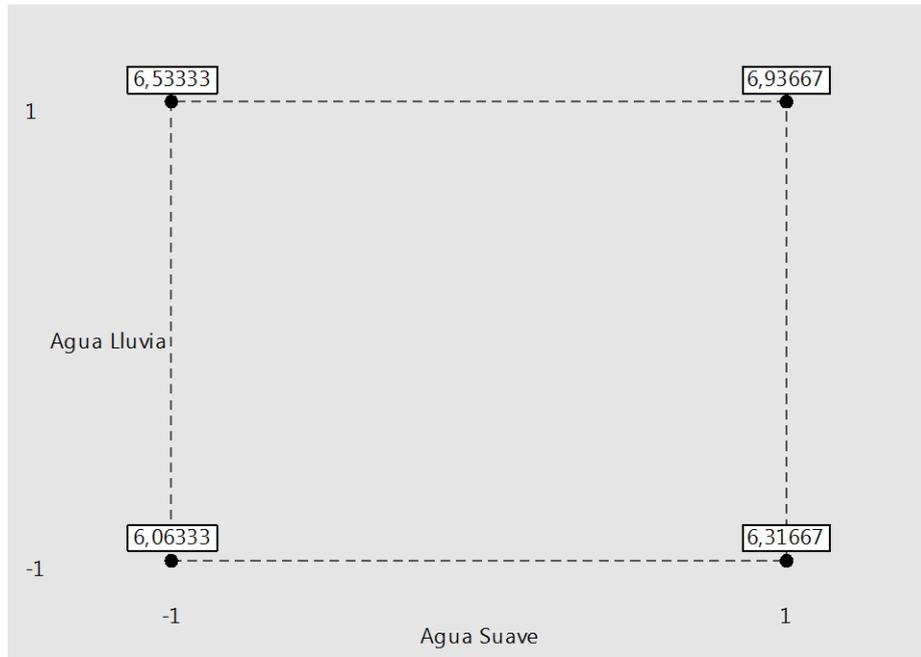
La figura 2.10 muestra el gráfico factorial Pareto de efectos estandarizados para el análisis de los efectos individuales de los factores y de su interacción sobre la variable respuesta *R*.



**Figura 2.10.** Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la variable respuesta *R*.

El diagrama de Pareto de efectos estandarizados de la figura 2.10 muestra que, al igual que en el caso de la variable respuesta *L*, se observa que los factores *A* y *B* tienen efecto individual sobre la variable respuesta *R*, pero la interacción *AB* al no sobrepasar la línea roja de 2.306, o línea de referencia que determina la significancia estadística, se dice que la interacción de los factores no tiene efecto significativo sobre la variable respuesta *R*.

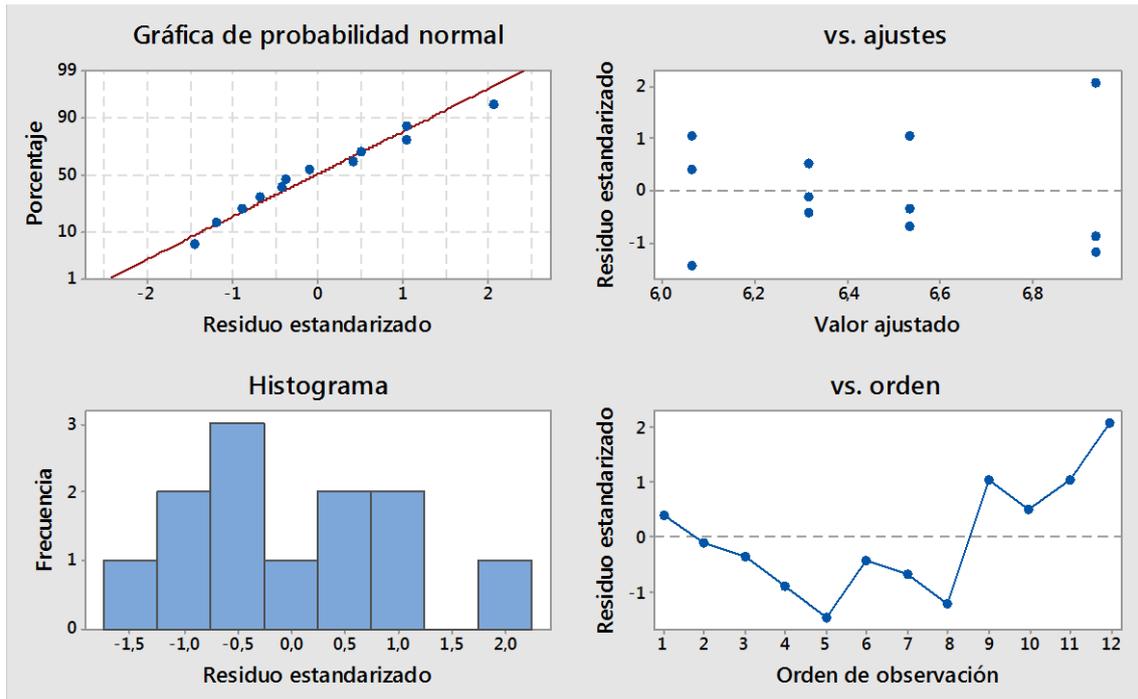
En la figura 2.11 se muestra el gráfico de cubos para visualización de la tendencia del Índice de Ryznar.



**Figura 2.11.** Gráfica de cubos para la variable respuesta R.

El gráfico de cubos de la figura 2.11 ilustra que al estar ambos factores en su menor nivel se tiene un Índice de Estabilidad de Ryznar (con valores de medias ajustadas) de menor valor (6.06 aprox.) que para los demás tratamientos, el mayor valor tendiendo a 7 se muestra cuando ambos factores están en su nivel mayor (6.94 aprox.); aunque siempre se mantiene dentro del rango entre 6 y 7, pero una conclusión con este gráfico se toma de manera preliminar como una discusión de los resultados del DOE al no haber normalidad, aleatoriedad y significancia de los datos.

Los gráficos de la figura 2.12 muestran la normalidad y aleatoriedad de los datos:



**Figura 2.12.** Gráficas de residuos para la variable respuesta *R*.

A partir de la figura 2.12 se puede interpretar lo siguiente:

- a. Del gráfico de probabilidad normal: se observa que hay puntos poco desviados de la línea recta siguiendo una tendencia curva.
- b. Del gráfico de residuos versus ajustes: se observa que los puntos quedan distribuidos en ambos lados del cero (positivo y negativo) con cierta aleatoriedad con dos puntos poco alejados en el lado derecho que corresponden arriba de 6.8 de *R*, se observa varianza casi constante al haber poca separación alrededor de 6.4.
- c. Del gráfico de residuos versus orden: los puntos muestran un patrón decreciente debajo de la línea central (valor cero) y luego un patrón creciente-decreciente-creciente hasta llegar encima del valor cero, vuelve a tender a crecer y a decrecer siguiendo patrones, por lo que no hay aleatoriedad.

- d. Del histograma: muestra que los datos (barras más altas) están agrupados al lado izquierdo, puede observarse un sesgo hacia la derecha, por lo que no hay un comportamiento de probabilidad (distribución) normal.

Por todo lo anterior, es notorio que no hay una distribución normal de los datos. Es necesario entonces realizar el experimento con mayor cantidad de muestras, para conocer si hay un L hay valores que sobre pasan el límite del equilibrio entre 0 y 1 (hay valores de 1.15 y 1.04 en la réplica 1; 1.26 y 1.06 en la réplica 2; 1.13 y 1.03 en la réplica 3) y para la variable R se observa que hay réplicas en las que sobrepasa el limite el equilibrio (poco arriba de 7) para formulaciones en las que se reduce el nivel de agua lluvia (Formulación de 50% A – 50% B), al estar ambos factores en el mayor nivel, pero **el diseño factorial muestra que puede corregirse este resultado al reducir la cantidad a emplear de sílice reduciendo la proporción de agua suave.**

Puede optarse también por una prueba no paramétrica al no obtener una distribución normal de los datos y sin ningún inconveniente proceder a realizar la prueba de hipótesis.

## **2.6. Técnicas, métodos e instrumentos de investigación.**

En el presente apartado se detalla la metodología a emplear para la etapa experimental que consiste en la determinación de la calidad del agua para uso en Torres de Enfriamiento mediante parámetros fisicoquímicos, los cuales son: pH, sílice, dureza total, alcalinidad total y sólidos disueltos totales. Para ello se sigue el procedimiento establecido en los Métodos Estándar para el Análisis de Aguas y Aguas Residuales (APHA, AWWA & WEF, 2018) con instrumentos y reactivos adquiridos con recursos propios, estos se detallan a continuación, mientras se expone la metodología a seguir para la medición de cara parámetro fisicoquímico.

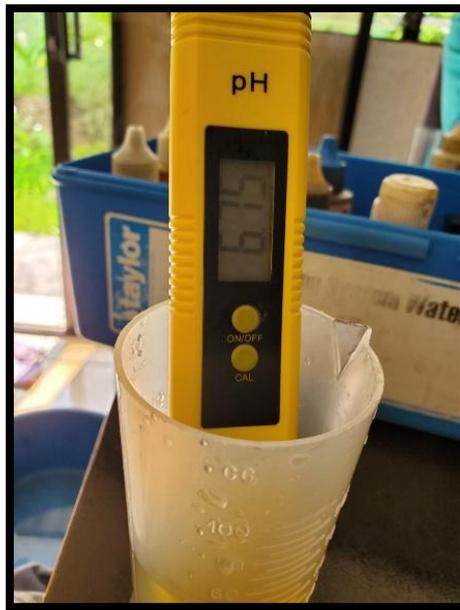
### **2.6.1. Medición de potencial Hidrógeno (pH).**

En la medición de *pH* se sigue el procedimiento del Número de Referencia Standard Methods 4500 - H<sup>+</sup>. Se mezclan y se agitan las muestras de agua lluvia, agua suave y la mezcla de ambas aguas para su homogeneidad, se procede a tomar la lectura del pH de las muestras de agua mediante el medidor digital portátil marca VIVOSUN (VIVOSUN, 2020).

Este medidor de pH tiene función de compensación de temperatura automática (ATC), por lo que puede determinar con precisión el valor de pH de la muestra a cualquier temperatura en un rango de 32.0°F a 140.0°F, no hay necesidad de cuidar la temperatura de la muestra de agua.

Para la calibración consultar el manual de usuario (APHA, AWWA & WEF, 2018), luego presione el botón "CAL" y sumergir el electrodo en la solución para calibrar el pH digital.

Para obtener fácilmente el resultado de la medición de pH del agua pulsar el botón "ON/OFF" y la lectura se muestra en la pantalla tal como se observa en la figura 2.13



**Figura 2.13.** Medición de pH a agua suavizada de la red de suministro ANDA.

### **2.6.2. Medición de Sílice (S).**

En la medición de Sílice se sigue el método de la USEPA 370.1 para aguas potables, aguas superficiales y salinas y el método estándar 4500-SiO<sub>2</sub>C para aguas domésticas e industriales, utilizando el HI770 Checker ® HC (colorímetro de mano), proporciona una manera simple, exacta y rentable de medir sílice (HANNA, 2020).

El procedimiento experimental es el siguiente:

- I. Enjuagar los depósitos de muestra (2 depósitos) con el agua de muestra.
- II. Colocar 10 mL de agua de muestra a cada uno de los depósitos.
- III. Identificar depósito 1 (blanco) y depósito 2 (analito).
- IV. Colocar en el depósito 2 (analito) el reactivo A, mezclar hasta disolver.
- V. Colocar en el depósito 2 (analito) el reactivo B, mezclar hasta disolver.
- VI. Dejar reposar el analito durante un tiempo de 10 minutos.
- VII. Colocar en depósito 2 (analito) el reactivo C, mezclar hasta disolver.
- VIII. Dejar reposar el analito durante un tiempo de 2 minutos.

- IX. Presionar el botón del HI770 Checker ® HC para encender, automáticamente se verá reflejado en la pantalla C1.
- X. Abrir la tapadera del HI770 Checker ® HC e introducir el depósito 1 (blanco), cerrar la tapadera y presionar el botón, se mostrará automáticamente reflejado en la pantalla C2.
- XI. Cuando en la pantalla aparezca reflejado C2, abrir la tapadera de HI770 Checker ® HC para retirar el depósito 1 (blanco) e introducir inmediatamente el depósito 2 (analito), cerrar la tapadera y presionar el botón para realizar la lectura.
- XII. Se mostrará automáticamente el valor de la lectura en la pantalla del HI770 Checker ® HC en unidades de concentración ppm.

La figura 2.14 muestra la fotografía del colorímetro utilizado para la determinación de la concentración de sílice.



**Figura 2.14.** Colorímetro HI770 Checker ® HC para determinación de sílice en aguas domésticas e industriales.

### 2.6.3. Medición de Dureza Total ( $D_T$ ).

Para la medida de la  $D_T$  se sigue el procedimiento del Número de Referencia Standard Methods 2340, método volumétrico con EDTA.

Esta normativa técnica se utiliza en aguas superficiales, subterráneas y efluentes domésticos e industriales.

La tabla 2.12 muestra el detalle de materiales y reactivos requeridos para la determinación de la dureza total en una muestra de agua.

**Tabla 2.12.** Material y reactivos para la medición de dureza total.

<b>Materiales</b>	<b>Reactivos</b>
1 Probeta de 25 mL	Reactivo 0619 Buffer de dureza
	Reactivo 0620 Polvo indicador de dureza
	Reactivo de dureza 0683

Fuente: (APHA, AWWA & WEF, 2018).

El procedimiento experimental es el siguiente (Siguiendo el “Drop Test” de Taylor, véase Anexo D):

- I. Enjuagar la probeta con el agua de muestra.
- II. Llenar la probeta hasta 25 mL con el agua de muestra.
- III. Agregar 5 gotas de Reactivo 0619 (Buffer de dureza) y una cucharadita de Reactivo 0620 (Polvo indicador de dureza).
- IV. Agitar hasta que se disuelva. La muestra se volverá rosada si hay presencia de dureza total. Si se vuelve azul la dureza total es cero.
- V. Agregar Reactivo 0683 (Reactivo de dureza) gota a gota, agitando y contándolas, hasta que el color cambie de rosado a azul. Siempre sostenga el frasco en posición vertical.

- VI. Multiplicar el número de gotas de Reactivo 0683 (Reactivo de dureza) por 10. Reportar como partes por millón de dureza total expresadas como carbonato de calcio.

La figura 2.15 muestra fotografías del análisis de dureza total realizado a las muestras colectadas para la realización del pre experimento.



**Figura 2.15.** Análisis de dureza total a muestra de agua suavizada.

#### **2.6.4. Medición de Alcalinidad total ( $A_T$ ).**

Para la medida de  $A_T$  se sigue el procedimiento del Número de Referencia Standard Methods 2320, método volumétrico con naranja de metilo.

Esta normativa técnica se utiliza para la determinación de alcalinidad en aguas naturales y tratadas. La Alcalinidad total es la atribuible a los iones hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos.

La tabla 2.13 muestra el detalle de materiales y reactivos requeridos para la determinación de la alcalinidad total en una muestra de agua.

**Tabla 2.13.** Material y reactivos para la medición de alcalinidad total.

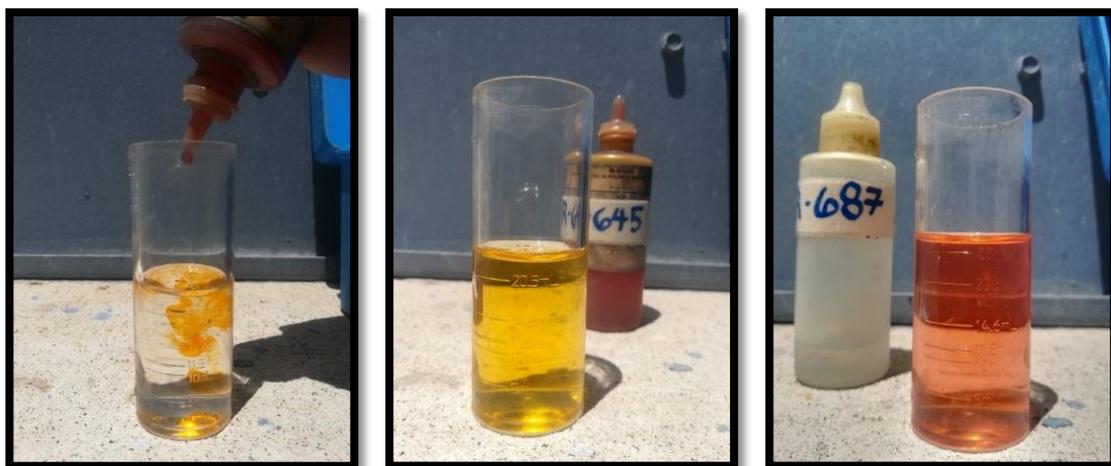
<b>Materiales</b>	<b>Reactivos</b>
1 Probeta de 25 mL	Reactivo 0638 Indicador de fenolftaleína
	Reactivo 0645 (Indicador de alcalinidad total)
	Reactivo 0687 (Ácido sulfúrico 0.12 N)

Fuente: (APHA, AWWA & WEF, 2018).

El procedimiento experimental es el siguiente (Siguiendo el “Drop Test” de Taylor, véase Anexo D):

- I. Enjuagar la probeta con el agua de muestra.
- II. Llenar la probeta hasta la marca de 25 mL con el agua de muestra.
- III. Agregar 3 gotas de reactivo 0638 (Indicador de fenolftaleína). Agite para mezclar. La muestra se volverá incolora. Siempre sostenga el frasco en posición vertical.
- IV. Agregar 3 gotas de Reactivo 0645 (Indicador de alcalinidad total). Agitar para mezclar. La muestra debería volverse verde.
- V. Agregar Reactivo 0687 (Ácido sulfúrico 0.12 N) gota a gota, agitando y contándolas hasta que el color cambie de verde a rosado.
- VI. Reporte el total de gotas (paso 5 más paso 6) como la lectura de la alcalinidad T (Total). Mantener siempre el frasco en posición vertical.
- VII. Multiplique la lectura T por 10. Repórtelas como ppm de alcalinidad T expresadas como carbonato de calcio.

La figura 2.16 muestra fotografías del análisis de alcalinidad total realizado a las muestras colectadas para la realización del pre experimento.



**Figura 2.16.** Análisis de alcalinidad total mediante método con naranja de metilo.

### 2.6.5. Medición de Sólidos Totales Disueltos (TDS).

Para la medición de *TDS* se sigue el procedimiento del Numero de Referencia Standard Methods 2540. Se utilizará el medidor digital TDS y EC (VIVOSUN, 2020), el cual tiene un amplio rango de medición de partes por millón y de temperatura (de 0 a 80°C). Es un medidor portátil de electro conductividad que no necesita ser calibrado (APHA, AWWA & WEF, 2018).

Este aparato combina *TDS*, EC (Conductividad eléctrica) y un medidor de temperatura (véase Anexo C), la tabla 2.14 muestra las especificaciones técnicas de dicho medidor.

**Tabla 2.14.** Especificaciones técnicas del medidor.

Parámetro/Indicador	Valor especificado
TDS	0 – 9990 ppm
Conductividad	0 – 9990 $\mu$ S
Temperatura	0.1 - 80 °C
	32 - 176 °F
Margen de error	$\pm$ 2%

Fuente: (APHA, AWWA & WEF, 2018).

El procedimiento para la medición es:

- I. Preparar las muestras de agua suave, agua lluvia y mezcla de ambas.
- II. Quitar la tapa protectora del medidor, presionar el botón ON/OFF.
- III. Luego sumergir el medidor en la muestra (la altura no debe superar la línea de inmersión)
- IV. Esperar hasta que la lectura se estabilice, presionar el botón HOLD para comprobar el resultado.
- V. Limpiar el electrodo después de usarlo, apagar el medidor y volver a colocar la tapa protectora.

La figura 2.17 muestra fotografías del análisis de sólidos disueltos totales realizado a las muestras colectadas para la realización del pre experimento.



**Figura 2.17.** Medición de TDS en ppm a muestra de agua suavizada.

### **3. CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE RESULTADOS.**

En este capítulo se presentan los resultados experimentales (véase en Anexo C las fotografías de la realización del experimento) de las mediciones de los parámetros fisicoquímicos de las muestras y a partir de estos, la obtención de las variables respuesta que tienen mayor incidencia por el efecto de la manipulación de los factores agua suavizada y agua lluvia. Además se muestra la estadística descriptiva de los resultados experimentales, las cuales son: la media aritmética como medida de tendencia central; desviación estándar, varianza y coeficiente de variación como medidas de dispersión.

También se presenta el análisis estadístico inferencial con el que se obtiene el estadístico de prueba de hipótesis junto con el valor  $p$  (probabilidad de error). Así mismo se incluye una prueba estadística para analizar la normalidad de los datos experimentales y concluir si el análisis inferencial para la prueba de hipótesis es determinante o no sobre las variables respuesta. Esto se realiza con la herramienta estadística Minitab (véase información de licencia en Anexo E).

Por lo tanto, con todos los parámetros mencionados junto con la correspondiente discusión de los resultados, conlleva a fundamentar las conclusiones de la presente propuesta y presentar recomendaciones para una mejora de esta.

#### **3.1. Reporte de resultados experimentales.**

Se realiza el experimento de acuerdo al diseño planteado en el capítulo 2, incrementando el número de réplicas a 10, con 4 corridas o tratamientos, para tener muestras representativas de la población y conocer la normalidad y aleatoriedad de los datos; como se observa en el diseño del experimento, los resultados muestran mejor respuesta en las variables  $C_C$ ,  $L$  y  $R$  al disminuir la cantidad de sílice a emplear, reduciendo la proporción de agua suave ( $V_S$ ) y aumentando la proporción de agua lluvia ( $V_L$ ) de manera razonable, por lo que se hace una ligera modificación de las formulaciones a analizar, como se muestra en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1.** Cantidades a emplear de agua suave y agua lluvia en el experimento.

Tipificación de la Formulación	Proporciones a emplear	Nivel del Factor A (agua suave)	Nivel del Factor B (agua lluvia)	Notación de Yates
F1	20% V <sub>S</sub> – 80% V <sub>L</sub>	-	-	(1)
F2	25% V <sub>S</sub> – 75% V <sub>L</sub>	+	-	a
F3	30% V <sub>S</sub> – 70% V <sub>L</sub>	-	+	b
F4	35% V <sub>S</sub> – 65% V <sub>L</sub>	+	+	ab

### 3.1.1. Resultados de las mediciones de los parámetros fisicoquímicos.

Se miden los parámetros fisicoquímicos del Agua Suavizada (Factor A) y del Agua Lluvia (Factor B), tal como se describe en el capítulo II; sin embargo para la determinación de estos parámetros en las mezclas formuladas, se realiza de manera teórica, debido a la limitación de recursos entorno a la pandemia del COVID19 durante la realización de esta investigación, por lo cual se tomó un promedio ponderado de las mediciones obtenidas de los factores A y B multiplicados por su respectivo % en volumen, como se detalla en la ecuación 3.1:

$$X_M = (X_A \times \%V_{FA}) + (X_B \times \%V_{FB})$$

**Ecuación 3.1.** Determinación de los parámetros fisicoquímicos de las mezclas formuladas.

Donde:

- i. X<sub>M</sub>: Parámetro fisicoquímico de la mezcla.
- ii. X<sub>A</sub>: Parámetro fisicoquímico del factor A.
- iii. X<sub>B</sub>: Parámetro fisicoquímico del factor B.
- iv. %V<sub>FA</sub>: Porcentaje en volumen del factor A.
- v. %V<sub>FB</sub>: Porcentaje en volumen del factor B.

Se opta por un promedio ponderado, al tener una mezcla de aguas que si bien son de diferente procedencia pero debido a la naturaleza química de éstas y que se

encuentran a temperatura y presión constantes, sus densidades son similares, sólo difieren en la concentración de iones disueltos presentes en cada una, en una cantidad lo suficientemente baja, por lo cual, se pueden considerar volúmenes aditivos y despreciar cualquier cambio de volumen producido en la mezcla.

En el Anexo A se muestran los resultados obtenidos en hoja de cálculo para las 10 réplicas del experimento. A continuación se muestran en las tablas 3.2 a la 3.4 los resultados para las primeras 3 réplicas.

**Tabla 3.2.** Resultados obtenidos de los parámetros fisicoquímicos para la réplica 1.

Parámetros Fisicoquímicos	Unidades	Agua Suavizada	Agua Lluvia	F 1: 20%A-80%B		F 2: 25%A-75%B		F 3: 30%A-70%B		F 4: 35%A-65%B	
				Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre
pH	-	7.04	6.35	6.49	8.27	6.52	8.26	6.56	8.25	6.59	8.2
TDS	ppm	310	17	75.60	584.54	90.25	570.00	104.90	559.96	119.55	552.62
Dureza total	ppm	0	10	8	60	8	50	7	40	7	30
Alcalinidad Total	ppm	170	10	40	330	50	330	60	310	70	310
Sílice	ppm	89	2	19.40	150	23.75	150	28.10	150	32.45	150

**Tabla 3.3.** Resultados obtenidos de los parámetros fisicoquímicos para la réplica 2.

Parámetros Fisicoquímicos	Unidades	Agua Suavizada	Agua Lluvia	F 1: 20%A-80%B		F 2: 25%A-75%B		F 3: 30%A-70%B		F 4: 35%A-65%B	
				Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre
pH	-	7.04	6.35	6.49	8.23	6.52	8.20	6.56	8.10	6.5915	8.10
TDS	ppm	325	20	81,00	607.50	96.25	595.36	111.50	586.84	126.75	580.53
Dureza total	ppm	0	10	8	60	8	50	7	40	7	30
Alcalinidad Total	ppm	170	10	40	310	50	300	60	300	60	290
Sílice	ppm	88	3	20.00	150	24.25	150	28.50	150	32.75	150

**Tabla 3.4.** Resultados obtenidos de los parámetros fisicoquímicos para la réplica 3.

Parámetros Fisicoquímicos	Unidades	Agua Suavizada	Agua Lluvia	F 1: 20%A-80%B		F 2: 25%A-75%B		F 3: 30%A-70%B		F 4: 35%A-65%B	
				Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre
pH	-	7.15	6.45	6.59	8.20	6.63	8.15	6.66	8.1	6.695	8.05
TDS	ppm	315	15	75.00	611.41	90.00	600.00	105.00	592.11	120	586.32
Dureza total	ppm	0	10	8	70	8	50	7	40	7	30
Alcalinidad Total	ppm	160	10	40	330	50	320	60	310	60	310
Sílice	ppm	84	2	18.40	150	22.50	150	26.60	150	30.70	150

### 3.1.2. Ejemplo de cálculo de parámetros fisicoquímicos.

Los parámetros fisicoquímicos del equipo de enfriamiento (torre) se obtienen a partir de los valores obtenidos de las formulaciones de mezclas de agua lluvia y agua suavizada y de los ciclos de concentración.

Al obtener el resultado del cálculo de ciclos de concentración que se detalla en la sección 3.1.4.1, se multiplica este por los siguientes parámetros fisicoquímicos de la formulación de mezclas: Sólidos Disueltos Totales ( $TDS$ ), Dureza Total ( $D_T$ ) y Alcalinidad Total ( $A_T$ ); como se muestra para el caso de la formulación F2, réplica 2 (tabla 3.3).

Con el valor calculado de ciclos de concentración para la formulación F2, réplica 2 (tabla 3.6) de  $C_{C, F1} = 6.2$ , se obtiene:

$$TDS_{F2, TORRE} = TDS_{F2} \times C_{C, F2} = 96.25 \times 6.2 = \mathbf{595.36}$$

$$D_{T, F2, TORRE} = D_{T, F2} \times C_{C, F2} = 8 \times 6.2 = \mathbf{46 \approx 50}$$

$$A_{T, F2 TORRE} = A_{T, F2} \times C_{C, F2} = 49 \times 6.2 = \mathbf{302 \approx 300}$$

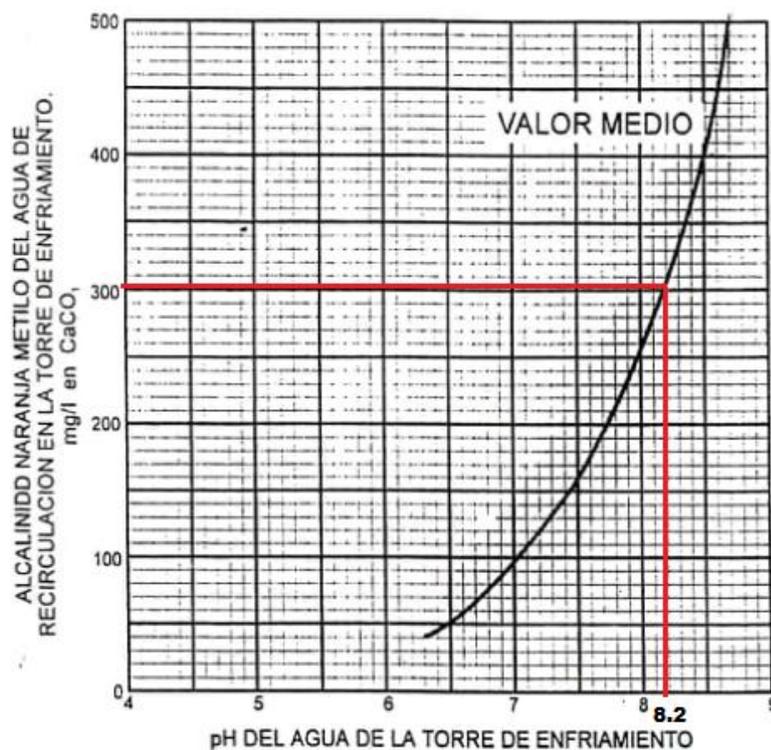
Es de aclarar que los valores empleados en los cálculos intermedios de multiplicación están aproximados (variable respuesta  $C_C$  a dos cifras significativas), los resultados obtenidos se realizaron en hoja de cálculo para mayor precisión.

También para los casos de los parámetros  $D_T$  y  $A_T$  se aproximan a valores enteros múltiplos de 10 ya que el método de medición instrumental se realiza por goteo (“drop”) y cada gota equivale a 10 ppm (véase Anexo D). Para fines de precisión en los cálculos de los índices de estabilidad, no se realiza la aproximación.

Para el caso de la concentración de sílice en la torre se emplea el valor máximo en el agua de recirculación, es decir 150 ppm.

Para obtener el pH del equipo de enfriamiento se hace uso del gráfico alcalinidad naranja de metilo del agua de recirculación en la torre de enfriamiento contra pH del agua de la torre de enfriamiento, de la figura 1.26.

Siempre de la tabla 3.3 (réplica 2) para la columna que corresponde a F2 se tiene la Alcalinidad Total del agua de recirculación en la torre de enfriamiento con un valor de 302 (aprox. 300) que se ubica en el eje de las ordenadas del gráfico de la figura 1.26 y donde corta con la curva de valor medio se ubica verticalmente hacia abajo al eje de abscisas que corresponde al valor de pH del equipo de enfriamiento con un valor aproximado de 8.2 (interpolado). Este procedimiento se ilustra en la figura 3.1:



**Figura 3.1.** Ejemplo de lectura de pH del agua de la torre para formulación F2, para réplica 2.  
Fuente: (Betz, 1991).

### 3.1.3. Resultados de las variables respuesta para cada formulación.

A partir de los resultados obtenidos se procede a la determinación de los valores de las variables respuesta con una temperatura estimada para el equipo de enfriamiento de 30.0°C, esta estimación se basa en la ficha técnica para el equipo Marley Clase W400 que establece un máximo de 48.9°C (Marley, 2009).

Se resume en las tablas 3.5 a la 3.7 dichos resultados para las primeras tres réplicas, en Anexo B se muestran los resultados para las 10 réplicas realizadas.

**Tabla 3.5.** Resultados de las variables respuesta a partir de los parámetros fisicoquímicos obtenidos en la réplica 1.

<b>Variable respuesta</b>	<b>F1</b>	<b>F2</b>	<b>F3</b>	<b>F4</b>
<b>Ciclos de Concentración (Cc)</b>	<b>8.4</b>	<b>6.8</b>	<b>5.7</b>	<b>4.9</b>
A	0.177	0.176	0.175	0.174
B	1.993	1.993	1.993	1.993
C	1.791	1.675	1.572	1.478
D	2.512	2.499	2.491	2.484
pH de saturación (pHs)	7.167	7.294	7.405	7.506
<b>Índice de Saturación de Langelier (L)</b>	<b>1.10</b>	<b>0.97</b>	<b>0.85</b>	<b>0.69</b>
<b>Índice de Estabilidad de Ryznar (R)</b>	<b>6.06</b>	<b>6.33</b>	<b>6.56</b>	<b>6.81</b>

**Tabla 3.6.** Resultados de las variables respuesta a partir de los parámetros fisicoquímicos obtenidos en la réplica 2.

<b>Variable respuesta</b>	<b>F1</b>	<b>F2</b>	<b>F3</b>	<b>F4</b>
<b>Ciclos de Concentración (Cc)</b>	<b>7.5</b>	<b>6.2</b>	<b>5.3</b>	<b>4.6</b>
A	0.178	0.177	0.177	0.176
B	1.993	1.993	1.993	1.993
C	1.778	1.666	1.566	1.474
D	2.488	2.479	2.473	2.469
pH de saturación (pHs)	7.206	7.325	7.431	7.527
<b>Índice de Saturación de Langelier (L)</b>	<b>1.02</b>	<b>0.87</b>	<b>0.67</b>	<b>0.57</b>
<b>Índice de Estabilidad de Ryznar (R)</b>	<b>6.18</b>	<b>6.45</b>	<b>6.76</b>	<b>6.95</b>

**Tabla 3.7.** Resultados de las variables respuesta a partir de los parámetros fisicoquímicos obtenidos en la réplica 3.

<b>Variable respuesta</b>	<b>F1</b>	<b>F2</b>	<b>F3</b>	<b>F4</b>
<b>Ciclos de Concentración (Cc)</b>	<b>8.2</b>	<b>6.7</b>	<b>5.6</b>	<b>4.9</b>
A	0.179	0.178	0.177	0.177
B	1.993	1.993	1.993	1.993
C	1.814	1.699	1.596	1.502
D	2.513	2.501	2.492	2.485
pH de saturación (pHs)	7.144	7.272	7.383	7.484
<b>Índice de Saturación de Langelier (L)</b>	<b>1.06</b>	<b>0.88</b>	<b>0.72</b>	<b>0.57</b>
<b>Índice de Estabilidad de Ryznar (R)</b>	<b>6.09</b>	<b>6.39</b>	<b>6.67</b>	<b>6.92</b>

### 3.1.4. Ejemplos de cálculo de las variables respuesta.

A continuación se muestran algunos ejemplos de cálculos de las variables respuesta  $C_c$ ,  $L$  y  $R$ ; los cuales se realizaron en hoja de cálculo.

#### 3.1.4.1. Ejemplo de cálculo de Ciclos de Concentración.

Tomando los valores de concentración de sílice de las mezclas formuladas y del máximo permitido en la torre de enfriamiento, de la tabla 3.3 (réplica 2) y con la ecuación 1.4 se realiza el cálculo según formulación:

- Para la formulación F1, 20% Agua Suave (Factor A) – 80% Agua Lluvia (Factor B):

$$C_{c,F1} = \frac{\text{ppm de sílice del agua de recirculación(máximo permitido en torre)}}{\text{ppm de sílice del agua de aportación a la torre (formulación)}}$$

$$C_{c,F1} = \frac{150 \text{ ppm}}{20.00 \text{ ppm}} = 7.5$$

- Para la formulación F2, 25% Agua Suave (Factor A) – 75% Agua Lluvia (Factor B):

$$C_{C,F2} = \frac{\text{ppm de sílice del agua de recirculación(máximo permitido en torre)}}{\text{ppm de sílice del agua de aportación a la torre (formulación)}}$$

$$C_{C,F2} = \frac{150 \text{ ppm}}{24.25 \text{ ppm}} = 6.2$$

- c. Para la formulación F3, 30% Agua Suave (Factor A) – 70% Agua Lluvia (Factor B):

$$C_{C,F3} = \frac{\text{ppm de sílice del agua de recirculación(máximo permitido en torre)}}{\text{ppm de sílice del agua de aportación a la torre (formulación)}}$$

$$C_{C,F3} = \frac{150 \text{ ppm}}{28.50 \text{ ppm}} = 5.3$$

- d. Para la formulación F4, 35% Agua Suave (Factor A) – 65% Agua Lluvia (Factor B):

$$C_{C,F4} = \frac{\text{ppm de sílice del agua de recirculación(máximo permitido en torre)}}{\text{ppm de sílice del agua de aportación a la torre (formulación)}}$$

$$C_{C,F4} = \frac{150 \text{ ppm}}{32.75 \text{ ppm}} = 4.6$$

Estos resultados se pueden comprobar en la tabla 3.6.

#### **3.1.4.2. Ejemplo de cálculo del Índice de Saturación de Langelier.**

Para el cálculo de esta variable respuesta se obtiene primero el valor del pH de saturación. Siempre tomando valores de la tabla 3.3 (réplica 2) para el cálculo de los factores A, B, C y D que están relacionados con las variables fisicoquímicas del equipo de enfriamiento (torre), con los que se obtiene el pH de saturación, del cual depende el Índice de Langelier.

Con la ecuación 1.10 se calculan los factores, para la formulación F2 (20% Agua Suave – 80% Agua Lluvia):

a. Factor relacionado con los TDS (Sólidos Disueltos Totales):

$$A_{F2} = \frac{(\log_{10} \text{TDS}_{[en\ mg/L]}) - 1}{10} = \frac{(\log_{10} 595.36) - 1}{10}$$
$$\mathbf{A_{F2} = 0.177}$$

b. Factor relacionado con la Temperatura:

$$B_{F2} = [-13.12 \log_{10}(T_{[en\ ^\circ C]} + 273)] + 34.55$$
$$B_{F2} = [-13.12 \log_{10}(30.0 + 273)] + 34.55$$
$$\mathbf{B_{F2} = 1.993}$$

c. Factor relacionado con la Dureza Total:

$$C_{F2} = \log_{10}[\text{Dureza total en ppm como CaCO}_3] = \log_{10}[46]$$
$$\mathbf{C_{F2} = 1.666}$$

d. Factor relacionado con la Alcalinidad Total:

$$D_{F2} = \log_{10}[\text{Alcalinidad en ppm como CaCO}_3] = \log_{10}[302]$$
$$\mathbf{D_{F2} = 2.479}$$

Con la ecuación 1.9 se calcula el pH de saturación:

$$pH_{s,F2} = (9.3 + A + B) - (C + D)$$
$$pH_{s,F2} = (9.3 + 0.177 + 1.993) - (1.666 + 2.479)$$
$$\mathbf{pH_{s,F2} = 7.33}$$

Luego, con este y el valor de pH de la torre (tabla 3.3) se sustituye en la ecuación 1.5 y se obtiene el índice de Saturación de Langelier para la formulación F2:

$$L_{F2} = \text{pH}_{(\text{real}),F2} - \text{pH}_{s,F2} = 8.20 - 7.33$$

$$L_{F2} = \mathbf{0.87}$$

Estos resultados se pueden comprobar en la tabla 3.6, columna para F2.

### 3.1.4.3. Ejemplo de cálculo del Índice de Estabilidad de Ryznar.

Siguiendo con los datos para la formulación F2 con las tablas 3.3 y 3.6 (réplica 2), el Índice de Estabilidad de Ryznar se calcula con la ecuación 1.7 de manera análoga al proceso realizado en el cálculo del Índice de Saturación de Langelier:

$$R_{F2} = 2\text{pH}_{s,F2} - \text{pH}_{\text{real},F2} = 2(7.325) - 8.20$$

$$R_{F2} = \mathbf{6.45}$$

Este resultado se puede comprobar en la tabla 3.6, columna para F1.

## 3.2. Estadística descriptiva de los resultados.

(Minitab, 2019)

Para describir los datos obtenidos de las muestras se usa como medida de tendencia central la media aritmética o promedio y como medidas de dispersión la desviación estándar, la varianza y el coeficiente de variación; esto para tener una exposición preliminar de la distribución de los datos en torno al valor central y el grado de dispersión de estos.

### 3.2.1. Media aritmética.

En la tabla 3.8 se muestran los promedios de las mediciones experimentales de los parámetros fisicoquímicos de las 4 mezclas formuladas para las 10 réplicas, de los valores para la torre de enfriamiento y en la tabla 3.9 los promedios obtenidos para las variables respuesta.

**Tabla 3.8.** Media aritmética de parámetros fisicoquímicos medidos para las 10 réplicas del experimento para las 4 mezclas formuladas.

<b>MEDIA ARITMÉTICA DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS</b>									
<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>F 1: 20%A-80%B</b>		<b>F 2: 25%A-75%B</b>		<b>F 3: 30%A-70%B</b>		<b>F 4: 35%A-65%B</b>	
		<b>Mezcla</b>	<b>Torre</b>	<b>Mezcla</b>	<b>Torre</b>	<b>Mezcla</b>	<b>Torre</b>	<b>Mezcla</b>	<b>Torre</b>
pH	-	6.47	8.24	6.52	8.21	6.56	8.19	6.61	8.17
TDS	ppm	78.92	628.86	94.25	616.49	109.58	607.88	124.91	601.56
Dureza Total	ppm	8	60	8	50	7	40	7	30
Alcalinidad Total	ppm	40	320	48	310	60	310	60	300
Sílice	ppm	18.84	150.00	22.95	150.00	27.06	150.00	31.17	150.00

**Tabla 3.9.** Media aritmética de las variables respuesta de las 10 réplicas del experimento para las 4 mezclas formuladas.

<b>MEDIA ARITMÉTICA DE LAS VARIABLES RESPUESTA</b>				
<b>Variable Respuesta</b>	<b>F1</b>	<b>F2</b>	<b>F3</b>	<b>F4</b>
<b>Ciclos de concentración</b>	<b>8.0</b>	<b>6.5</b>	<b>5.5</b>	<b>4.8</b>
A	0.180	0.179	0.178	0.178
B	1.993	1.993	1.993	1.993
C	1.804	1.691	1.589	1.495
D	2.504	2.493	2.485	2.479
pH de saturación	7.165	7.289	7.398	7.497
<b>Índice de Langelier</b>	<b>1.07</b>	<b>0.92</b>	<b>0.79</b>	<b>0.67</b>
<b>Índice de Ryznar</b>	<b>6.09</b>	<b>6.37</b>	<b>6.61</b>	<b>6.83</b>

### 3.2.2. Desviación estándar.

Denotada como  $s$ , indica qué tan dispersos están los datos alrededor de la media. En la tabla 3.10 se muestran las desviaciones respecto a la media para los parámetros fisicoquímicos y en la tabla 3.11 para las variables respuesta, observándose que para la alcalinidad total, TDS y ciclos de concentración se muestran los mayores valores, aunque no tan robustos, lo que indica que los datos no están muy dispersos.

**Tabla 3.10.** Desviación estándar de parámetros fisicoquímicos medidos para las 10 réplicas del experimento para las 4 mezclas formuladas.

DESVIACIÓN ESTÁNDAR PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS									
Parámetro	Unidades	F 1: 20%A-80%B		F 2: 25%A-75%B		F 3: 30%A-70%B		F 4: 35%A-65%B	
		Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre
Potencial Hidrógeno	pH	0.11	0.03	0.10	0.03	0.09	0.05	0.09	0.05
TDS	ppm	2.74	28.53	2.96	26.52	3.20	25.40	3.45	24.74
Dureza Total	ppm	0.00	1.98	0.00	1.39	0.00	1.05	0.00	0.82
Alcalinidad Total	ppm	0.99	7.52	1.24	6.41	1.49	5.85	1.74	5.57
Sílice	ppm	0.59	0.00	0.66	0.00	0.75	0.00	0.83	0.00

**Tabla 3.11.** Desviación estándar de las variables respuesta de las 10 réplicas del experimento para las 4 mezclas formuladas.

<b>DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LAS VARIABLES RESPUESTA</b>				
<b>Variable Respuesta</b>	<b>F1</b>	<b>F2</b>	<b>F3</b>	<b>F4</b>
<b>Ciclos de concentración</b>	<b>0.25</b>	<b>0.19</b>	<b>0.15</b>	<b>0.13</b>
A	0.00	0.00	0.00	0.00
B	0.00	0.00	0.00	0.02
C	0.01	0.01	0.01	0.01
D	0.01	0.01	0.01	0.01
pH de saturación	0.02	0.02	0.02	0.01
<b>Índice de Langelier</b>	<b>0.04</b>	<b>0.04</b>	<b>0.06</b>	<b>0.05</b>
<b>Índice de Ryznar</b>	<b>0.06</b>	<b>0.05</b>	<b>0.07</b>	<b>0.06</b>

### 3.2.3. Coeficiente de variación.

Denotada como COV, este estadístico describe la variación en los datos en relación con la media, es decir qué tan dispersos están los datos de manera que muestra mejores resultados para interpretación que la desviación estándar por tener un ajuste que permite comparar la variación de los datos que tienen unidades diferentes o medias muy diferentes entre ellos, como se puede ver en las tablas 3.12 para parámetros fisicoquímicos y 3.13 para variables respuesta, los datos no muestran valores altos por lo que no hay mucha variación.

**Tabla 3.12.** Coeficiente de Variación de parámetros fisicoquímicos medidos para las 10 réplicas del experimento para las 4 mezclas.

<b>COEFICIENTE DE VARIACIÓN PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS</b>									
Parámetro	Unidades	F 1: 20%A-80%B		F 2: 25%A-75%B		F 3: 30%A-70%B		F 4: 35%A-65%B	
		Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre
pH	-	0.02	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
TDS	-	0.03	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04
Dureza Total	-	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.03
Alcalinidad Total	-	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02
Sílice	-	0.03	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00

**Tabla 3.13.** Coeficiente de Variación de las variables respuesta de las 10 réplicas del experimento para las 4 mezclas formuladas.

<b>COEFICIENTE DE VARIACIÓN VARIABLES RESPUESTA</b>				
Variable Respuesta	F1	F2	F3	F4
<b>Ciclos de concentración</b>	<b>0.03</b>	<b>0.03</b>	<b>0.03</b>	<b>0.03</b>
A	0.01	0.01	0.01	0.01
B	0.00	0.00	0.00	0.00
C	0.01	0.01	0.01	0.01
D	0.00	0.00	0.00	0.00
pH de saturación	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Índice de Langelier</b>	<b>0.04</b>	<b>0.04</b>	<b>0.07</b>	<b>0.08</b>
<b>Índice de Ryznar</b>	<b>0.01</b>	<b>0.01</b>	<b>0.01</b>	<b>0.01</b>

### 3.2.4. Varianza.

La varianza mide qué tan dispersos están los datos alrededor de su media. La varianza es igual a la desviación estándar elevada al cuadrado por lo que si bien no brinda demasiada información, su cálculo es necesario para obtener el valor de otros parámetros como en el caso de la prueba de hipótesis ANOVA de Fisher que se basa en esta medida de dispersión y la media aritmética. Los valores que muestran las tablas 3.14 (varianza para parámetros fisicoquímicos) y 3.15 (varianza para variables respuesta) tienen unidades elevadas al cuadrado.

**Tabla 3.14.** Varianza de parámetros fisicoquímicos medidos para las 10 réplicas del experimento para las 4 mezclas.

VARIANZA DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS									
Parámetro	Unidades	F 1: 20%A-80%B		F 2: 25%A-75%B		F 3: 30%A-70%B		F 4: 35%A-65%B	
		Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre
pH	-	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
TDS	ppm <sup>2</sup>	7.50	813.97	8.75	703.25	10.22	645.17	11.90	611.97
Dureza Total	ppm <sup>2</sup>	0.00	3.91	0.00	1.94	0.00	1.10	0.00	0.67
Alcalinidad Total	ppm <sup>2</sup>	0.99	56.56	1.55	41.06	2.23	34.18	3.03	31.00
Sílice	ppm <sup>2</sup>	0.35	0.00	0.44	0.00	0.56	0.00	0.70	0.00

**Tabla 3.15.** Varianza de las variables respuesta de las 10 réplicas del experimento para las 4 mezclas formuladas.

<b>VARIANZA DE VARIABLES RESPUESTA</b>				
<b>Variable Respuesta</b>	<b>F1</b>	<b>F2</b>	<b>F3</b>	<b>F4</b>
<b>Ciclos de concentración</b>	<b>0.06</b>	<b>0.03</b>	<b>0.02</b>	<b>0.02</b>
A	0.00	0.00	0.00	0.00
B	0.00	0.00	0.00	0.00
C	0.00	0.00	0.00	0.00
D	0.00	0.00	0.00	0.00
pH de saturación	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Índice de Langelier</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
<b>Índice de Ryznar</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>

### 3.3. Análisis de Normalidad de Anderson y Darling (AD).

(Minitab, 2019)

Para las tres variables respuesta  $C_c$ ,  $L$  y  $R$  se realiza el presente análisis de normalidad, ya que estas son las que expresan los criterios para establecer o indicar la estabilidad o equilibrio en el agua para la torre de enfriamiento (variables  $L$  y  $R$ ), así como el drenaje o sangrado (variable  $C_c$ ), a partir de los parámetros fisicoquímicos medidos.

Se opta por el análisis AD para conocer si los datos de las muestras provienen de una distribución de probabilidad continua específica, es decir una distribución normal; esta prueba está basada en las hipótesis:

- I.  **$H_0$ : Las variables aleatorias siguen una distribución normal.**
- II.  **$H_1$ : Las variables aleatorias no siguen una distribución normal.**

Esto a través del estadístico de prueba ***A cuadrado o AD***, calculado su valor con el software estadístico Minitab se procede a comparar con el valor AD crítico obtenido del apéndice E de Law (1991):

Para una distribución normal con un nivel de confianza del 95%, el **valor crítico del estadístico de Anderson y Darling ( $AD_c$ ) es 0.751**.

Comparando el valor crítico del estadístico AD con el obtenido de la prueba de normalidad, se establece si se acepta o rechaza  $H_0$ , si:

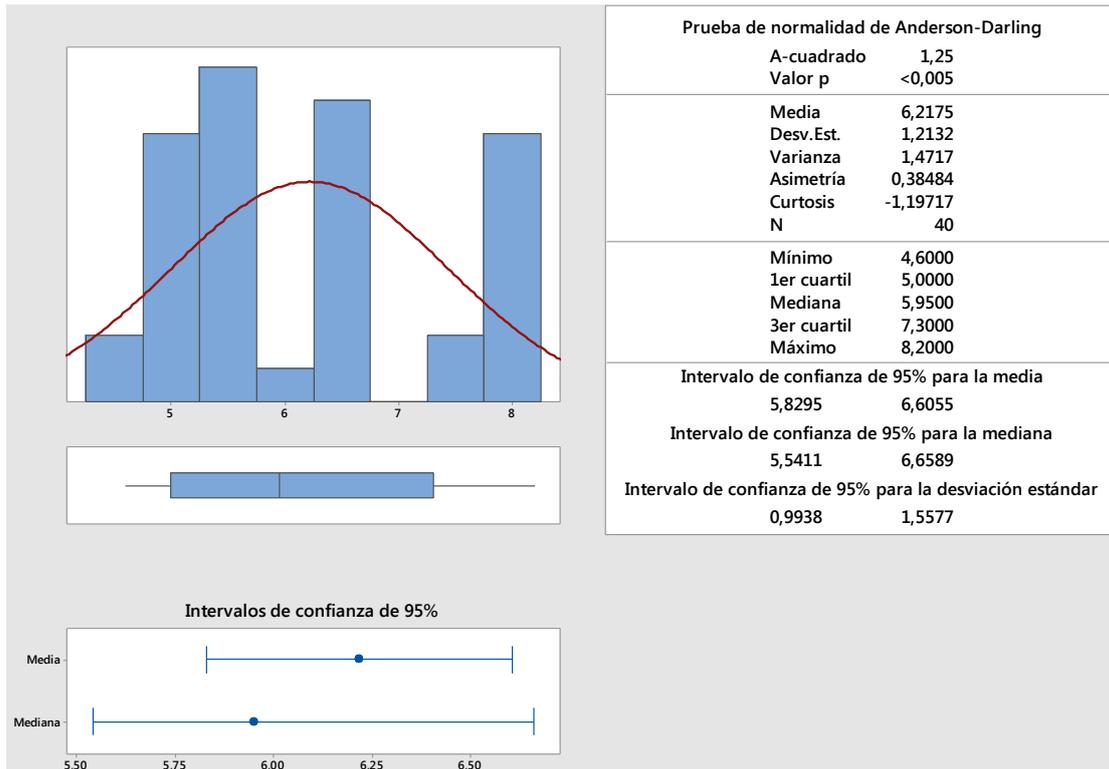
- a.  **$AD > AD_c$** : Los datos no siguen una distribución normal (Rechazar  $H_0$  o bien aceptar  $H_1$ )
- b.  **$AD \leq AD_c$** : Los datos siguen una distribución normal (Aceptar  $H_0$ )

O por medio del valor p (Minitab, 2019):

- a.  **$p \leq \alpha$** : Los datos no siguen una distribución normal (Rechazar  $H_0$  o bien aceptar  $H_1$ )
- b.  **$p > \alpha$** : No se puede concluir que los datos no siguen una distribución normal (Aceptar  $H_0$ )

### **3.3.1. Análisis de Normalidad AD para la variable $C_C$ .**

El cálculo para el análisis de normalidad AD se realiza en programa estadístico y se muestran los resultados junto con un informe resumen gráfico en la figura 3.2 para la variable respuesta  $C_C$ :



**Figura 3.2.** Prueba de normalidad AD y estadísticos descriptivos para la variable respuesta  $C_c$ .

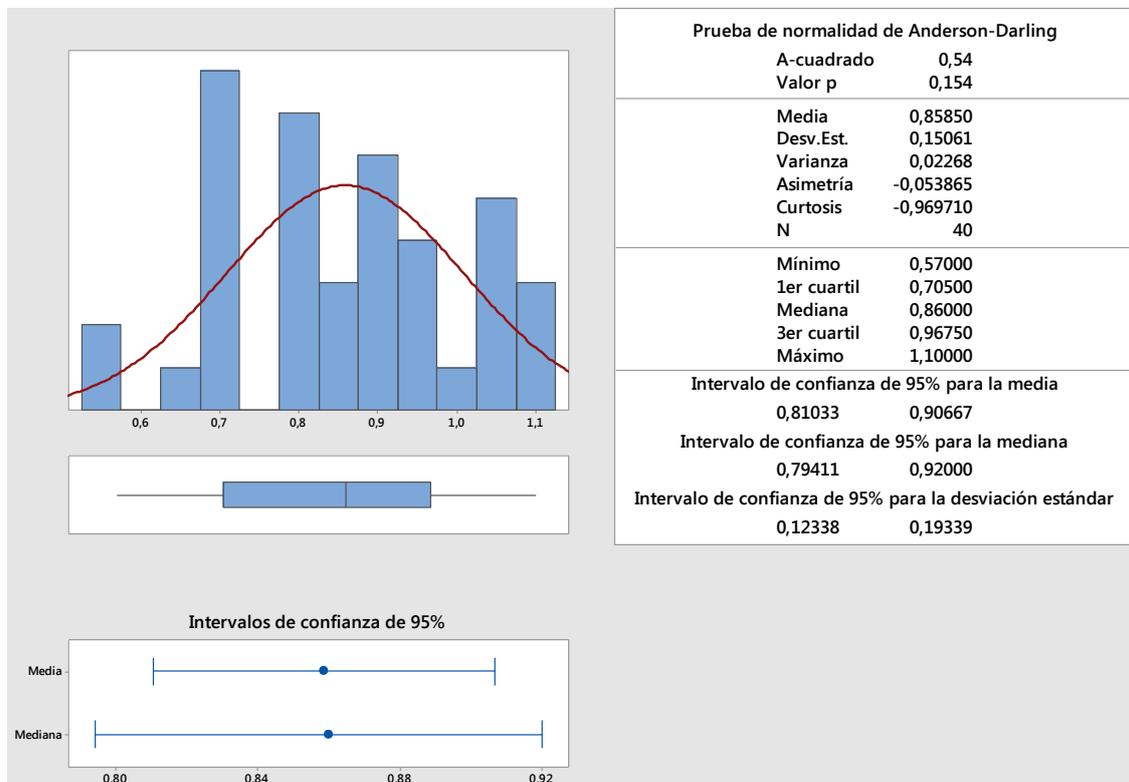
De la figura 3.2 se observa que para un nivel de confianza del 95% se interpretan los estadísticos de la siguiente manera:

- AD o A cuadrado: 1.25** el cual es mayor a 0.751, se rechaza  $H_0$ : los datos no siguen una distribución normal.
- Valor p: <0.005** menor que 0.05 por lo que se rechaza  $H_0$ , es decir los datos no son normales.
- Los valores de la media aritmética, desviación estándar y varianza muestran valores diferentes de los presentados en las tablas 3.9, 3.11 y 3.15 ya que en esta figura se muestra el análisis para todas las formulaciones.
- Coficiente de Asimetría de aprox. 0.385**, positiva lo que indica que la cola de distribución (ver campana en el histograma) se alarga a la derecha (valores superiores a la media).

- e. **Coefficiente de Curtosis: aprox. -1.197**, negativa y diferente de  $\pm 0.5$  por tanto *platicúrtica* (curva aplanada), es decir de baja concentración como se ilustra en la campana.

### 3.3.2. Análisis de Normalidad AD para la variable L.

La figura 3.3 muestra los resultados del análisis de normalidad AD obtenido de programa estadístico junto con un informe resumen gráfico para la variable respuesta L:



**Figura 3.3.** Prueba de normalidad AD y estadísticos descriptivos para la variable respuesta L.

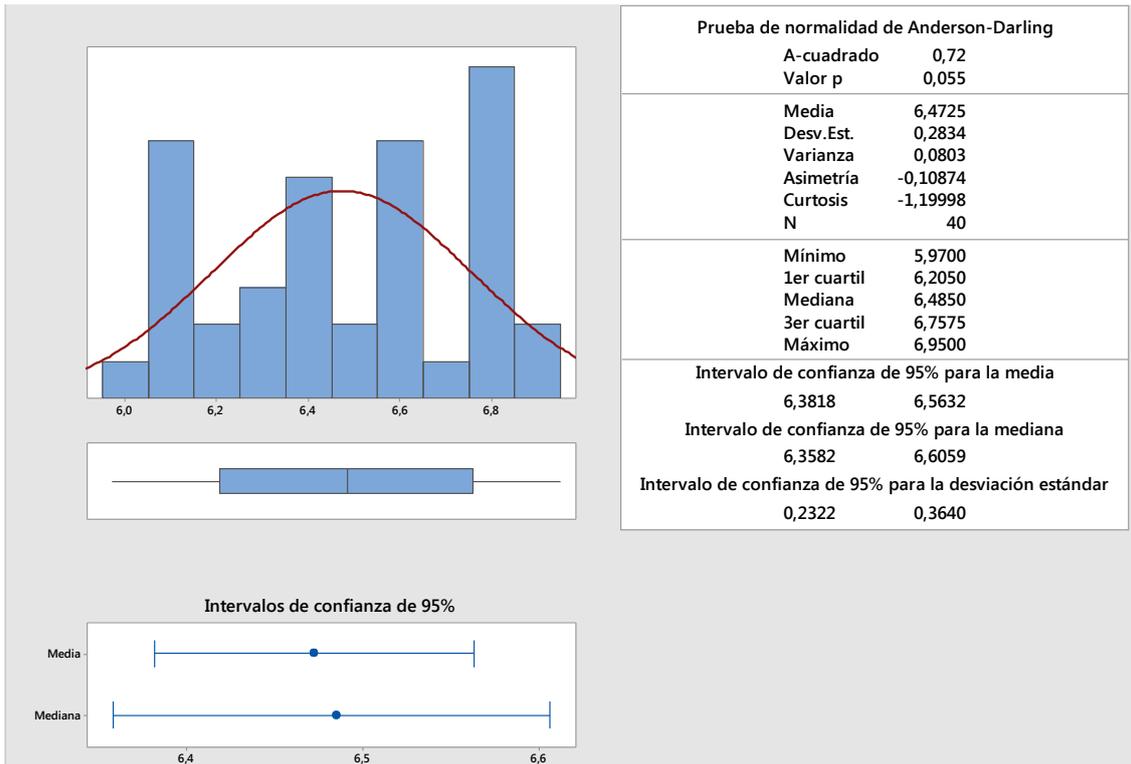
De la figura 3.3 se observa que para un nivel de confianza del 95% se interpretan los estadísticos de la siguiente manera:

- a. **AD o A cuadrado: 0.54** el cual es menor a 0.751, se acepta  $H_0$ : los datos siguen una distribución normal.

- b. **Valor p: 0.154** mayor que 0.05 por lo que no se puede rechazar  $H_0$ , es decir aceptar  $H_0$ : los datos siguen una distribución normal.
- c. Los valores de la media aritmética, desviación estándar y varianza muestran valores diferentes de los presentados en las tablas 3.9, 3.11 y 3.15 ya que en esta figura se muestra el análisis para todas las formulaciones.
- d. **Coefficiente de Asimetría de aprox. -0.0539**, negativo pero cercana a cero, lo que indica que la cola de distribución (ver campana en el histograma) se alarga un poco a la izquierda (valores inferiores a la media) sin embargo es un valor muy pequeño por lo que se puede aproximar a una curva normal.
- e. **Coefficiente de Curtosis: aprox. -0.970**, negativo (casi platicúrtica o achatada).

### 3.3.3. Análisis de Normalidad AD para la variable *R*.

La figura 3.4 muestra los resultados del análisis de normalidad AD junto con un informe resumen gráfico para la variable respuesta *R*:



**Figura 3.4.** Prueba de normalidad AD y estadísticos descriptivos para la variable respuesta R.

De la figura 3.4 se observa que para un nivel de confianza del 95% se interpretan los estadísticos de la siguiente manera:

- AD o A cuadrado: 0.72** el cual es menor a 0.751, se acepta  $H_0$ : los datos siguen una distribución normal.
- Valor p: 0.055** mayor que 0.05 por lo que se acepta  $H_0$ : los datos siguen una distribución normal.
- Los valores de la media aritmética, desviación estándar y varianza muestran valores diferentes de los presentados en las tablas 3.9, 3.11 y 3.15 ya que en esta figura se muestra el análisis para todas las formulaciones.
- Coficiente de Asimetría de aprox. -0.109**, negativa lo que indica que la cola de distribución (ver campana en el histograma) se alarga un poco a

la izquierda (valores inferiores a la media) sin embargo es un valor numérico muy pequeño por lo que se puede aproximar a una curva normal.

- e. **Coefficiente de Curtosis: aprox. -1.2**, negativa y diferente de -0.5 por tanto la distribución tiene tendencia *platicúrtica* (achatada): de baja concentración o achatada.

### 3.4. Estadística inferencial de los resultados.

La estadística inferencial es una herramienta que permite, a partir los datos obtenidos de una muestra de una población, sean estos analizados por medio de la estimación de parámetros o variables estadísticas, con los que se puedan inferir (estimar) valores poblacionales con los cuales se obtienen conclusiones útiles para hacer deducciones sobre una totalidad con la información numérica de la muestra.

En el capítulo 2 se analiza el diseño experimental para conocer los efectos individuales de los factores (variables independientes) y la interacción entre estos sobre las variables dependientes a través de las variables respuesta, lo que permitió conocer las corridas experimentales (también llamadas tratamientos) a realizar. Del diseño experimental (Diseño Factorial  $2^k$ ) se obtiene el análisis de varianza de Fisher (ANOVA) que proporciona el valor F que es el estadístico para la prueba de hipótesis, del que se calcula también el valor p o probabilidad del error que se compara con el nivel de significancia estadística ( $\alpha$ ) (Minitab, 2019).

Del diseño experimental previo se conoce que fue necesario incrementar el número de réplicas para obtener datos representativos de la población y conocer su distribución; se realizaron 10 réplicas por cada tratamiento (4 formulaciones de mezclas según diseño  $2^2$ ) para un total de 40 muestras.

### 3.4.1. ANOVA de las Variables Respuesta.

Se realiza el ANOVA de las variables respuesta  $C_c$ ,  $L$  y  $R$  contra las variables independientes  $V_s$  y  $V_L$ , a partir de las mediciones de los parámetros fisicoquímicos en el experimento, obteniendo los siguientes resultados en las tablas 3.16 a la 3.18:

**Tabla 3.16.** ANOVA de la variable respuesta  $C_c$  contra  $V_s$  y  $V_L$ .

ANOVA $C_c$ contra $V_s$ y $V_L$					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	56.219	18.7396	572.20	0.000
Lineal	2	55.029	27.5143	840.13	0.000
Agua Suave	1	11.556	11.5563	352.86	0.000
Agua Lluvia	1	43.472	43.4723	1327.40	0.000
Interacciones de 2 términos	1	1.190	1.1902	36.34	0.000
Agua suave*Agua Lluvia	1	1.190	1.1902	36.34	0.000
Error	36	1.179	0.0328		
Total	39	57.398			

**Tabla 3.17.** ANOVA de la variable respuesta  $L$  contra  $V_s$  y  $V_L$ .

ANOVA $L$ contra $V_s$ y $V_L$					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	0.797890	0.265963	110.28	0.000
Lineal	2	0.796450	0.398225	165.12	0.000
Agua Suave	1	0.151290	0.151290	62.73	0.000
Agua Lluvia	1	0.645160	0.645160	267.52	0.000
Interacciones de 2 términos	1	0.001440	0.001440	0.60	0.445
Agua suave*Agua Lluvia	1	0.001440	0.001440	0.60	0.445
Error	36	0.086820	0.002412		
Total	39	0.884710			

**Tabla 3.18.** ANOVA de la variable respuesta *R* contra  $V_s$  y  $V_L$ .

ANOVA R contra $V_s$ y $V_L$					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	3.00971	1.00324	292.11	0.000
Lineal	2	3.00130	1.50065	436.94	0.000
Agua Suave	1	0.61009	0.61009	177.64	0.000
Agua Lluvia	1	2.39121	2.39121	696.24	0.000
Interacciones de 2 términos	1	0.00841	0.00841	2.45	0.126
Agua suave*Agua Lluvia	1	0.00841	0.00841	2.45	0.126
Error	36	0.12364	0.00342		
Total	39	3.13335			

### 3.4.2. Interpretación con gráficos factoriales.

En el presente apartado se muestran los gráficos factoriales del DOE para las tres variables respuesta  $C_c$ ,  $L$  y  $R$ . Los cuales son: Pareto de efectos estandarizados, Cubos y Residuos.

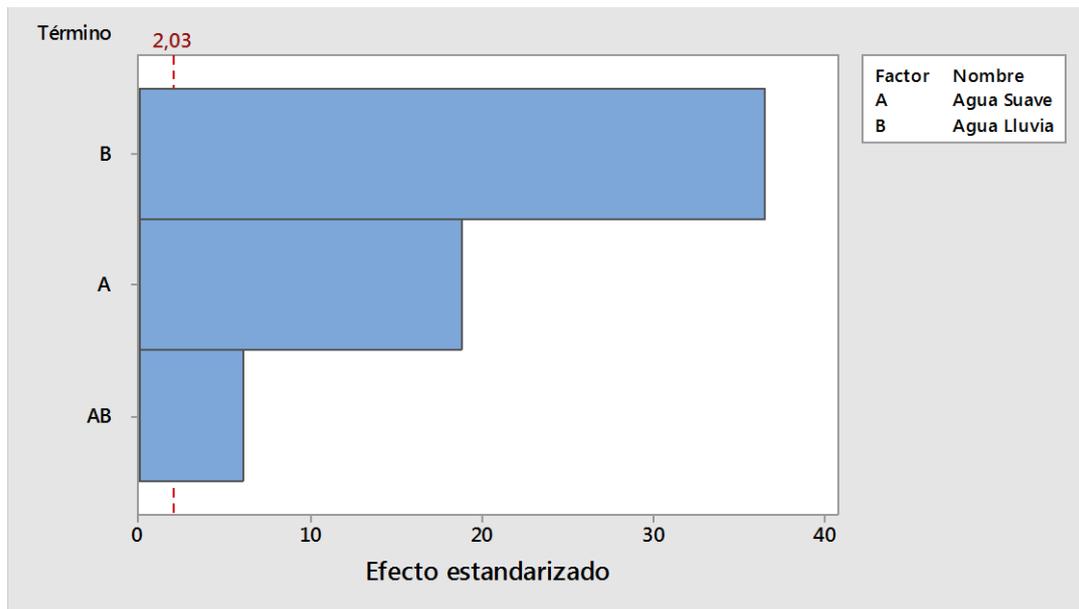
#### 3.4.2.1. Pareto de efectos estandarizados.

(Minitab, 2019)

Las figuras 3.5 a la 3.7 muestran los gráficos factoriales Pareto de efectos estandarizados para las variables respuesta  $C_c$ ,  $L$  y  $R$ . A continuación se describe el análisis de éstos.

- I. **Variable respuesta  $C_c$ :** En la gráfica de la figura 3.5 se ilustra (para un  $\alpha=0.05$ ) que los factores individuales A (Agua Suave) y B (Agua Lluvia) y la interacción de estos (AB) tienen efecto sobre la variable respuesta Ciclos de concentración, pues las tres barras cruzan la línea de referencia que determina la significancia estadística con un valor de 2.03 (La barra de B con valor de estandarizado de su efecto de 36.4335, A con 18.7846 y AB con 6.02856).

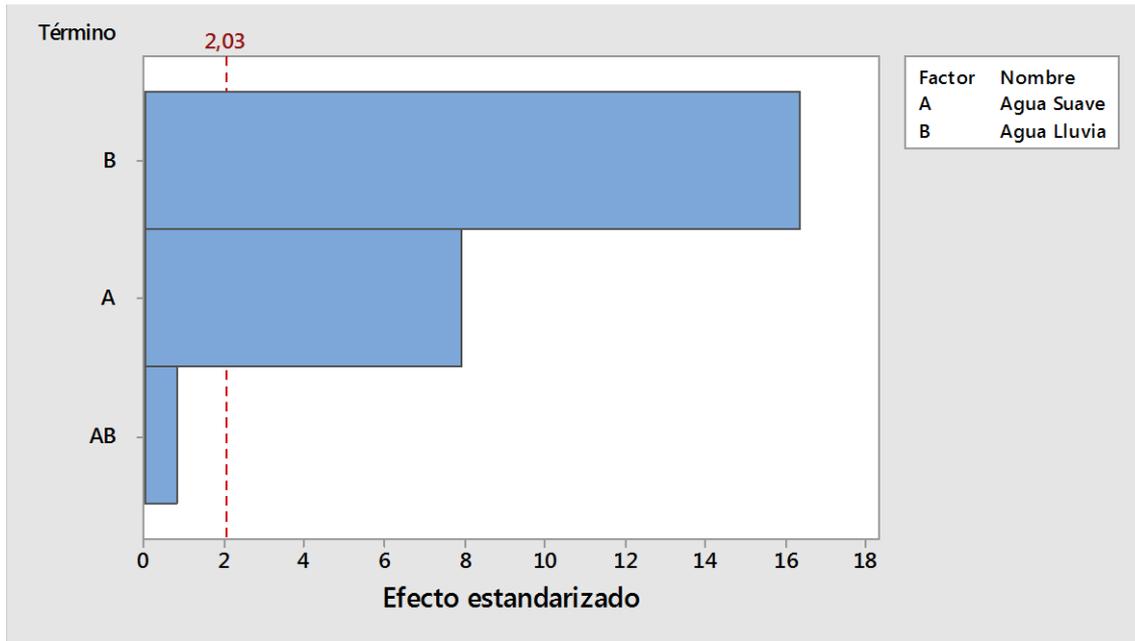
Lo cual tiene sentido ya que la variable  $C_c$  depende de la cantidad de sílice empleada o contenida en el agua para enfriamiento, que a su vez depende de las proporciones usadas de agua lluvia y agua suavizada.



**Figura 3.5.** Pareto de efectos estandarizados para la variable respuesta  $C_c$ .

- II. **Variable respuesta L:** En la gráfica de la figura 3.6 se ilustra (para un  $\alpha=0.05$ ) que los factores individuales A (Agua Suave) y B (Agua Lluvia) sí tienen efecto sobre la variable respuesta Índice de Saturación de Langelier, pues las dos barras cruzan la línea de referencia que determina la significancia estadística con un valor de 2.03 (La barra de B con valor de estandarizado de su efecto de 16.3559, A con 7.92039). Sin embargo la interacción entre los factores AB no tiene efecto sobre la variable L ya que la barra correspondiente no cruza la línea de referencia (Barra de AB con valor de efecto estandarizado de 0.772721).

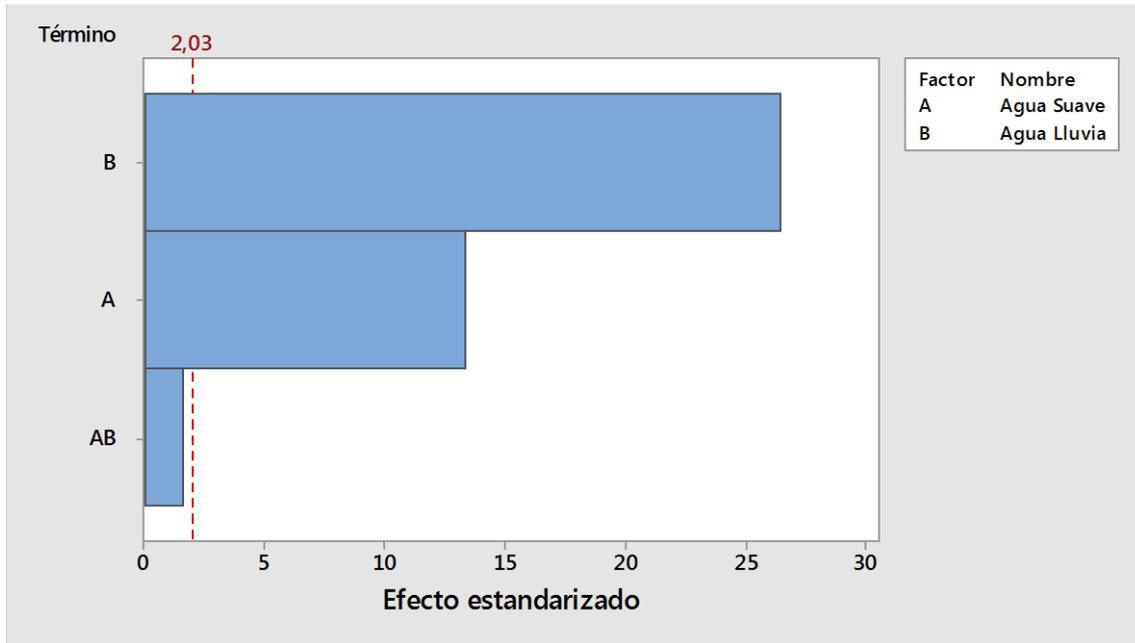
Lo cual tiene sentido ya que esta variable mide la calidad del agua para el equipo de enfriamiento y se obtiene de los parámetros fisicoquímicos de la torre a partir de la variable  $C_c$ , por lo que no depende directamente de la concentración de sílice.



**Figura 3.6.** Pareto de efectos estandarizados para la variable *L*.

- III. **Variable respuesta R:** En la gráfica de la figura 3.7 se ilustra (para un  $\alpha=0.05$ ) que los factores individuales A (Agua Suave) y B (Agua Lluvia) sí tienen efecto sobre la variable respuesta Índice de Saturación de Langelier, pues las dos barras cruzan la línea de referencia que determina la significancia estadística con un valor de 2.03 (La barra de B con valor de estandarizado de su efecto de 26.3864, A con 13.3281). Sin embargo la interacción entre los factores AB no tiene efecto sobre la variable R ya que la barra correspondiente no cruza la línea de referencia (Barra de AB con valor de efecto estandarizado de 1.56484).

Lo cual tiene sentido ya que esta variable mide la calidad del agua para el equipo de enfriamiento (haciendo una corrección a la variable *L*) y se obtiene de los parámetros fisicoquímicos de la torre a partir de la variable *C<sub>c</sub>*, por lo que no depende directamente de la concentración de sílice.



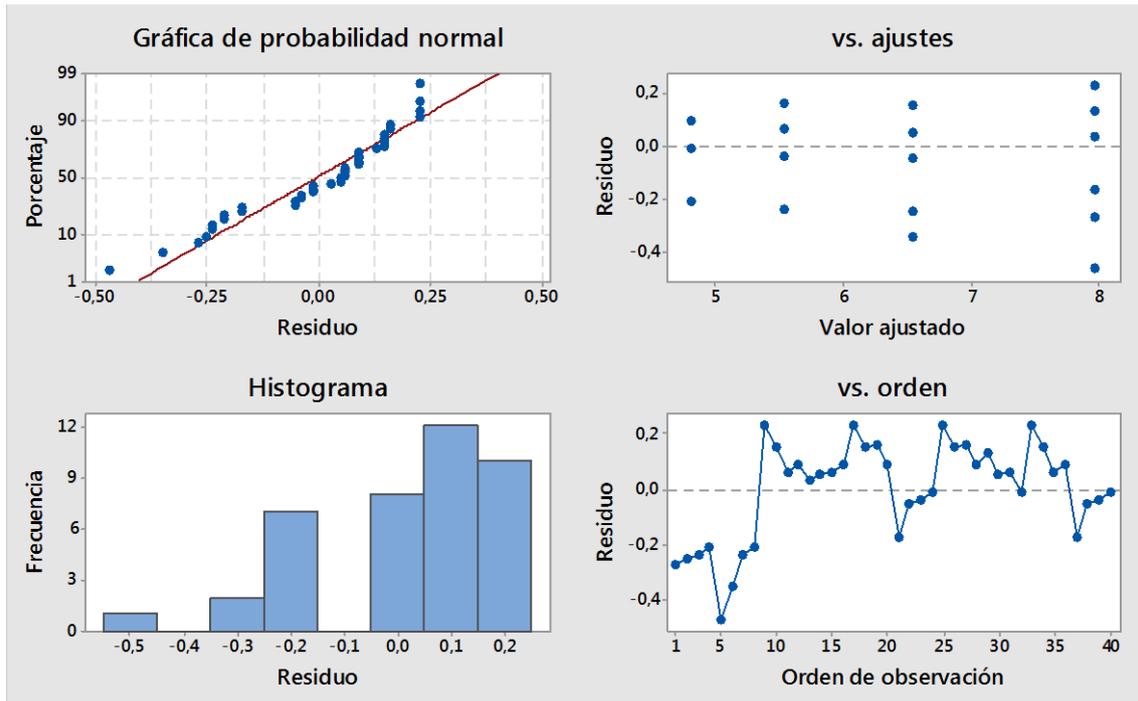
**Figura 3.7.** Pareto de efectos estandarizados para la variable R.

### 3.4.2.2. Residuos.

(Minitab, 2019)

Las figuras 3.8 a la 3.10 muestran los gráficos de residuos para las variables respuesta  $C_c$ ,  $L$  y  $R$ . A continuación se describe el análisis de éstos.

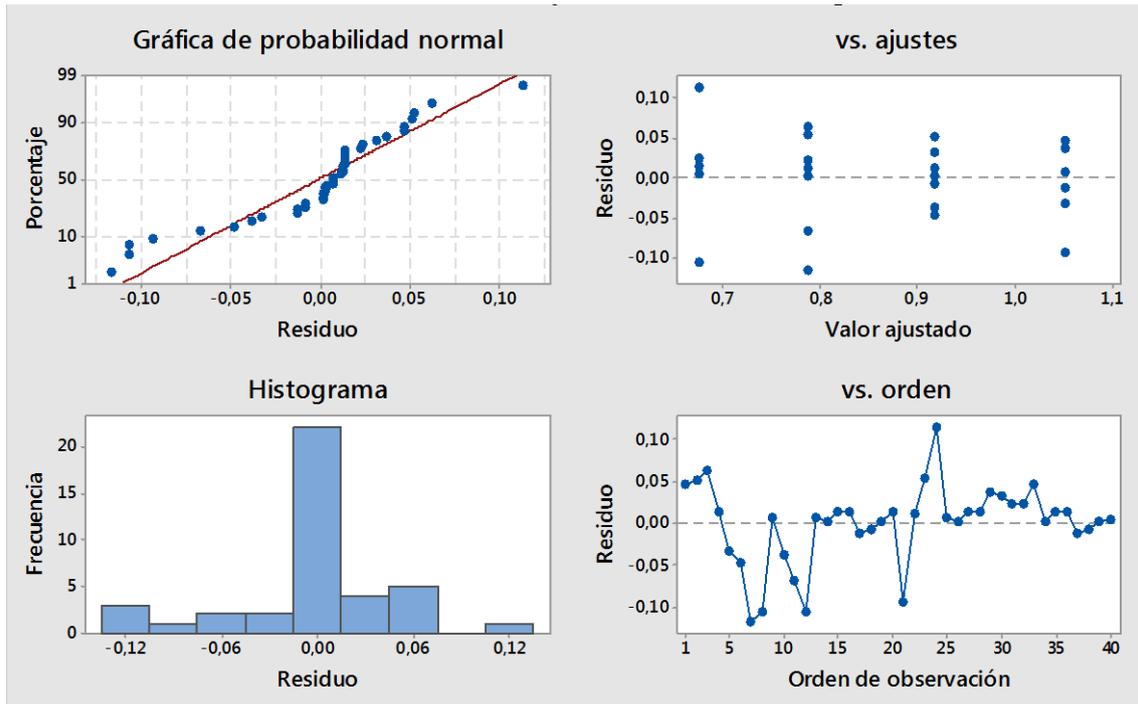
- I. **Variable respuesta  $C_c$ :** La gráfica residuos versus ajustes de la figura 3.8 muestra la distribución de los puntos en ambos lados del valor cero observándose un valor atípico en 8, con distancia entre ellos en el eje de abscisas al aumento, es decir la varianza aumenta hacia la derecha en los valores ajustados (varianza no constante). En la gráfica de residuos versus orden de la figura 3.8 se muestra que son independientes entre sí, es decir, los puntos no están relacionados entre sí por lo que hay aleatoriedad. La gráfica de probabilidad normal muestra una desviación de los datos respecto a la recta. El histograma refleja que la curva normal (construida a partir de frecuencias y residuos) está más concentrada a la derecha y cola a la izquierda (asimetría negativa).



**Figura 3.8.** Gráficas de residuos para la variable  $C_c$ .

- II. **Variable respuesta L:** La gráfica residuos versus ajustes de la figura 3.9 muestra la distribución de los puntos en ambos lados del valor cero observándose cierta aleatoriedad con distancia entre ellos en el eje de abscisas constante, es decir hay varianza constante.

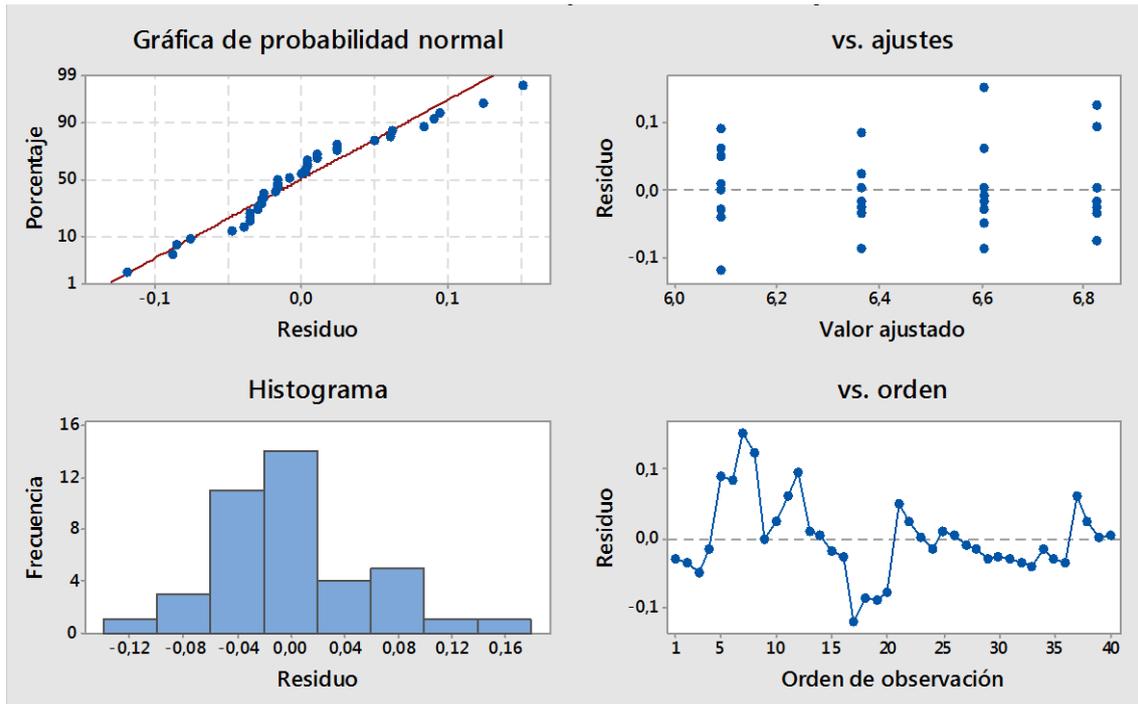
En la gráfica de residuos versus orden de la figura 3.9 se muestra en los puntos que no hay tendencia ni patrones, por lo que los datos no están correlacionados, es decir son independientes: hay aleatoriedad. La grafica de probabilidad normal muestra una desviación de algunos de los datos respecto a la recta. El histograma refleja que la curva de probabilidad normal (construida a partir de frecuencias y residuos) está más concentrada al centro.



**Figura 3.9.** Gráficas de residuos para la variable L.

III. **Variable respuesta R:** la gráfica residuos versus ajustes de la figura 3.10 muestra la distribución de los puntos en ambos lados del valor cero observándose aleatoriedad con distancia entre ellos en el eje de abscisas constante, es decir hay varianza constante.

En la gráfica de residuos versus orden de la figura 3.10 se muestra en los puntos que no hay tendencia ni patrones, por lo que los datos no están correlacionados, es decir son independientes: hay aleatoriedad. La grafica de probabilidad normal muestra muy poca desviación de los datos respecto a la recta. El histograma refleja que la curva normal (construida a partir de frecuencias y residuos) está concentrada al centro-izquierda de 0.00 y cola a la derecha (asimetría positiva).



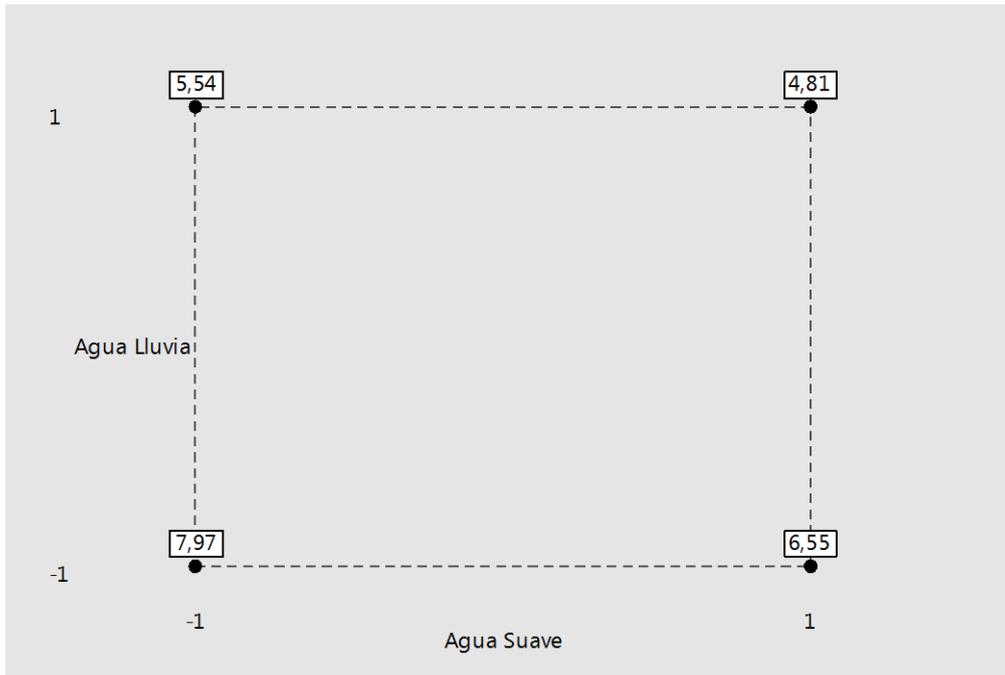
**Figura 3.10.** Gráficas de residuos para la variable *R*.

### 3.4.2.3. Cubos.

(Minitab, 2019)

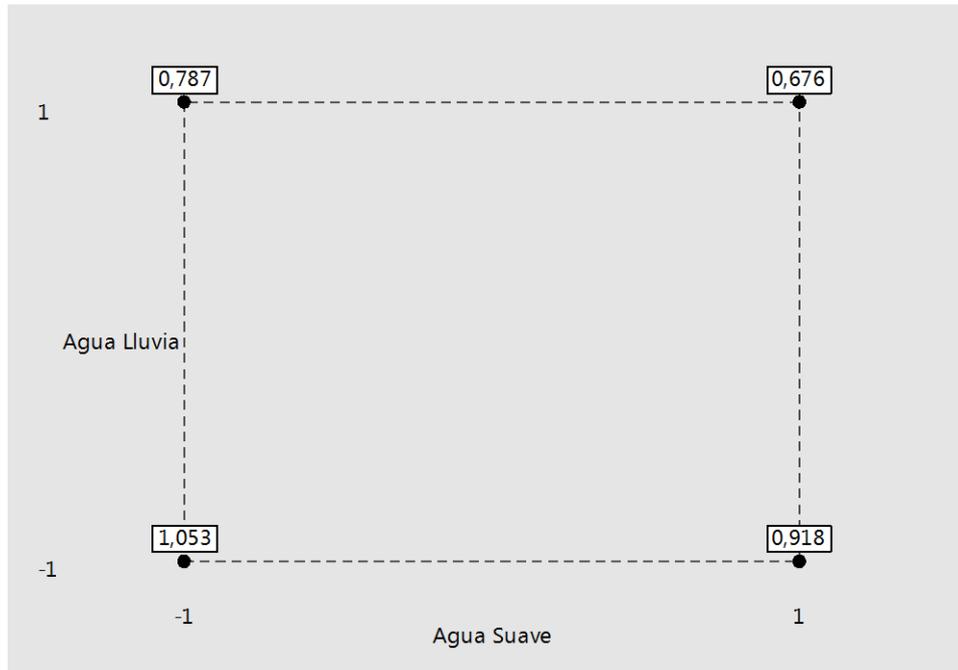
Las figuras 3.11 a la 3.13 muestran los gráficos factoriales de Cubos para las variables respuesta  $C_C$ ,  $L$  y  $R$ . A continuación se describe el análisis de éstos.

- I. **Variable respuesta  $C_C$ :** El gráfico de cubo de la figura 3.11 también muestra en que niveles de los factores puede encontrarse el mejor valor esperado y cuando se desvía de este. Así, el mayor número de Ciclos de concentración se ilustra con el valor de 7.97, cuando ambos factores están en el menor nivel (1), menor cantidad de sílice, para la mezcla 20% A – 80% B y el menor valor con 4.81 cuando están en el mayor nivel o mayor cantidad de sílice ab, para la mezcla 35% A – 65% B.



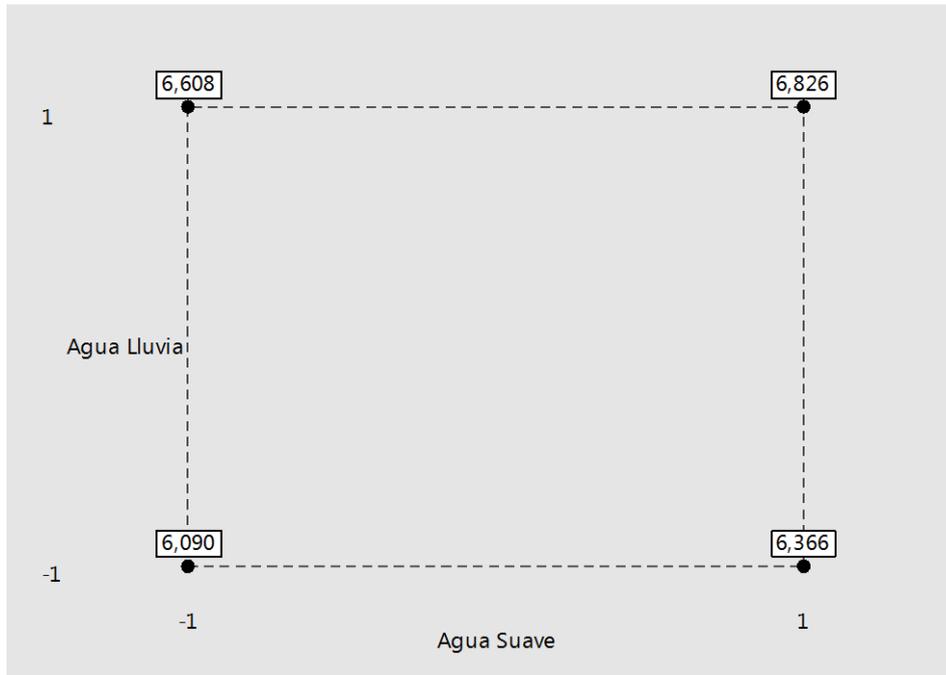
**Figura 3.11.** Gráfica de cubos con medias ajustadas para la variable  $C_c$ .

- II. **Variable respuesta L:** Se ilustra en la figura 3.12 que el rango de equilibrio no se cumple cuando ambos factores para toda las mezclas o tratamientos, están en el nivel menor (1) con una media ajustada para L de 1.053 de la mezcla 20% A – 80% B. Sin embargo se cumple que  $0 < L < 1$  para las otras tres formulaciones, con el menor valor de L de 0.676 cuando ambos están en el mayor nivel ab para la mezcla 35% A – 65% B.



**Figura 3.12.** Gráfica de cubos con medias ajustadas para la variable L.

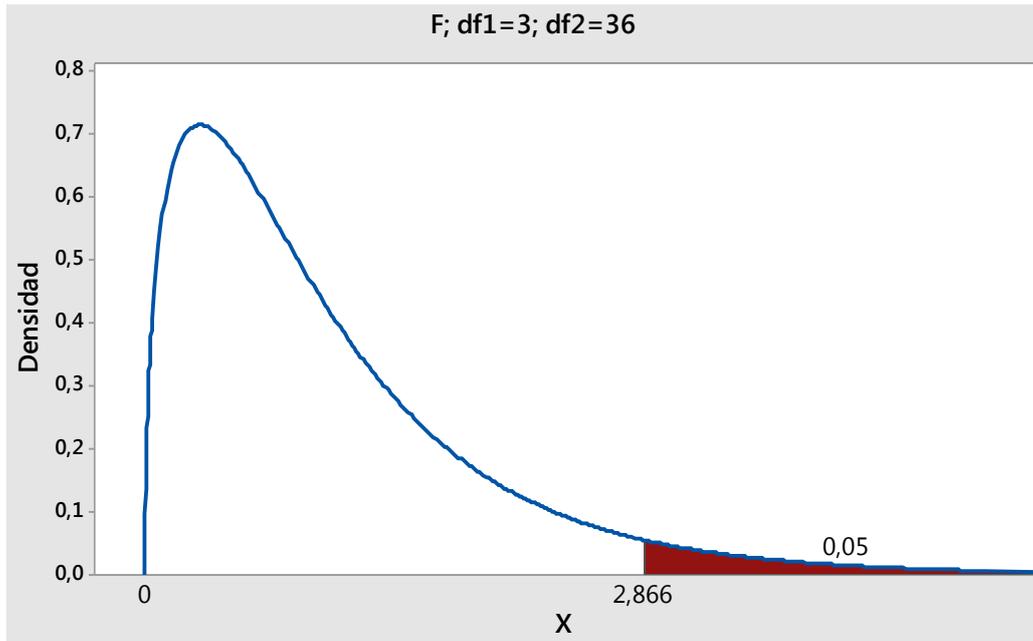
III. **Variable respuesta R:** Se ilustra en el gráfico de la figura 3.13 que el rango de equilibrio para R [6.00; 7.00] se cumple para las 4 formulaciones. Cuando ambos factores están en el menor nivel (1) para la mezcla 20% A – 80% B se tiene el menor valor de R de 6.66; y cuando A y B están en el mayor nivel ab para la mezcla 35% A – 65% B se tiene el menor valor de R con 6.847 (valores de medias ajustadas).



**Figura 3.13.** Gráfica de cubos con medias ajustadas para la variable R.

### 3.4.3. Obtención de F crítica.

Con programa estadístico Minitab (2019), se realiza el cálculo de F crítica que sirve de referencia comparativa del valor F que se obtiene del ANOVA (sección 3.4.1). En la gráfica de la figura 3.14 se muestra la distribución de este estadístico de prueba.



**Figura 3.14.** Gráfico de distribución F de Fisher.

La figura 3.14 muestra el gráfico de la distribución F de Fisher, cuyo valor crítico se calcula a partir de los grados de libertad obtenidos de tablas ANOVA (tablas 3.19 a 3.21): con  $df_1=3$  que son los grados de libertad del numerador en la fila que corresponde a “modelo” y  $df_2=36$  que son los grados de libertad del denominador en la fila que corresponde al error.

El gráfico ilustra que F tabulada o F crítica tiene un valor de 2.866 y el área sombreada de rojo corresponde a la región de rechazo, es decir valores mayores (o a la derecha) de 2.866 y el área sin sombreado corresponde a la región de no rechazo, es decir valores menores o a la izquierda de 2.866.

#### **3.4.4. Prueba de Hipótesis.**

(Minitab, 2019)

En la sección 3.4.1 se realiza el cálculo estadístico inferencial del diseño  $2^k$  por medio del Análisis de Varianza (ANOVA) de Fisher para la prueba de hipótesis por ser el más apropiado para estudiar simultáneamente el efecto de los dos factores o variables independientes que son la proporción de agua suave y la proporción de

agua lluvia sobre las variables respuesta  $C_C$ ,  $L$  y  $R$ ; para lo cual el estadístico de prueba es el  $F$  de Fisher, con el que se calcula el valor  $p$  para concluir.

Para la **prueba con el estadístico  $F$  de Fisher** se establecen:

- I. **Hipótesis nula,  $H_0$ :** No hay efecto significativo de los factores sobre la variable respuesta.
- II. **Hipótesis alternativa,  $H_1$ :** Hay efecto significativo de los factores sobre la variable respuesta.

Con el valor obtenido en la sección 3.4.3 de  $F$  crítica o  $F$  tabulada ( $F_C$ ) se compara con el obtenido para los factores y su interacción en la tabla ANOVA, con el criterio:

a. **Rechazar  $H_0$  si:  $F > F_C$**

b. **No rechazar  $H_0$  si:  $F < F_C$**

De manera análoga se realiza el criterio de rechazo o no rechazo de  $H_0$  con el valor  $p$  (probabilidad de rechazar  $H_0$  cuando esta es verdadera o error tipo I o falso positivo o error tipo  $\alpha$ ), por medio de la comparación de este con el nivel de significancia escogido (para este trabajo  $\alpha=0.05$ ):

a. **Rechazar  $H_0$  si:  $p < \alpha$**

b. **No rechazar  $H_0$  si:  $p > \alpha$**

La tabla 3.19 muestra los criterios para rechazo o no rechazo de la hipótesis nula con el estadístico de prueba  $F$  para cada una de las variables respuesta  $V_S$  y  $V_L$ .

**Tabla 3.19.** Resultados de la prueba de hipótesis con el estadístico *F*.

<b>Variable respuesta</b>	<b>Factor</b>	<b>Valor F</b>	<b>Comparación con <math>F_c</math></b>	<b>Criterio</b>
Ciclos de Concentración, $C_c$ .	Agua Suave	352.86	352.86 > 2.866 $F > F_c$	Se rechaza $H_0$
	Agua Lluvia	1327.40	1327.40 > 2.866 $F > F_c$	Se rechaza $H_0$
	Interacción Agua Suave – Agua Lluvia	36.34	36.34 > 2.866 $F > F_c$	Se rechaza $H_0$
Índice de Saturación de Langelier, $L$ .	Agua Suave	62.73	62.73 > 2,866 $F > F_c$	Se rechaza $H_0$
	Agua Lluvia	267.52	267.52 > 2,866 $F > F_c$	Se rechaza $H_0$
	Interacción Agua Suave – Agua Lluvia	0.60	0.60 < 2,866 $F < F_c$	No se puede rechazar $H_0$
Índice de Estabilidad de Ryznar, $R$ .	Agua Suave	177.64	177.64 > 2,866 $F > F_c$	Se rechaza $H_0$
	Agua Lluvia	696.24	696.24 > 2,866 $F > F_c$	Se rechaza $H_0$
	Interacción Agua Suave – Agua Lluvia	2.45	2.45 < 2,866 $F < F_c$	No se puede rechazar $H_0$

Se obtiene el mismo análisis utilizando el valor *p* que se compara con el nivel de significancia  $\alpha$ , esto se muestra en la tabla 3.20:

**Tabla 3.20.** Resultados de la prueba de hipótesis con el valor  $p$ .

Variable respuesta	Factor	Valor $p$	Comparación con $\alpha$	Criterio
Ciclos de Concentración, $C_c$ .	Agua Suave	0.000	$0.000 < 0.05$ $p < \alpha$	Se rechaza $H_0$
	Agua Lluvia	0.000	$0.000 < 0.05$ $p < \alpha$	Se rechaza $H_0$
	Interacción Agua Suave – Agua Lluvia	0.000	$0.000 < 0.05$ $p < \alpha$	Se rechaza $H_0$
Índice de Saturación de Langelier, $L$ .	Agua Suave	0.000	$0.000 < 0.05$ $p < \alpha$	Se rechaza $H_0$
	Agua Lluvia	0.000	$0.000 < 0.05$ $p < \alpha$	Se rechaza $H_0$
	Interacción Agua Suave – Agua Lluvia	0.445	$0.445 > 0.05$ $p > \alpha$	No se puede rechazar $H_0$
Índice de Estabilidad de Ryznar, $R$ .	Agua Suave	0.000	$0.000 < 0.05$ $p < \alpha$	Se rechaza $H_0$
	Agua Lluvia	0.000	$0.000 < 0.05$ $p < \alpha$	Se rechaza $H_0$
	Interacción Agua Suave – Agua Lluvia	0.126	$0.126 > 0.05$ $p > \alpha$	No se puede rechazar $H_0$

A partir de los resultados obtenidos del análisis estadístico inferencial por medio del estadístico de prueba  $F$  de Fisher y el valor  $p$  en las tablas 3.19 y 3.20 y con la prueba de normalidad de Anderson – Darling en la sección 3.3, se puede interpretar para las variables respuesta:

- I. **Ciclos de Concentración,  $C_c$ :** Se necesita una prueba no paramétrica puesto que la prueba de normalidad muestra que los resultados para esta variable no describen una distribución normal.

- II. **Índice de Saturación de Langelier,  $L$ :** Sí hay efecto de los factores Agua Suave y Agua Lluvia sobre esta variable, sin embargo no hay efecto de la interacción de estos dos factores sobre esta variable respuesta.
  
- III. **Índice de Estabilidad de Ryznar,  $R$ :** Sí hay efecto de los factores Agua Suave y Agua Lluvia sobre esta variable, sin embargo no hay efecto de la interacción de estos dos factores sobre esta variable respuesta.

#### **3.4.5. Prueba No Paramétrica de Friedman para la variable $C_c$ .**

(Berlanga y Rubio, 2012)

La prueba ANOVA requiere la normalidad de los datos y como muestra la prueba de normalidad de Anderson y Darling en la sección 3.3.1 para la variable respuesta Ciclos de Concentración ( $C_c$ ), los datos no siguen una distribución normal, por lo que se procede a realizar una prueba no paramétrica con la que se pueda concluir sobre esta variable.

La prueba no paramétrica alternativa a un modelo de DOE – ANOVA de dos factores cuando los datos no describen una distribución normal es la prueba de Friedman. Se utiliza como medida de tendencia central la mediana para estudiar el efecto del tratamiento  $C_c$  sobre los factores ( $V_s$  y  $V_L$ ).

Para determinar si cualquiera de las diferencias entre las medianas es estadísticamente significativa, se compara el valor p con el nivel de significancia ( $\alpha$ ) para evaluar la hipótesis nula (Minitab, 2019).

La prueba de Friedman hace el cálculo del estadístico  $F_r$  o  $\chi_r^2$ , el cual se aproxima a una chi-cuadrada con k-1 grados de libertad. En las situaciones en las que se seleccionan N grupos (réplicas o columnas) de k elementos (formulaciones o filas), de forma que estos sean lo más parecidos entre sí. El método consiste en ordenar los datos por filas o bloques reemplazándolos por su respectivo orden.

Ya que para esta investigación se tienen N (réplicas) y/o k (tratamientos) grandes, se calcula  $\chi_r^2$  con los datos obtenidos experimentalmente y se comparan con el valor crítico  $\chi_c^2$  de tablas de la distribución chi cuadrada que se lee a partir de los grados de libertad y el nivel de significancia.

La **prueba de Friedman** trabaja con las **hipótesis**:

- I.  **$H_0$ : No existen diferencias entre los grupos.**
- II.  **$H_1$ : Existen diferencias entre los grupos.**

Donde el **criterio de rechazo o aceptación de  $H_0$**  es:

- a. **Si  $\chi_c^2 \leq \chi_r^2$  se rechaza  $H_0$ .**
- b. **Si  $\chi_c^2 > \chi_r^2$  no se puede rechazar  $H_0$ .**

De igual forma para concluir se procede de la misma forma que en la sección anterior, utilizando el valor p:

- a. **Si  $p < \alpha$  se rechaza  $H_0$ .**
- b. **Si  $p > \alpha$  no se puede rechazar  $H_0$ .**

#### **3.4.5.1. Cálculo del estadístico para la Prueba de Friedman.**

(Núñez, 2018)

Por medio de hoja de cálculo se obtiene el estadístico de Friedman, primero se ordenan los datos obtenidos para la variable  $C_c$  de menor a mayor, tal como se muestra en la tabla 3.21:

**Tabla 3.21.** Ordenamiento de los valores de  $C_c$  para el cálculo de rangos en la prueba de Friedman.

Valores de $C_c$ para cada formulación F				
Grupos (Réplicas)	Tratamientos (Formulaciones)			
	F4	F3	F2	F1
2	4.6	5.3	6.2	7.5
1	4.6	5.3	6.3	7.7
6	4.8	5.5	6.5	7.8
10	4.8	5.5	6.5	7.8
4	4.9	5.6	6.6	8.0
8	4.8	5.6	6.6	8.1
3	4.9	5.6	6.7	8.2
9	4.9	5.6	6.7	8.2
5	4.9	5.7	6.7	8.2
7	4.9	5.7	6.7	8.2

Luego se le asignan valores según el orden a cada celda de tratamientos de menor a mayor de 1 a 4 respectivamente, de acuerdo a los resultados obtenidos para la variable  $C_c$  (véase tabla 3.22).

**Tabla 3.22.** Obtención de rangos para el cálculo del estadístico de Friedman.

Asignación de posiciones para datos de la variable $C_c$ para cada formulación.				
Grupo (Réplicas)	Tratamientos (Formulaciones)			
	F4	F3	F2	F1
2	1	2	3	4
1	1	2	3	4
6	1	2	3	4
10	1	2	3	4
4	1	2	3	4
8	1	2	3	4
3	1	2	3	4
9	1	2	3	4
5	1	2	3	4
7	1	2	3	4
<b>RANGOS</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>

En la tabla 3.22 se observa que para el tratamiento F4 se obtienen los menores valores (se asigna 1) para la variable  $C_C$  y para el tratamiento F1 los mayores valores (se asigna 4).

Con la ecuación 3.1 se obtiene el estadístico de Friedman:

$$\chi_r^2 = \frac{12}{Nk(k+1)} \sum_{j=1}^k (R_j)^2 - 3N(k+1)$$

**Ecuación 3.2.** Estadístico de Friedman.  
Fuente: (Núñez, 2018).

Donde:

- $\chi_r^2$  es el estadístico de Friedman
- N el número de grupos, llamados también filas, bloques o réplicas
- k es el número de columnas o tratamientos
- $\sum_{j=1}^k (R_j)^2$  es la suma de rangos al cuadrado del tratamiento j (por columna).

Sustituyendo:

$$\chi_r^2 = \frac{12}{(10)(4)(4+1)} [10^2 + 20^2 + 30^2 + 40^2] - 3(10)(4+1)$$

$$\chi_r^2 = 30$$

Se calculan los grados de libertad:

$$gl = k - 1 = 4 - 1 = 3.$$

Ya que N es grande, se obtiene el valor crítico del estadístico de Friedman de tablas a partir de los grados de libertad (3) y el nivel de significancia (0.05), que no se divide entre dos puesto que se tiene un contraste unilateral porque la región de rechazo se sitúa en un extremo de la distribución muestral, análoga a

la gráfica de la figura 3.14 al tener un sistema de hipótesis (sección 2.4.2) en los que no hay desigualdad de supuestos ( $C_C \leq 1$  o  $C_C > 1$ ).

Se consultan los valores críticos de la distribución  $\chi^2$  (Walpole, Myers, Myers y Ye, 2012), donde se obtiene  $\chi_c^2$  con el valor calculado de gl (3) y el nivel de significancia ( $\alpha=0.05$ ):

$$\chi_c^2 = 7.815$$

Comparando con el valor calculado  $\chi_r^2 = 30$ :

$$7.815 < 30$$

$$\chi_c^2 < \chi_r^2$$

**Se rechaza  $H_0$**  y se acepta  $H_1$ : Existen diferencias entre los valores de la variable  $C_C$  entre los grupos (réplicas).

Con este resultado se puede interpretar que sí hay efecto de los factores individuales y de su interacción (A, B y AB) sobre la variable  $C_C$ .

### 3.4.5.2. Cálculo del valor p para la Prueba de Friedman.

Se realiza el cálculo del valor p para la prueba no paramétrica de Friedman con los datos experimentales, los resultados se muestran en la tabla 3.23:

**Tabla 3.23.** Obtención del valor p para la prueba Friedman a partir de hoja de cálculo.

Parámetros Estadísticos	Valores obtenidos de la prueba de Friedman
Alfa	0.05
Mediana	6.0
Estadístico Fr o $\chi_r^2$	30
Valor p	$1,3801 \times 10^{-6}$

Luego se compara el valor  $p$  con nivel de significancia alfa:

$$0.0000013801 < 0.05$$

$$p < \alpha$$

Por tanto, al igual que como se establece con el estadístico de Friedman, **se rechaza  $H_0$**  y se acepta  $H_1$ : Existen diferencias entre los valores de la variable  $C_c$  entre los grupos (réplicas).

Al aceptar la hipótesis alternativa, se concluye que por lo menos la distribución de una de las respuestas difiere a las demás. Es decir que las respuestas asociadas a cada uno de los tratamientos (formulaciones) no tienen la misma distribución de probabilidad con la misma mediana.

En otras palabras, los datos del tratamiento F1 tienen una mediana distinta a los datos del tratamiento F2, así como es distinta de la media de los tratamientos F3 y F4. Cada tratamiento tiene una distribución de probabilidad con su respectiva mediana.

#### **4. CAPÍTULO IV. EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA A UTILIZAR EN TORRE DE ENFRIAMIENTO.**

En el presente capítulo se muestra la evaluación de los parámetros fisicoquímicos de calidad del agua en torres de enfriamiento: los resultados obtenidos en el experimento contra las especificaciones en ficha técnica del modelo de torre Marley Clase W400 (Marley, 2009).

Así mismo se muestran gráficas obtenidas con programa estadístico Minitab (véase información de licencia en Anexo E), en las que se visualiza el comportamiento de dichos parámetros de calidad para cada una de las formulaciones de mezcla de agua suavizada y agua lluvia, representando dicha formulación como la proporción de agua lluvia presente en la mezcla (denotada en gráficos del programa como “A Lluvia”), entendiéndose que la proporción restante corresponde a agua suavizada.

##### **4.1. Evaluación de las Formulaciones a partir de un modelo de Torre de Enfriamiento.**

En las tablas 4.1 a la 4.4 se muestra la comparación del promedio de los resultados obtenidos para cada uno de los cuatro tratamientos o formulaciones de mezclas de agua lluvia – agua suavizada con los requerimientos de la ficha técnica para las condiciones del agua de torre de enfriamiento según el modelo Marley clase W400 para materiales de construcción estándar (véase tabla 1.10) (Marley, 2009).

**Tabla 4.1.** Comparación de parámetros fisicoquímicos y de calidad para F1 contra lo especificado en el modelo de Torre de enfriamiento.

<b>Formulación 1: 20% agua suave – 80% agua lluvia</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Método</b>	<b>Límites según modelo Marley clase W400</b>	<b>Promedio de resultados obtenidos</b>
pH	-	Standard Methods 4500 -H <sup>+</sup>	6.5 a 9.0	8.24
Temperatura máxima del agua	°C	-	48.9	30.0
Índice de Saturación de Langelier	-	-	0.0 a 1.0	1.07
Índice de Estabilidad de Ryznar	-	-	6.0 a 7.0	6.09
Alcalinidad Total	ppm	Standard Methods 2320, método volumétrico con naranja de metilo.	100 a 500	320
Dureza Total	ppm	Método Estándar 2340, método volumétrico con EDTA.	800	60
TDS	ppm	Método Estándar 2540	5000	628.86
Sílice	ppm	370.1 de USEPA para aguas potables, superficiales y salinas, residuales domésticas. O el Método Estándar 4500-SiO <sub>2</sub> C	150	18.84
Ciclos de concentración	-	-	-	8.0

Fuente: (Marley, 2009).

**Tabla 4.2.** Comparación de parámetros fisicoquímicos y de calidad para F2 contra lo especificado en el modelo de Torre de enfriamiento.

<b>Formulación 2: 25% agua suave – 75% agua lluvia</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Método</b>	<b>Límites según modelo Marley clase W400</b>	<b>Promedio de resultados obtenidos</b>
pH	-	Método Estándar 4500 -H <sup>+</sup>	6.5 a 9.0	8.21
Temperatura máxima del agua	°C	-	48.9	30.0
Índice de Saturación de Langelier	-	-	0.0 a 1.0	0.92
Índice de Estabilidad de Ryznar	-	-	6.0 a 7.0	6.37
Alcalinidad Total	ppm	Método Estándar 2320, método volumétrico con naranja de metilo.	100 a 500	310
Dureza Total	ppm	Método Estándar 2340, método volumétrico con EDTA.	800	50
TDS	ppm	Método Estándar 2540	5000	616.49
Sílice	ppm	370.1 de USEPA para aguas potables, superficiales y salinas, residuales domésticas. O el Método Estándar 4500-SiO <sub>2</sub> C	150	22.95
Ciclos de concentración	-	-	-	6.5

Fuente: (Marley, 2009).

**Tabla 4.3.** Comparación de parámetros fisicoquímicos y de calidad para F3 contra lo especificado en el modelo de Torre de enfriamiento.

<b>Formulación 3: 30% agua suave – 70% agua lluvia</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Método</b>	<b>Límites según modelo Marley clase W400</b>	<b>Promedio de resultados obtenidos</b>
pH	-	Método Estándar 4500 -H <sup>+</sup>	6.5 a 9.0	8.19
Temperatura máxima del agua	°C	-	48.9	30.0
Índice de Saturación de Langelier	-	-	0.0 a 1.0	0.79
Índice de Estabilidad de Ryznar	-	-	6.0 a 7.0	6.61
Alcalinidad Total	ppm	Método Estándar 2320, método volumétrico con naranja de metilo.	100 a 500	310
Dureza Total	ppm	Método Estándar 2340, método volumétrico con EDTA.	800	40
TDS	ppm	Método Estándar 2540	5000	607.88
Sílice	ppm	370.1 de USEPA para aguas potables, superficiales y salinas, residuales domésticas. O el Método Estándar 4500-SiO <sub>2</sub> C	150	27.06
Ciclos de concentración	-	-	-	5.5

Fuente: (Marley, 2009).

**Tabla 4.4.** Comparación de parámetros fisicoquímicos y de calidad de la F4 contra lo especificado en el modelo de Torre de enfriamiento.

<b>Formulación 4: 35% agua suave – 65% agua lluvia</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Método</b>	<b>Límites según modelo Marley clase W400</b>	<b>Promedio de resultados obtenidos</b>
pH	-	Método Estándar 4500 -H <sup>+</sup>	6.5 a 9.0	8.17
Temperatura máxima del agua	°C	-	48.9	30.0
Índice de Saturación de Langelier	-	-	0.0 a 1.0	0.67
Índice de Estabilidad de Ryznar	-	-	6.0 a 7.0	6.83
Alcalinidad Total	ppm	Método Estándar 2320, método volumétrico con naranja de metilo.	100 a 500	300
Dureza Total	ppm	Método Estándar 2340, método volumétrico con EDTA.	800	30
TDS	ppm	Método Estándar 2540	5000	601.56
Sílice	ppm	370.1 de USEPA para aguas potables, superficiales y salinas, residuales domésticas. O el Método Estándar 4500-SiO <sub>2</sub> C	150	31.17
Ciclos de concentración	-	-	-	4.8

Fuente: (Marley, 2009).

De las tablas 4.1 a la 4.4. se observa que tres de las cuatro formulaciones de mezcla cumplen con los límites especificados para el modelo Marley clase W400, siendo la Formulación 1 (20% Agua Suave – 80% Agua Lluvia) la que sobrepasa el límite para el parámetro de calidad Índice de Saturación de Langelier (entre 0.0 y 1.0) con un valor promedio de 1.07 a pesar de reportarse la menor concentración promedio de sílice (18.84 ppm) y por lo mismo el mayor incremento en los ciclos de concentración ( $C_C$  promedio=8.0, véase tabla 3.9).

Por consiguiente, la Formulación 2 (25% Agua Suave – 75% Agua Lluvia) es la siguiente que reporta el mayor incremento en los ciclos de concentración ( $C_C$  promedio=6.5, véase tabla 3.9), cumpliendo con el rango límite permisible para Índice de Saturación de Langelier con un valor promedio de 0.92. Esto al tener mayor proporción de agua lluvia en la mezcla que reduzca el consumo de agua suavizada.

Así mismo, es apropiada la adopción de las otras dos formulaciones (F3: 30% Agua Suave – 70% Agua Lluvia y F4: 35% Agua Suave – 65% Agua Lluvia) porque también cumplen con todos los parámetros fisicoquímicos y de calidad de agua para enfriamiento, con menor aumento en los ciclos de concentración respecto a las primeras dos formulaciones pero siempre es considerable para la reducción del consumo de agua suavizada proveniente de la red de suministro.

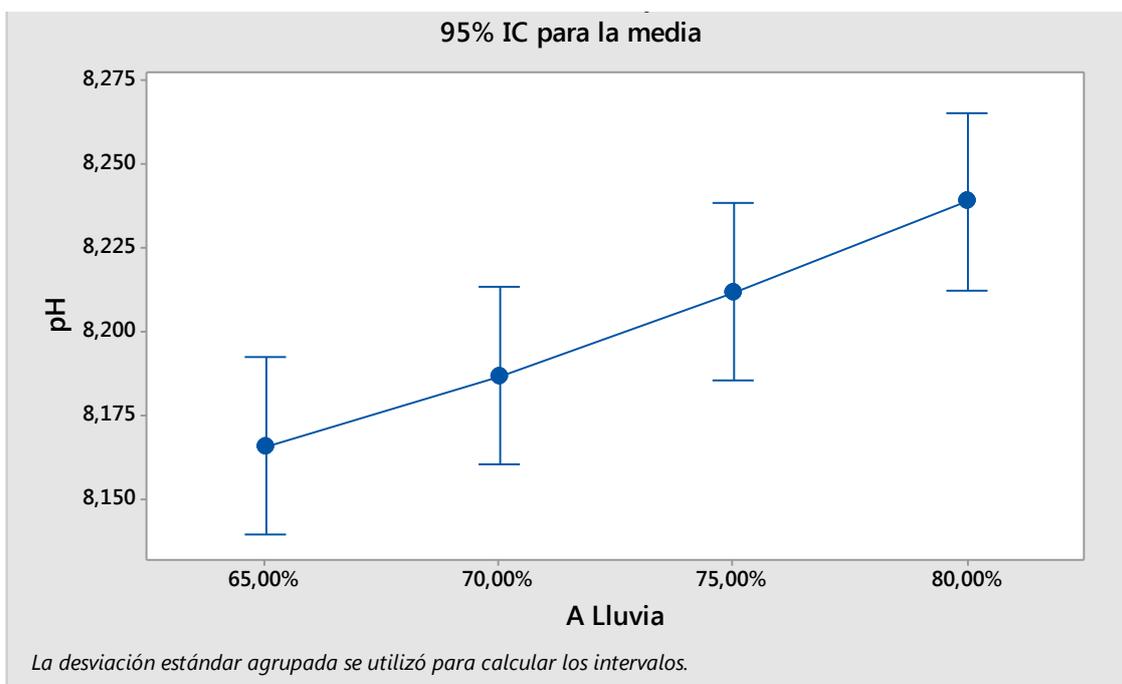
Si bien se reduce el consumo del agua suavizada (proveniente de la red o pozo) con la utilización de agua lluvia en mayores proporciones, por ser esta un recurso aprovechable para reducir el consumo de agua suavizada de suministro de la red, no siempre se tiene al alcance durante todo el año por lo que se debe tener almacenada para tener siempre disposición de esta, lo cual debe realizarse durante la época lluviosa para cuando sea requerida en la época seca o de menos recurrencia de lluvias, utilizando proporciones en la mezcla a formular de 35% y 30% de agua suavizada si no es posible la utilización del 25% en volumen de ésta, según sea requerido en el proceso industrial.

## 4.2. Evaluación gráfica de parámetros fisicoquímicos de las Formulaciones.

Se muestran gráficos de intervalos para analizar la tendencia que toma cada parámetro fisicoquímico en los grupos de cada formulación. Se analizan con la proporción de agua lluvia en la mezcla, entendiéndose que la proporción restante corresponde a agua suavizada.

### 4.2.1. pH

En la figura 4.1 se ilustra la gráfica de intervalos que muestra el comportamiento del pH de la mezcla a medida aumenta la proporción de agua lluvia en esta.



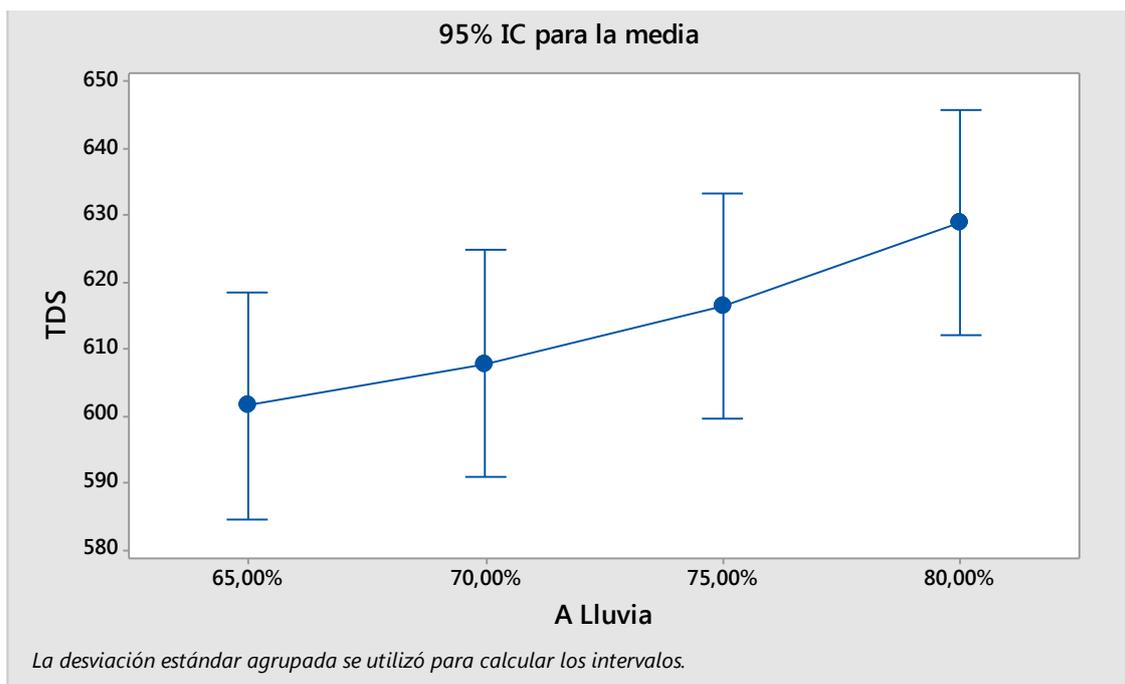
**Figura 4.1.** Gráfica de intervalos para el promedio de mediciones de pH en cada formulación.

Se observa en la gráfica de la figura 4.1 que la tendencia del pH es creciente a medida aumenta la proporción de agua lluvia en la mezcla. Cada intervalo se sobrepone con el anterior, lo que significa que no hay mucha diferencia en las medias en grupos contiguos.

El incremento del pH en la torre a medida incrementa la proporción de agua lluvia se debe a la presencia de sales y carbonatos de calcio y magnesio en esta, provenientes del arrastre durante la captación del agua lluvia en materiales de “duralita” o teja según corresponda; estas sales y carbonatos tienden a generar incrustaciones, pero este incremento y tendencia es leve y se mantiene dentro del límite permisible según especificaciones del equipo Marley clase W400.

#### 4.2.2. Sólidos Disueltos Totales (TDS)

En la figura 4.2 se ilustra la gráfica de intervalos que muestra la tendencia que toma la concentración de TDS en la mezcla a medida aumenta la proporción de agua lluvia en esta.



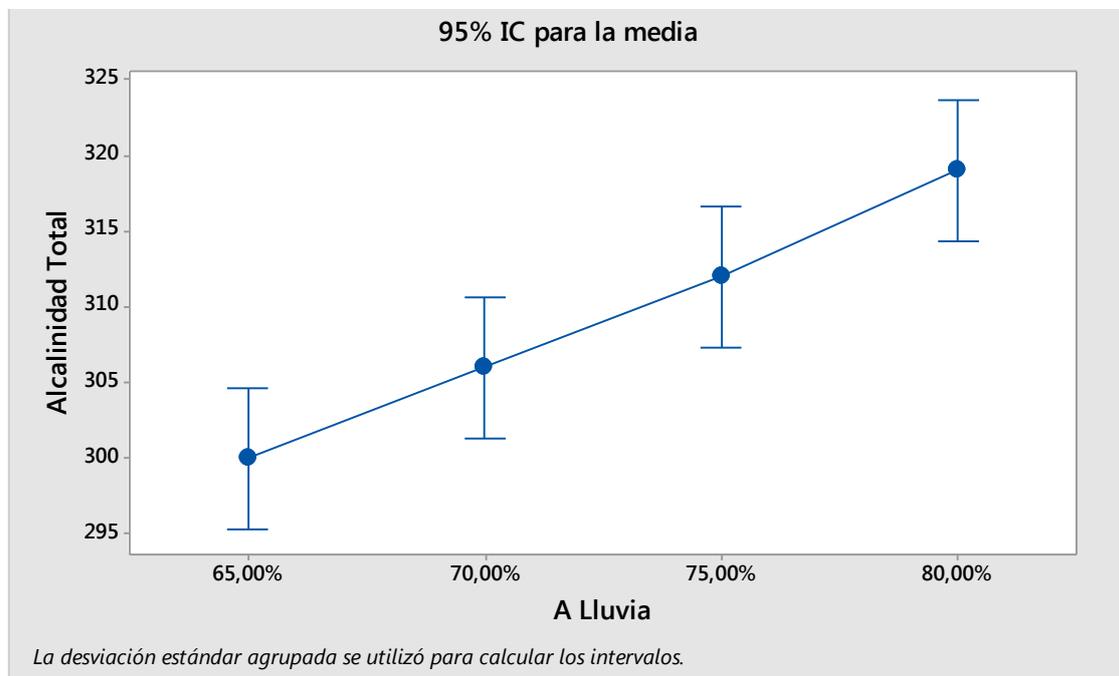
**Figura 4.2.** Gráfica de intervalos para el promedio de mediciones de TDS en cada formulación.

Se observa en la gráfica de la figura 4.2 que la tendencia de los TDS es creciente a medida aumenta la proporción de agua lluvia en la mezcla. Los intervalos se superponen, lo que significa que las diferencias entre las medias no son significativas.

Esta relación de proporcionalidad directa entre TDS y proporción de agua lluvia se debe a la presencia de sólidos provenientes del arrastre en el medio de captación del agua lluvia.

#### 4.2.3. Alcalinidad Total

En la figura 4.3 se ilustra la gráfica de intervalos que muestra la tendencia que toma la alcalinidad total en la mezcla a medida aumenta la proporción de agua lluvia en esta.



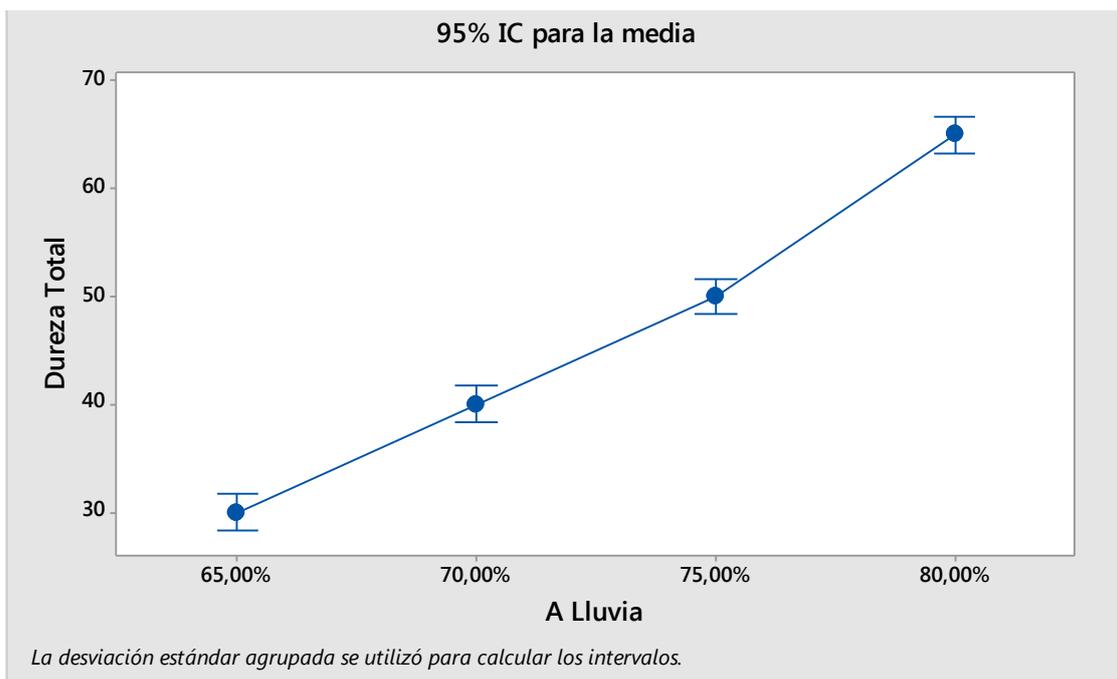
**Figura 4.3.** Gráfica de intervalos para el promedio de mediciones de Alcalinidad Total en cada formulación.

Se observa en la gráfica de la figura 4.3 que la tendencia de la Alcalinidad Total es creciente a medida aumenta la proporción de agua lluvia en la mezcla. Los intervalos se superponen, lo que significa que las diferencias entre las medias no son significativas.

Al igual que con el pH, la alcalinidad de la mezcla en la torre incrementa con el aumento en la proporción de agua lluvia a causa de la presencia de sales y carbonatos de calcio y magnesio en esta, provenientes del material que arrastra durante la captación del agua lluvia; estas sales y carbonatos tienden a generar incrustaciones lo que se traduce a un aumento en la alcalinidad del agua, pero se mantiene en el límite permisible según especificación del equipo Marley clase W400.

#### 4.2.4. Dureza Total

En la figura 4.4 se ilustra la gráfica de intervalos que muestra la tendencia que toma la dureza total en la mezcla a medida aumenta la proporción de agua lluvia en ésta.



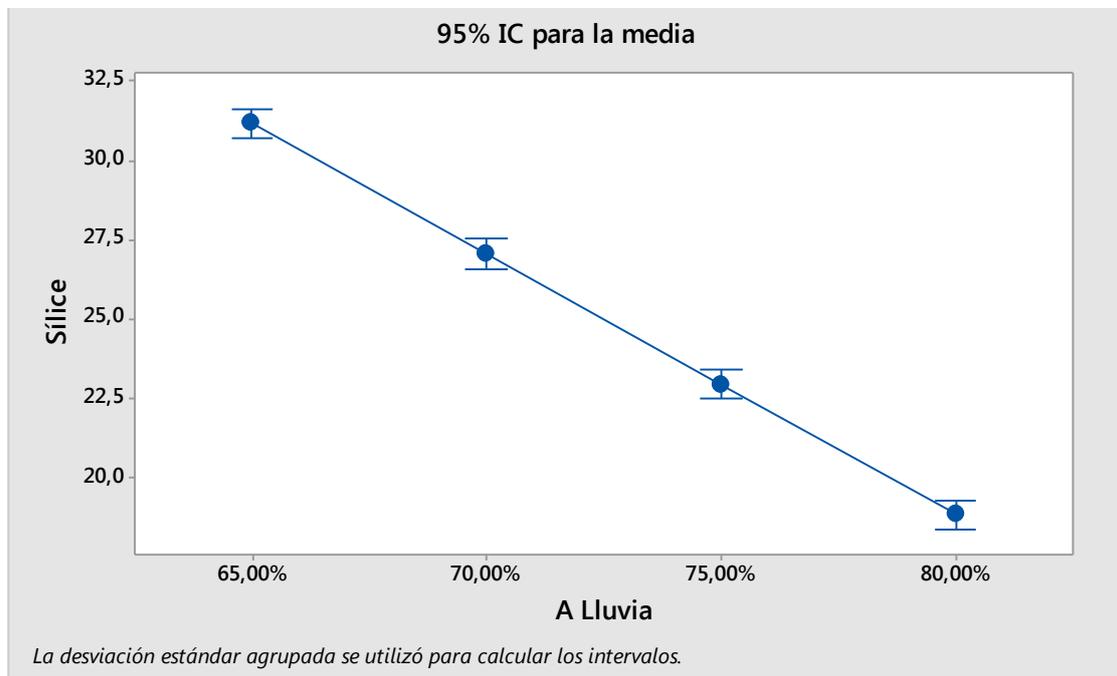
**Figura 4.4.** Gráfica de intervalos para el promedio de mediciones de Dureza Total en cada formulación.

Se observa en la gráfica de la figura 4.4 que la tendencia de la Dureza Total es creciente a medida aumenta la proporción de agua lluvia en la mezcla, esto a causa de que el agua lluvia arrastra sales y bicarbonatos (con presencia de iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ) provenientes del material de captación; por lo que al tener una mayor proporción de agua lluvia se tendrá más dureza, aunque esta aún se encuentra muy diluida en la mezcla.

Los intervalos que se muestran en la gráfica no se superponen en todos los grupos, lo que significa que las diferencias entre las medias son significativas.

#### 4.2.5. Sílice

En la figura 4.5 se ilustra la gráfica de intervalos que muestra la tendencia que toma concentración de sílice en la mezcla a medida aumenta la proporción de agua lluvia en esta.



**Figura 4.5.** Gráfica de intervalos para el promedio de mediciones de Sílice en cada formulación.

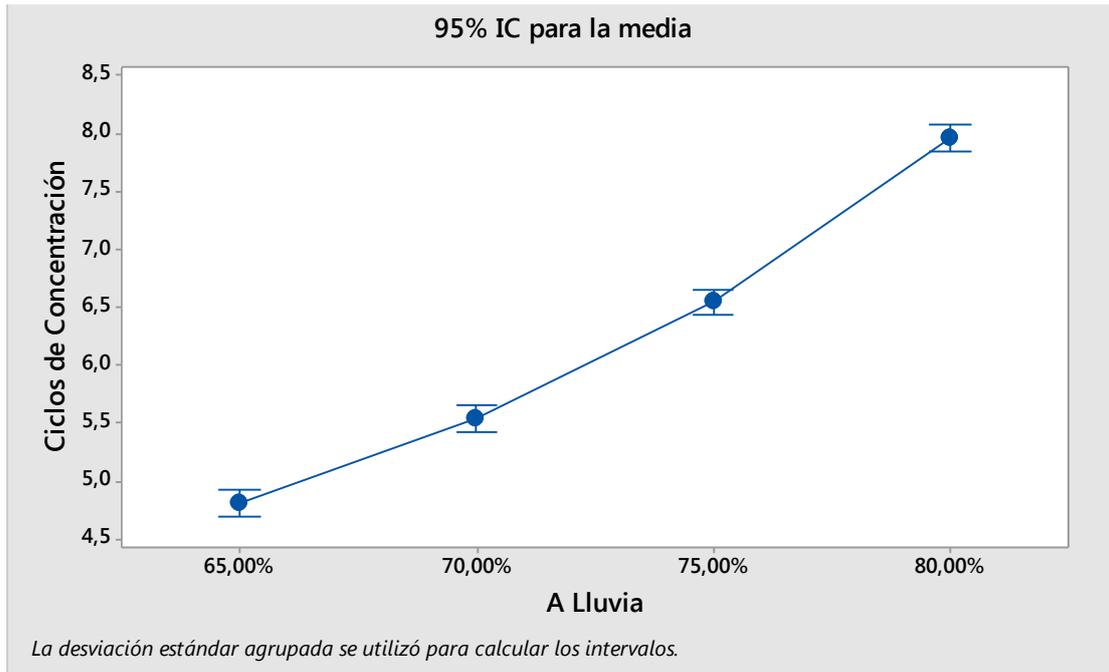
Se observa en la gráfica de la figura 4.5 que la tendencia de Sílice es decreciente a medida aumenta la proporción de agua lluvia en la mezcla. Esto tiene sentido ya que al aumentar la proporción de agua lluvia en la mezcla disminuye la concentración de sílice, lo cual se refleja en el aumento de los ciclos de concentración de la torre como se plantea el análisis estadístico para esta variable respuesta en el capítulo anterior.

### **4.3. Evaluación gráfica de las variables respuesta de las Formulaciones.**

Al igual que en el apartado anterior, se muestran gráficos de intervalos para analizar la tendencia que toma cada variable respuesta en los grupos de cada formulación. Se analizan con la proporción de agua lluvia en la mezcla.

#### **4.3.1. Ciclos de concentración.**

En la figura 4.6 se ilustra la gráfica de intervalos que muestra la tendencia que toman los ciclos de concentración en la mezcla a medida aumenta la proporción de agua lluvia en esta.

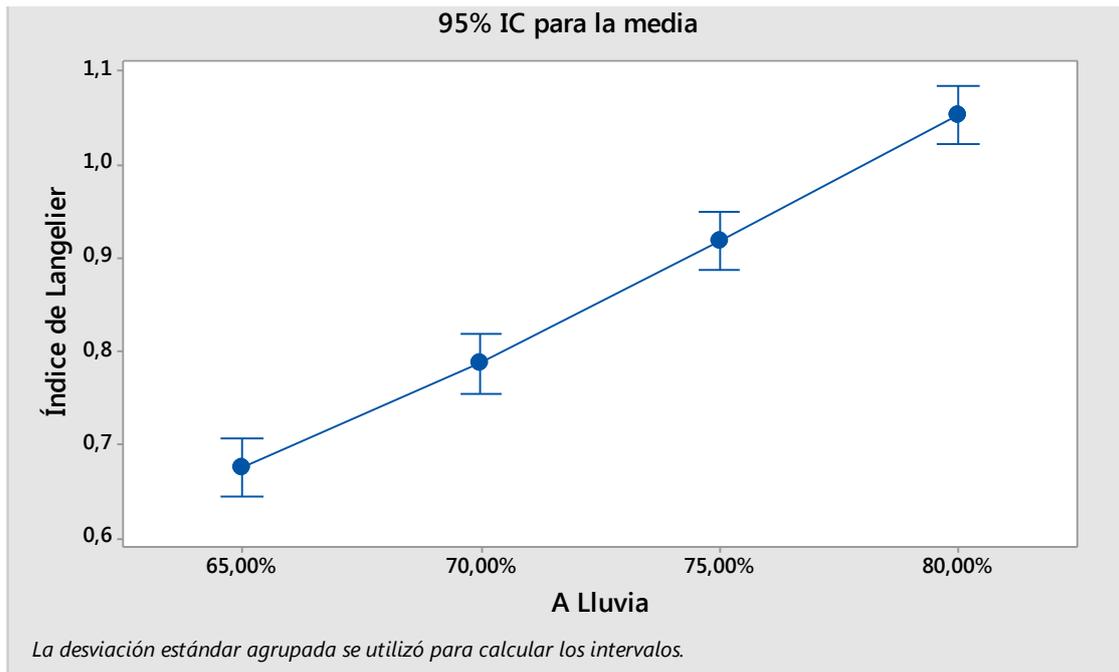


**Figura 4.6.** Gráfica de intervalos del promedio obtenido para la variable Ciclos de concentración en cada formulación.

Los intervalos no se superponen en todos los grupos en las gráficas de las figuras 4.5 y 4.6, lo que significa que las diferencias entre las medias son significativas. Para cada formulación se tiene una media diferente respecto a otra formulación, esto es expuesto en el análisis estadístico (véase secciones 3.3 y 3.4.5) donde se obtuvo evidencia suficiente para concluir que los datos no provienen de una distribución normal y es necesaria una prueba no paramétrica que no utilice la media como medida de tendencia central para describir los datos.

#### 4.3.2. Índice de Saturación de Langelier.

En la figura 4.7 se ilustra la gráfica de intervalos que muestra la tendencia que toma el Índice de Saturación de Langelier en la mezcla a medida aumenta la proporción de agua lluvia en esta.



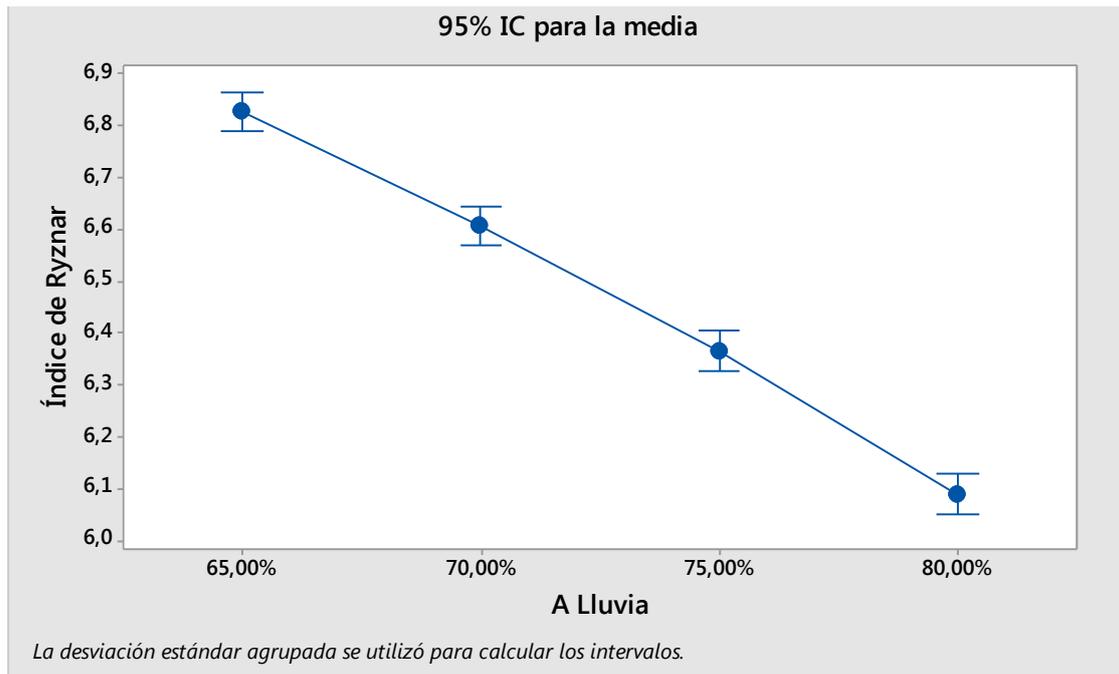
**Figura 4.7.** Gráfica de intervalos del promedio obtenido para la variable Índice de Saturación de Langelier en cada formulación.

De la gráfica de la figura anterior se puede interpretar que a medida se aumenta la proporción de agua lluvia en la mezcla, se tiene un incremento en el valor del Índice de Saturación de Langelier, donde se sobrepasa el límite permisible (entre 0.0 y 1.0) cuando se formula una mezcla con 80% de agua lluvia, donde el intervalo para esta variable esta entre 1.02 y 1.08 con media de 1.07.

El incremento hacia valores por encima de 1.0 indica moderada formación de incrustaciones (véase tablas 1.8 y 1.9), que como se ha ido planteando es a causa de la presencia de sales, carbonatos y sólidos en el agua lluvia por el arrastre del material de captación.

#### **4.3.3. Índice de Estabilidad de Ryznar.**

En la figura 4.8 se ilustra la gráfica de intervalos que muestra la tendencia que toma el Índice de Estabilidad de Ryznar en la mezcla a medida aumenta la proporción de agua lluvia en esta.



**Figura 4.8.** Gráfica de intervalos del promedio obtenido para la variable Índice de Saturación de Langelier en cada formulación.

La interpretación de la gráfica de la figura anterior es análoga a la 4.7: a medida se aumenta la proporción de agua lluvia en la mezcla, se tiene un decremento en el valor del Índice de Estabilidad de Ryznar, mientras se usa más proporción de agua lluvia en la mezcla, el índice se acerca al valor de 6.0 que es indicativo de ligera formación de incrustaciones y al reducir la proporción de agua lluvia y aumentar la de agua suavizada, el índice se acerca al valor de 7.0 que es indicativo de ligera formación de corrosión (véase tablas 1.11 y 1.12).

Como se ha discutido en este capítulo, el hecho de que se formen incrustaciones con el aumento en la proporción de agua lluvia en la mezcla, es a causa de la presencia de sales, carbonatos y sólidos provenientes del material de captación de agua lluvia. El hecho de que al disminuir la proporción de agua lluvia en la mezcla promueva la aparición de corrosión en el equipo es por la disminución o ausencia de estas sales que le dan alcalinidad al agua, ya que el agua suavizada posee estas sales en muy baja concentración, que dan dicha propiedad al agua.

## CONCLUSIONES

1. Del análisis estadístico de los resultados experimentales se obtuvo evidencia suficiente para aceptar la hipótesis de trabajo que plantea que los valores del índice de saturación de Langelier e índice de estabilidad de Ryznar muestran una calidad del agua para enfriamiento aceptable; cuyos valores se encuentran dentro del rango de estabilidad para tres de las cuatro formulaciones de mezcla agua suavizada y agua lluvia, estas no darán pauta a la formación de incrustaciones ni corrosión en la torre de enfriamiento.
2. En cuanto a la evaluación de los parámetros fisicoquímicos de la mezcla agua suavizada y agua lluvia se concluye que los valores de concentración de Dureza total, pH, Alcalinidad Total, TDS para las cuatro formulaciones aumenta a medida lo hace la proporción en volumen de agua lluvia, esto se debe a la presencia de sólidos, sales y carbonatos provenientes del arrastre del material de captación del agua lluvia.
3. De la evaluación de los parámetros fisicoquímicos de la mezcla agua suavizada y agua lluvia se concluye que los valores de concentración de sílice muestran tendencia a disminuir a medida se aumenta la proporción en volumen de agua lluvia, lo que se traduce en un incremento de los ciclos de concentración y que es indicativo del aprovechamiento del recurso agua lluvia para la reducción del consumo de agua suavizada de la red de suministro o de pozo para uso en torre de enfriamiento.
4. Para las variables respuesta Índice de Saturación de Langelier e Índice de Estabilidad de Ryznar no se tiene efecto de interacción entre las variables independientes 'proporción en volumen de agua suave' y 'proporción en volumen de agua lluvia' ya que los índices de estabilidad del agua no están directamente relacionados con el parámetro fisicoquímico 'concentración de sílice' sino que con el pH real y el pH de saturación del sistema de enfriamiento

por medio de los parámetros de calidad del agua: Temperatura, TDS, Alcalinidad Total y Dureza Total.

5. La variable respuesta Ciclos de concentración tiene dependencia directa con la concentración de sílice contenida en la mezcla formulada, controlada por medio de las proporciones de agua lluvia y agua suavizada empleadas en la mezcla; esto se complementa desde el análisis estadístico inferencial para esta variable, mostrando que sí hay efecto individual y de interacción entre las variables independientes 'proporción en volumen de agua suave' y 'proporción en volumen de agua lluvia'.
6. Al no haber una distribución normal para los resultados obtenidos de la variable respuesta Ciclos de concentración, por medio de la prueba no paramétrica de Friedman se concluye que las respuestas asociadas a cada una de las formulaciones no tienen la misma distribución de probabilidad con la misma mediana. Esto es de esperarse al no tener el mismo valor medio para todas las formulaciones ya que cada una tiene distintas proporciones entre sí, de agua suavizada y agua lluvia que son determinantes para manipular la concentración de sílice en la mezcla y obtener los ciclos de concentración.
7. Con los resultados del análisis estadístico, se rechaza la formulación 1 con proporciones en volumen de 20% agua suavizada – 80% agua lluvia ya que si bien cumple con los demás parámetros fisicoquímicos especificados para el modelo Marley Clase W400 y presenta el mayor incremento de ciclos de concentración con un valor promedio de 8.0, el valor del Índice de Saturación de Langelier da un valor promedio de 1.07, sobre pasando el valor máximo permisible de 1.00;

8. Se propone como la mejor formulación la mezcla con proporciones en volumen de 25% agua suavizada – 75% agua lluvia, al obtener para ésta el mayor incremento en los ciclos de concentración con un valor promedio de 6.5 después de la formulación 20% agua suavizada – 80% agua lluvia (valor promedio de 8.0), respecto a las demás formulaciones y presentar todos los parámetros de calidad del agua para enfriamiento dentro de los límites permisibles según modelo Marley Clase W400.

## RECOMENDACIONES

1. Al formular una mezcla de agua lluvia y agua suavizada se recomienda mantener dentro de los límites permisibles los parámetros fisicoquímicos de calidad de agua para un modelo de torre de enfriamiento, evitando el uso de mezclas que puedan provocar ensuciamiento o formación de incrustaciones en el equipo y la presencia de corrosión en este.
2. Para la realización de un nuevo estudio se recomienda, para el análisis de los parámetros de calidad de la mezcla de agua para enfriamiento, realizar otro muestreo de agua lluvia en la nueva o la misma región de interés, ya que los resultados de los parámetros fisicoquímicos son propios de la época, la región y el tipo de contaminantes presentes; con lo que se podrá determinar nuevas propuestas o comprobar la validez del presente trabajo.
3. Para investigaciones futuras se recomienda el uso de la ficha técnica que corresponda al modelo de torre de enfriamiento de interés si se pretende hacer el estudio en una industria en específica; para la evaluación de los parámetros fisicoquímicos de calidad del agua de enfriamiento. Para fines de interpretación de resultados experimentales, en este trabajo se utiliza el modelo Marley Clase W400.
4. Se recomienda para una reformulación de una mezcla, la utilización de agua lluvia con agua de la red de suministro o de pozo sin hacerla pasar por un suavizador, como otra alternativa para la reducción del consumo; comprobando si se obtiene un incremento en los ciclos de concentración o planteando nuevas propuestas.

5. Se recomienda el uso de las restantes dos formulaciones de mezcla agua lluvia – agua suavizada al cumplir con las especificaciones del modelo de torre de enfriamiento, ya que si bien en la mejor formulación con mezcla 25% agua suave– 75% agua lluvia se tiene el mayor incremento de ciclos de concentración, la disponibilidad de agua lluvia es un factor limitante por la gran demanda de agua de refrigeración.

## REFERENCIAS

- APHA, AWWA & WEF. (2018). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington DC, USA: American Public Health Association, American Water Works Association & Water Environment Federation. Recuperado de: <https://www.standardmethods.org/>
- Arenas, J. (2015). *Determinación del caudal óptimo de purga en el basín de la torre de enfriamiento en una empresa de generación de energía a través de los ciclos de concentración* (Tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala. Ciudad de Guatemala, Guatemala. Recuperado de: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/904/>
- Arnabat, I. (2018). ¿Qué es una torre de refrigeración o enfriamiento? Funcionamiento y seguridad. Bilbao, Vizcaya, España: *Calor y Frío*. Recuperado de: <https://www.caloryfrio.com/refrigeracion-frio/que-es-torre-de-refrigeracion-enfriamiento-funcionamiento-seguridad.html>
- Berlanga, V. y Rubio, M. (2012). Clasificación de Pruebas No Paramétricas. Universidad de Barcelona, España: *Revista d'Innovació i Recerca en Educació* [Revista de Innovación e Investigación en Educación], 5(2), 101-113. doi: 10.1344/reire2012.5.2528
- Betz, W. (1991). *Betz Handbook of Industrial Water Conditioning*. (9ª ed.). Philadelphia, Pennsylvania, USA: Betz Laboratories, Inc.
- Cartwright, P. (2017). Recolección de Aguas Pluviales. Arizona, EEUU: *Water Conditioning and Purification Magazine, WCP-Online*. Recuperado de: <http://wcponline.com/2017/07/15/rainwater-harvesting-stormwater-collection/>
- Castillo, E. (2007). *Optimización de Torres de Enfriamiento* (Tesis de pregrado). Instituto Tecnológico de Colima. Colima, México. Recuperado de: <https://dspace.colima.tecnm.mx/>
- Chávez, J., Hernández, W. y Kopecky, L. (2012). Problemática y conocimiento actual de las tefras. Tierra Blanca Joven en el Área Metropolitana de San Salvador [Ilustración]. San Salvador, El Salvador. *Revista Geológica de América Central*. Recuperado de: <https://www.readcube.com/articles/10.15517%2Frgac.v0i47.6496>
- Danahé, J. (2016). Torres de Enfriamiento: ¿Cómo funcionan?. México DF, México: *Cero Grados*. Recuperado de: <https://www.0grados.com.mx/torres-de-enfriamiento-como-funcionan/>
- Delrey, I. (2019). Índice de Langelier. Madrid, España: *Tiloom*. Recuperado de: <https://www.tiloom.com/indice-de-langelier/>

- HANNA. (2020). HI770 Colorímetro Checker® HC para sílice intervalo alto. Rhode Island, EEUU: *HANNA Instruments*. Recuperado de: <https://hannainst.com.mx/productos/linea/analisis-de-agua/colorimetro-checker-hc-para-silice-intervalo-alto/>
- Hernández, K. y Ortez, C. (2006). *Descontaminación por el Método de Adsorción en agua de pozos y agua lluvia destinada al consumo humano en comunidades rurales ubicadas al Sur del departamento de La Libertad* (Tesis de pregrado). Universidad de El Salvador. San Salvador, El Salvador. Recuperado de: <http://ri.ues.edu.sv>
- IDAE. (2007). *Guía Técnica de Torres de Refrigeración*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. 1ª ed. Madrid, España. Recuperado de: <https://www.idae.es/publicaciones/guia-tecnica-torres-de-refrigeracion>
- IDEAM. (2017). *La Química de la Lluvia Ácida*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Gobierno de Colombia. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/generalidades-de-la-lluvia-acida>
- Jimeno, I. y Olmos, C. (1999). *Estudio y cálculo para la selección de una Torre de Enfriamiento en la Compañía Colombiana de Clinker S.A* (Tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de Bolívar. Cartagena, Colombia. Recuperado de: <https://repositorio.utb.edu.co>
- Lange, M., Molina, M. y Ramos, M. (2010). *Determinación de la eficiencia de la torre de enfriamiento del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Técnica de Manabí* (Tesis de pregrado). Universidad Técnica de Manabí. Portoviejo, Manabí, Ecuador. Recuperado de: <http://repositorio.utm.edu.ec>
- Law, A. (1991). *Modelado y Análisis de Simulación* (4ª ed., pp. 737-740). Arizona, EEUU: Mc Graw Hill.
- Marley. (2009). *Torre de Enfriamiento Marley Clase W400*. Manual de Usuario. Kansas, EEUU: *SPX COOLING TECHNOLOGIES*. Recuperado de: <https://spxcooling.com/library/class-w400-counterflow-tower-manual/>
- MARN. (2020). *Informe de condiciones del inicio de época lluviosa en El Salvador - 2020*. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. San Salvador, El Salvador. Recuperado de: <https://www.marn.gob.sv/informe-de-condiciones-del-inicio-de-epoca-lluviosa-en-el-salvador-2020/>
- Mejía, G. y Salamea, P. (2011). *Diseño de un sistema para reciclado, control y utilización de agua lluvia en la Ciudad de Cuenca, Ecuador* (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca, Ecuador. Recuperado de: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/1420>

- Minguito, A. (2015). *Características de funcionamiento de torres de refrigeración híbridas* (Tesis de pregrado). Universidad Carlos III de Madrid. Madrid, España. Recuperado de: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/24076>
- Minitab. (2019) ¿Qué es un valor crítico? Pennsylvania, EEUU: *Soporte Técnico de Minitab*. Recuperado de: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/>
- Minitab. (2019). Comprensión del Análisis de Varianza (ANOVA) y la Prueba F. Pennsylvania, EEUU: *El Blog de Minitab*. Recuperado de: <https://blog.minitab.com/es/comprension-del-analisis-de-varianza-anova-y-la-prueba-f>
- Minitab. (2019). Diagrama de Pareto de efectos estandarizados. Pennsylvania, EEUU: *Soporte Técnico de Minitab*. Recuperado de: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/>
- Minitab. (2019). Gráficas de residuos para Gráfica de línea ajustada. Pennsylvania, EEUU: *Soporte Técnico de Minitab*. Recuperado de: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/>
- Minitab. (2019). Interpretar los estadísticos para almacenar estadísticos descriptivos. Pennsylvania, EEUU: *Soporte Técnico de Minitab*. Recuperado de: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/>
- Minitab. (2019). Interpretar los resultados clave para Gráfica de cubo. Pennsylvania, EEUU: *Soporte Técnico de Minitab*. Recuperado de: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/>
- Minitab. (2019). Interpretar los resultados clave para la prueba de Friedman. Pennsylvania, EEUU: *Soporte Técnico de Minitab*. Recuperado de: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/>
- Minitab. (2019). Interpretar todos los estadísticos y gráficas para ANOVA. Pennsylvania, EEUU: *Soporte Técnico de Minitab*. Recuperado de: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/>
- Minitab. (2019). Interpretar todos los estadísticos y gráficas para Prueba de normalidad. Pennsylvania, EEUU: *Soporte Técnico de Minitab*. Recuperado de: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/>
- Montgomery, D. (2004). *Diseño y Análisis de Experimentos* (2ª ed., pp. 218-276). Tempe, Arizona, EEUU: Limusa Wiley.
- Moreno, A. (2011). El Agua. Calidad y Contaminación: Índices de estabilidad de las aguas carbonato-cálcicas. Barcelona, España: *MAILXMAIL - grupo INTERCOM*. Recuperado de: <http://www.mailxmail.com/curso-agua-calidad-contaminacion-2-2/indices-estabilidad-aguas-carbonato-calcicas>

- Núñez, C. (2018). Análisis de Varianza No Paramétrica: Un punto de vista a favor para utilizarla. Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Cuernavaca, Morelos, México: *Acta Agrícola y Pecuaria*, 4(3), 69-79  
Recuperado de: <http://revistas.uaem.mx/>
- OPAMSS. (2014). *San Salvador y su Área Metropolitana*. Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador. San Salvador, El Salvador.  
Recuperado de: <https://docplayer.es/21814563-San-salvador-y-su-area-metropolitana.html>
- Pauta, A. y Quezada, D. (2017). *Determinación de la tendencia corrosiva e incrustante del agua potable distribuida en la Ciudad de Azogues* (Tesis de pregrado). Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador. Recuperado de: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/>
- Pérez, F. y Urrea, M. (2015). *Características Físicoquímicas del Agua [Diapositivas]*. Trabajo presentado en Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena, España. Recuperado de: <https://ocw.bib.upct.es/>
- Poczatek, B. (2019). Captación y Tratamiento de Aguas Pluviales. Arizona, EEUU: *Water Conditioning and Purification Magazine, WCP-Online*.  
Recuperado de: <http://wcponline.com/2019/07/15/rainwater-catchment-and-treatment/>
- Sampieri, R. (2014). *Metodología de la Investigación* (6ª ed., pp. 88-194). México DF, México: Mc Graw Hill Education.
- Teos, E. (3 de mayo de 2019). ASI anuncia la segunda edición del Congreso HIDRO 2019. *La Prensa Gráfica*. San Salvador, El Salvador. Recuperado de: <https://www.laprensagrafica.com/economia/ASI-anuncia-la-segunda-edicion-del-Congreso-HIDRO-2019-20190502-0537.html>
- VIVOSUN. (2020). VIVOSUN PH and TDS METER COMBO. California, EEUU: *VIVOSUN Instruments*. Recuperado de: <https://vivosun.com/products/vivosun-ph-tds-meter-tester-combo-for-water>
- Walpole, R., Myers, R., Myers, S., y Ye, K. (2012). *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias*. (9ª ed., pp. 171-740) México D.F., México: Pearson.

## ANEXOS

### Anexo A. Resultados experimentales de los parámetros fisicoquímicos de calidad del agua.

Las tablas A.1 a la A.10 muestran los resultados obtenidos de las mediciones de los parámetros fisicoquímicos de calidad de agua en torre de enfriamiento, tanto para agua suave, agua lluvia y para cada formulación de mezcla en las 10 réplicas del experimento.

**Tabla A.1.** Resultados experimentales de parámetros fisicoquímicos para la réplica 1.

Parámetros Fisicoquímicos	Unidades	Agua suave	Agua Lluvia	F 1: 20%A-80%B		F 2: 25%A-75%B		F 3: 30%A-70%B		F 4: 35%A-65%B	
		A	B	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre
pH		7.04	6.35	6.49	8.27	6.52	8.26	6.56	8.25	6.59	8.2
TDS	ppm	310	17	75.60	584.54	90.25	570.00	104.90	559.96	119.55	552.62
Dureza total	ppm	0	10	8	62	8	47	7	37	7	30
Alcalinidad Total	ppm	170	10	42	325	50	316	58	310	66	305
Sílice	ppm	89	2	19.40	150	23.75	150	28.10	150	32.45	150

**Tabla A.2.** Resultados experimentales de parámetros fisicoquímicos para la réplica 2.

Parámetros Fisicoquímicos	Unidades	Agua suave	Agua Lluvia	F 1: 20%A-80%B		F 2: 25%A-75%B		F 3: 30%A-70%B		F 4: 35%A-65%B	
		A	B	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre
pH		7.04	6.35	6.49	8.23	6.52	8.2	6.56	8.1	6.5915	8.1
TDS	ppm	325	20	81.00	607.50	96.25	595.36	111.50	586.84	126.75	580.53
Dureza total	ppm	0	10	8	60	8	46	7	37	7	30
Alcalinidad Total	ppm	165	10	41	308	49	302	57	297	64	294
Sílice	ppm	88	3	20.00	150	24.25	150	28.50	150	32.75	150

**Tabla A.3.** Resultados experimentales de parámetros fisicoquímicos para la réplica 3.

Parámetros Fisicoquímicos	Unidades	Agua suave	Agua Lluvia	F 1: 20%A-80%B		F 2: 25%A-75%B		F 3: 30%A-70%B		F 4: 35%A-65%B	
		A	B	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre
pH		7.15	6.45	6.59	8.2	6.63	8.15	6.66	8.1	6.695	8.05
TDS	ppm	315	15	75.00	611.41	90.00	600.00	105.00	592.11	120	586.32
Dureza total	ppm	0	10	8	65	8	50	7	39	7	32
Alcalinidad Total	ppm	160	10	40	326	48	317	55	310	63	305
Sílice	ppm	84	2	18.40	150	22.50	150	26.60	150	30.7	150

**Tabla A.4.** Resultados experimentales de parámetros fisicoquímicos para la réplica 4.

Parámetros Fisicoquímicos	Unidades	Agua suave	Agua Lluvia	F 1: 20%A-80%B		F 2: 25%A-75%B		F 3: 30%A-70%B		F 4: 35%A-65%B	
		A	B	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre
pH		7.25	6.05	6.29	8.23	6.35	8.2	6.41	8.19	6.47	8.17
TDS	ppm	330	19	81.20	647.87	96.75	637.91	112.30	630.90	127.85	625.69
Dureza total	ppm	0	10	8	64	8	49	7	39	7	32
Alcalinidad Total	ppm	160	10	40	319	48	313	55	309	63	306
Sílice	ppm	82	3	18.80	150	22.75	150	26.70	150	30.65	150

**Tabla A.5.** Resultados experimentales de parámetros fisicoquímicos para la réplica 5.

Parámetros Fisicoquímicos	Unidades	Agua suave	Agua Lluvia	F 1: 20%A-80%B		F 2: 25%A-75%B		F 3: 30%A-70%B		F 4: 35%A-65%B	
		A	B	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre
pH		7.35	6.45	6.63	8.3	6.68	8.25	6.72	8.23	6.765	8.2
TDS	ppm	322	15	76.40	629.67	91.75	618.54	107.10	610.84	122.45	605.19
Dureza total	ppm	0	10	8	66	8	51	7	40	7	32
Alcalinidad Total	ppm	160	10	40	330	48	320	55	314	63	309
Sílice	ppm	83	2	18.20	150	22.25	150	26.30	150	30.35	150

**Tabla A.6.** Resultados experimentales de parámetros fisicoquímicos para la réplica 6.

Parámetros Fisicoquímicos	Unidades	Agua suave	Agua Lluvia	F 1: 20%A-80%B		F 2: 25%A-75%B		F 3: 30%A-70%B		F 4: 35%A-65%B	
		A	B	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre
pH		7.2	6.31	6.49	8.22	6.53	8.21	6.58	8.2	6.6215	8.19
TDS	ppm	322	15	76.40	596.88	91.75	591.94	107.10	588.46	122.45	585.89
Dureza total	ppm	0	10	8	63	8	48	7	38	7	31
Alcalinidad Total	ppm	160	10	40	313	48	306	55	302	63	299
Sílice	ppm	84	3	19.20	150	23.25	150	27.30	150	31.35	150

**Tabla A.7.** Resultados experimentales de parámetros fisicoquímicos para la réplica 7.

Parámetros Fisicoquímicos	Unidades	Agua suave	Agua Lluvia	F 1: 20%A-80%B		F 2: 25%A-75%B		F 3: 30%A-70%B		F 4: 35%A-65%B	
		A	B	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre
pH		7.14	6.26	6.44	8.22	6.48	8.21	6.52	8.2	6.568	8.19
TDS	ppm	328	18	80.00	659.34	95.50	643.82	111.00	633.08	126.5	625.21
Dureza total	ppm	0	10	8	66	8	51	7	40	7	32
Alcalinidad Total	ppm	150	10	38	313	45	303	52	297	59	292
Sílice	ppm	83	2	18.20	150	22.25	150	26.30	150	30.35	150

**Tabla A.8.** Resultados experimentales de parámetros fisicoquímicos para la réplica 8.

Parámetros Fisicoquímicos	Unidades	Agua suave	Agua Lluvia	F 1: 20%A-80%B		F 2: 25%A-75%B		F 3: 30%A-70%B		F 4: 35%A-65%B	
		A	B	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre
pH		7.05	6.44	6.56	8.25	6.59	8.23	6.62	8.21	6.6535	8.2
TDS	ppm	335	17	80.60	650.00	96.50	636.26	112.40	626.77	128.3	619.81
Dureza total	ppm	0	10	8	65	8	49	7	39	7	31
Alcalinidad Total	ppm	160	10	40	323	48	313	55	307	63	302
Sílice	ppm	85	2	18.60	150	22.75	150	26.90	150	31.05	150

**Tabla A.9.** Resultados experimentales de parámetros fisicoquímicos para la réplica 9.

Parámetros Fisicoquímicos	Unidades	Agua suave	Agua Lluvia	F 1: 20%A-80%B		F 2: 25%A-75%B		F 3: 30%A-70%B		F 4: 35%A-65%B	
		A	B	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre
pH		7.37	6.03	6.30	8.25	6.37	8.2	6.43	8.19	6.499	8.18
TDS	ppm	328	21	82.40	671.74	97.75	651.67	113.10	637.78	128.45	627.61
Dureza total	ppm	0	10	8	65	8	50	7	39	7	32
Alcalinidad Total	ppm	160	10	40	326	48	317	55	310	63	305
Sílice	ppm	84	2	18.40	150	22.50	150	26.60	150	30.7	150

**Tabla A.10.** Resultados experimentales de parámetros fisicoquímicos para la réplica 10.

Parámetros Fisicoquímicos	Unidades	Agua suave	Agua Lluvia	F 1: 20%A-80%B		F 2: 25%A-75%B		F 3: 30%A-70%B		F 4: 35%A-65%B	
		A	B	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre	Mezcla	Torre
pH		7.3	6.25	6.46	8.22	6.51	8.21	6.57	8.2	6.6175	8.18
TDS	ppm	327	19	80.60	629.69	96.00	619.35	111.40	612.09	126.8	606.70
Dureza total	ppm	0	10	8	63	8	48	7	38	7	31
Alcalinidad Total	ppm	160	10	40	313	48	306	55	302	63	299
Sílice	ppm	84	3	19.20	150	23.25	150	27.30	150	31.35	150

## Anexo B. Resultados obtenidos de las variables respuesta $C_c$ , $L$ y $R$ .

Las tablas B.1 a la B.10 muestran los resultados obtenidos de las variables respuesta  $C_c$ ,  $L$  y  $R$  para cada formulación de mezcla de agua suavizada y agua lluvia, calculados a partir de los resultados obtenidos en las 10 réplicas del experimento.

**Tabla B.1.** Resultados obtenidos de variables respuestas para la réplica 1.

Variable respuesta	Formulación			
	F1	F2	F3	F4
<b>Ciclos de Concentración (<math>C_c</math>)</b>	<b>7.7</b>	<b>6.3</b>	<b>5.3</b>	<b>4.6</b>
A	0.177	0.176	0.175	0.174
B	1.993	1.993	1.993	1.993
C	1.791	1.675	1.572	1.478
D	2.512	2.499	2.491	2.484
pH de Saturación ( $pH_s$ )	7.167	7.294	7.405	7.506
<b>Índice de Saturación de Langelier (L)</b>	<b>1.10</b>	<b>0.97</b>	<b>0.85</b>	<b>0.69</b>
<b>Índice de Estabilidad de Ryznar (R)</b>	<b>6.06</b>	<b>6.33</b>	<b>6.56</b>	<b>6.81</b>

**Tabla B.2.** Resultados obtenidos de variables respuestas para la réplica 2.

Variable respuesta	Formulación			
	F1	F2	F3	F4
<b>Ciclos de Concentración (<math>C_c</math>)</b>	<b>7.5</b>	<b>6.2</b>	<b>5.3</b>	<b>4.6</b>
A	0.178	0.177	0.177	0.176
B	1.993	1.993	1.993	1.993
C	1.778	1.666	1.566	1.474
D	2.488	2.479	2.473	2.469
pH de Saturación ( $pH_s$ )	7.206	7.325	7.431	7.527
<b>Índice de Saturación de Langelier (L)</b>	<b>1.02</b>	<b>0.87</b>	<b>0.67</b>	<b>0.57</b>
<b>Índice de Estabilidad de Ryznar (R)</b>	<b>6.18</b>	<b>6.45</b>	<b>6.76</b>	<b>6.95</b>

**Tabla B.3.** Resultados obtenidos de variables respuestas para la réplica 3.

Variable respuesta	Formulación			
	F1	F2	F3	F4
<b>Ciclos de Concentración (Cc)</b>	<b>8.2</b>	<b>6.7</b>	<b>5.6</b>	<b>4.9</b>
A	0.179	0.178	0.177	0.177
B	1.993	1.993	1.993	1.993
C	1.814	1.699	1.596	1.502
D	2.513	2.501	2.492	2.485
pH de Saturación (pH <sub>s</sub> )	7.144	7.272	7.383	7.484
<b>Índice de Saturación de Langelier (L)</b>	<b>1.06</b>	<b>0.88</b>	<b>0.72</b>	<b>0.57</b>
<b>Índice de Estabilidad de Ryznar (R)</b>	<b>6.09</b>	<b>6.39</b>	<b>6.67</b>	<b>6.92</b>

**Tabla B.4.** Resultados obtenidos de variables respuestas para la réplica 4.

Variable respuesta	Formulación			
	F1	F2	F3	F4
<b>Ciclos de Concentración (Cc)</b>	<b>8.0</b>	<b>6.6</b>	<b>5.6</b>	<b>4.9</b>
A	0.181	0.180	0.180	0.180
B	1.993	1.993	1.993	1.993
C	1.805	1.694	1.595	1.503
D	2.504	2.496	2.490	2.486
pH de Saturación (pH <sub>s</sub> )	7.166	7.284	7.389	7.485
<b>Índice de Saturación de Langelier (L)</b>	<b>1.06</b>	<b>0.92</b>	<b>0.80</b>	<b>0.69</b>
<b>Índice de Estabilidad de Ryznar (R)</b>	<b>6.10</b>	<b>6.37</b>	<b>6.59</b>	<b>6.80</b>

**Tabla B.5.** Resultados obtenidos de variables respuestas para la réplica 5.

Variable respuesta	Formulación			
	F1	F2	F3	F4
<b>Ciclos de Concentración (Cc)</b>	<b>8.2</b>	<b>6.7</b>	<b>5.7</b>	<b>4.9</b>
A	0.180	0.179	0.179	0.178
B	1.993	1.993	1.993	1.993
C	1.819	1.704	1.601	1.507
D	2.518	2.505	2.496	2.490
pH de Saturación (pH <sub>s</sub> )	7.136	7.263	7.374	7.475
<b>Índice de Saturación de Langelier (L)</b>	<b>1.16</b>	<b>0.99</b>	<b>0.86</b>	<b>0.72</b>
<b>Índice de Estabilidad de Ryznar (R)</b>	<b>5.97</b>	<b>6.28</b>	<b>6.52</b>	<b>6.75</b>

**Tabla B.6.** Resultados obtenidos de variables respuestas para la réplica 6.

Variable respuesta	Formulación			
	F1	F2	F3	F4
<b>Ciclos de Concentración (Cc)</b>	<b>7.8</b>	<b>6.5</b>	<b>5.5</b>	<b>4.8</b>
A	0.178	0.177	0.177	0.177
B	1.993	1.993	1.993	1.993
C	1.796	1.685	1.585	1.493
D	2.495	2.486	2.480	2.476
pH de Saturación (pH <sub>s</sub> )	7.180	7.300	7.405	7.502
<b>Índice de Saturación de Langelier (L)</b>	<b>1.04</b>	<b>0.91</b>	<b>0.79</b>	<b>0.69</b>
<b>Índice de Estabilidad de Ryznar (R)</b>	<b>6.14</b>	<b>6.39</b>	<b>6.61</b>	<b>6.81</b>

**Tabla B.7.** Resultados obtenidos de variables respuestas para la réplica 7.

Variable respuesta	Formulación			
	F1	F2	F3	F4
<b>Ciclos de Concentración (Cc)</b>	<b>8.2</b>	<b>6.7</b>	<b>5.7</b>	<b>4.9</b>
A	0.182	0.181	0.180	0.180
B	1.993	1.993	1.993	1.993
C	1.819	1.704	1.601	1.507
D	2.496	2.482	2.472	2.465
pH de Saturación (pH <sub>s</sub> )	7.160	7.289	7.400	7.501
<b>Índice de Saturación de Langelier (L)</b>	<b>1.06</b>	<b>0.92</b>	<b>0.80</b>	<b>0.69</b>
<b>Índice de Estabilidad de Ryznar (R)</b>	<b>6.10</b>	<b>6.37</b>	<b>6.60</b>	<b>6.81</b>

**Tabla B.8.** Resultados obtenidos de variables respuestas para la réplica 8.

Variable respuesta	Formulación			
	F1	F2	F3	F4
<b>Ciclos de Concentración (Cc)</b>	<b>8.1</b>	<b>6.6</b>	<b>5.6</b>	<b>4.8</b>
A	0.181	0.180	0.180	0.179
B	1.993	1.993	1.993	1.993
C	1.810	1.694	1.591	1.497
D	2.509	2.496	2.487	2.480
pH de Saturación (pH <sub>s</sub> )	7.156	7.284	7.395	7.496
<b>Índice de Saturación de Langelier (L)</b>	<b>1.09</b>	<b>0.95</b>	<b>0.81</b>	<b>0.70</b>
<b>Índice de Estabilidad de Ryznar (R)</b>	<b>6.06</b>	<b>6.34</b>	<b>6.58</b>	<b>6.79</b>

**Tabla B.9.** Resultados obtenidos de variables respuestas para la réplica 9.

Variable respuesta	Formulación			
	F1	F2	F3	F4
<b>Ciclos de Concentración (Cc)</b>	<b>8.2</b>	<b>6.7</b>	<b>5.6</b>	<b>4.9</b>
A	0.183	0.181	0.180	0.180
B	1.993	1.993	1.993	1.993
C	1.814	1.699	1.596	1.502
D	2.513	2.501	2.492	2.485
pH de Saturación (pH <sub>s</sub> )	7.148	7.275	7.386	7.487
<b>Índice de Saturación de Langelier (L)</b>	<b>1.10</b>	<b>0.92</b>	<b>0.80</b>	<b>0.69</b>
<b>Índice de Estabilidad de Ryznar (R)</b>	<b>6.05</b>	<b>6.35</b>	<b>6.58</b>	<b>6.79</b>

**Tabla B.10.** Resultados obtenidos de variables respuestas para la réplica 10.

Variable respuesta	Formulación			
	F1	F2	F3	F4
<b>Ciclos de Concentración (Cc)</b>	<b>7.8</b>	<b>6.5</b>	<b>5.5</b>	<b>4.8</b>
A	0.180	0.179	0.179	0.178
B	1.993	1.993	1.993	1.993
C	1.796	1.685	1.585	1.493
D	2.495	2.486	2.480	2.476
pH de Saturación (pH <sub>s</sub> )	7.183	7.302	7.407	7.503
<b>Índice de Saturación de Langelier (L)</b>	<b>1.04</b>	<b>0.91</b>	<b>0.79</b>	<b>0.68</b>
<b>Índice de Estabilidad de Ryznar (R)</b>	<b>6.15</b>	<b>6.39</b>	<b>6.61</b>	<b>6.83</b>

## Anexo C. Fotografías de la Etapa Experimental.

En las figuras C.1 a la C.12 se muestran fotografías como evidencia de la medición de parámetros fisicoquímicos de calidad de agua de muestras colectadas de agua suavizada y agua lluvia.



**Figura C.1.** Determinación de Dureza Total en muestra de agua suavizada.



**Figura C.2.** Determinación de Dureza Total en muestra de agua lluvia.



**Figura C.3.** Determinación de Sólidos Disueltos Totales en muestra de agua lluvia con medidor digital TDS y EC VIVOSUN.



**Figura C.4.** Determinación de pH en muestra de agua lluvia con pH-metro portátil VIVOSUN.



**Figura C.5.** Determinación de Sólidos Disueltos Totales en muestra de agua suavizada con medidor digital TDS y EC VIVOSUN.



**Figura C.6.** Determinación de pH en muestra de agua suavizada con pH-metro portátil VIVOSUN.



**Figura C.7.** Determinación de Alcalinidad Parcial del Agua Suavizada con indicador fenolftaleína.



**Figura C.8.** Determinación de Alcalinidad Total del Agua Suavizada con indicador naranja de metilo.



**Figura C.9.** Determinación de Alcalinidad Parcial de Agua Lluvia con indicador fenolftaleína.



**Figura C.10.** Determinación de Alcalinidad Total del Agua Lluvia con indicador naranja de metilo.



**Figura C.11.** Determinación de Sílice en muestra de Agua Suavizada con colorímetro de mano (HC) HANNA Checker® HI 770.



**Figura C.12.** Determinación de Sílice en muestra de Agua Lluvia con colorímetro de mano (HC) HANNA Checker ® HI 770.

## Anexo D. Taylor Test Kit: Drop Test para Alcalinidad Parcial/Total y Dureza Total.

Las figuras D.1 y D.2 muestran los instructivos del kit de prueba de Taylor utilizados para la medición de Dureza Total y Alcalinidad Total de las muestras colectadas.

**DROP TEST**  
**P/T ALKALINITY (1 drop = 10 ppm)**

Instr. #5209

**COMPONENTS:**  
1 x 5209      **Instruction**  
1 x 9198G    **Sample Tube, Graduated, 25 mL, plastic w/cap and green dot**  
1 x R-0638G-C **Phenolphthalein Indicator (green cap), 2 oz, DB**  
1 x R-0645-C    **Total Alkalinity Indicator, 2 oz, DB**  
1 x R-0687G-C **Sulfuric Acid .12N (green cap), 2 oz, DB**

**TO ORDER REPLACEMENT PARTS AND REAGENTS CALL TOLL-FREE 800-TEST KIT (800-837-8548).**

**PROCEDURE:**  
**CAREFULLY READ AND FOLLOW PRECAUTIONS ON REAGENT LABELS. KEEP REAGENTS AWAY FROM CHILDREN.**

1. Rinse and fill 25 mL sample tube (#9198G) to 25 mL mark with water to be tested.
- NOTE: For results in grains per gallon (gpg), fill to 14.6 mL mark.
2. Add 3 drops R-0638G Phenolphthalein Indicator. Swirl to mix. Sample will turn pink (Fig. 1) if P alkalinity is present—proceed to Step 3. If colorless, go to Step 4.
3. If pink, add R-0687G Sulfuric Acid .12N dropwise, swirling and counting after each drop, until color changes from pink to colorless. Record drops as P reading. Always hold bottle in vertical position.
4. Add 5 drops R-0645 Total Alkalinity Indicator. Swirl to mix. Sample should turn green (Fig. 2).
5. Add R-0687G Sulfuric Acid .12N dropwise, swirling and counting after each drop, until color changes from green to red (Fig. 3). Record total drops (Steps 3 and 5) as T reading. Always hold bottle in vertical position.
6. Multiply P reading by 10. Record as parts per million (ppm) P alkalinity as calcium carbonate. Multiply T reading by 10. Record as ppm T alkalinity as calcium carbonate. For 14.6 mL sample, record P reading as grains per gallon (gpg) P alkalinity as calcium carbonate. Record T reading as gpg T alkalinity as calcium carbonate.



**taylor** 31 Loveton Circle, Sparks, MD 21152 U.S.A.  
800-TEST KIT (837-8548) • 410-472-4340

3/09

*Figura D.1. Taylor Test Kit: Drop Test para Alcalinidad Parcial/Total.*

**DROP TEST**  
**TOTAL HARDNESS (1 drop = 10 ppm)**

Instr. #5202

**COMPONENTS:**

- |               |   |
|---------------|---|
| 1 x 5202      | Instruction   |
| 1 x 9198B     | Sample Tube, Graduated, 25 mL, plastic w/cap and blue dot |
| 1 x R-0619B-C | Hardness Buffer (blue cap), 2 oz, DB                      |
| 1 x R-0620B-I | Hardness Indicator Powder (blue cap), 10 g                |
| 1 x R-0683-C  | Hardness Reagent, 2 oz, DB                                |

**TO ORDER REPLACEMENT PARTS AND REAGENTS CALL TOLL-FREE 800-TEST KIT (800-837-8548).**

**PROCEDURE:**

**CAREFULLY READ AND FOLLOW PRECAUTIONS ON REAGENT LABELS.  
KEEP REAGENTS AWAY FROM CHILDREN.**

1. Rinse and fill 25 mL sample tube (#9198B) to 25 mL mark with water to be tested (Fig. 1).

NOTE: For results in grains per gallon (gpg), fill to 14.6 mL mark.

2. Add 5 drops R-0619B Hardness Buffer. Swirl to mix.
3. Add 1 dipper R-0620B Hardness Indicator Powder. Swirl until dissolved. If hardness is present, sample will turn red (Fig. 2).
4. Add R-0683 Hardness Reagent dropwise, swirling and counting after each drop, until color changes from red to blue (Fig. 3). Always hold bottle in vertical position.
5. Multiply drops of R-0683 Hardness Reagent by 10. Record as parts per million (ppm) total hardness as calcium carbonate.

NOTE: For 14.6 mL sample, record drops as grains per gallon (gpg) total hardness as calcium carbonate.



Fig. 1



Fig. 2



Fig. 3



31 Loveton Circle, Sparks, MD 21152 U.S.A.  
800-TEST KIT (837-8548) • 410-472-4340

4/09

**Figura D.2. Taylor Test Kit: Drop Test para Dureza Total.**

## Anexo E. Licencia de Minitab.

La figura E.1 muestra la información de licencia de Minitab, adquirida para la realización de los análisis estadísticos de resultados y pruebas de hipótesis de este estudio.



**Figura E.1.** Licencia de programa estadístico Minitab.