

Maestría en Ingeniería Civil

Eficiencia de la cloración en la eliminación de *Escherichia coli* y coliformes totales en una piscina termal

Luis Alejandro Galán Hernández

Bogotá, D.C., 05 de Diciembre de 2019

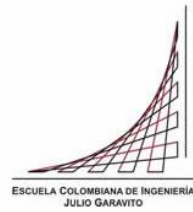


Eficiencia de la cloración en la eliminación de *Escherichia coli* y coliformes totales en una piscina termal

Tesis para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en Ingeniería Ambiental

**Ing. Mg. Amalia Avendaño Sánchez
Directora**

Bogotá, D.C., Diciembre de 2019



La tesis de maestría titulada “Eficiencia de la cloración en la eliminación de *Escherichia coli* y coliformes totales en una piscina termal”, presentada por Luis Alejandro Galán Hernández, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magister en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Ambiental.

Directora de la tesis

Amalia Avendaño Sánchez

Jurado

Jairo Alberto Romero Rojas

Jurado

Gladys Rocío González Leal

Bogotá, D.C., Enero de 2020

Dedicatoria

A Dios por ser compañía eterna en mi vida. A mi mamá y papá por su valiosa labor familiar.

Agradecimientos

A mi familia por la confianza y tenacidad en lograr una meta más.

A Milly Iglesias y mi hijo Pablo Galán por su calurosa compañía durante la realización de éste trabajo.

A mi directora Amalia Avendaño Sánchez por su gran aporte y compromiso.

Al ingeniero Jairo Alberto Romero Rojas por su dedicación en la academia durante la especialización y maestría.

A los propietarios del balneario termal por permitir el ingreso y los estudios.

Resumen

Según el Servicio Geológico de Colombia, el país cuenta con 320 fuentes termales identificadas, de las cuales, la mayoría son utilizadas en piscinas termales para el uso recreativo o como aguas mineromedicinales. En Colombia, diferentes estudios microbiológicos y fisicoquímicos realizados en piscinas termales han demostrado la presencia de organismos patógenos tales como *Pseudomonas*, coliformes totales, *Escherichia coli*, entre otros; que están relacionados con enfermedades en seres humanos. Sin embargo, por la ausencia de una normatividad clara relacionada con éste tipo de aguas, vemos que no existe un claro manejo de las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas para la prevención de posibles enfermedades que impactan la salud pública.

Éste trabajo evaluó el efecto de la cloración como medida de control contra los organismos patógenos en piscinas termales, a partir de diferentes dosis aplicadas a muestras del agua de la piscina termal. En el capítulo 1 se presenta la justificación general del tema a estudiar; en el capítulo 2 los objetivos generales y específicos; en el capítulo 3 se encuentra el estado del arte definiendo y clasificando el agua termal, los usos del agua termal, los estudios previos realizados en aguas de éste tipo a nivel internacional y nacional, enfermedades asociadas a los organismos patógenos en piscinas termales, técnicas aplicadas para el tratamiento de piscinas termales, y normatividad nacional e internacional; en el capítulo 4 la metodología utilizada para la toma de muestras y ensayos de laboratorio; en el capítulo 5 los resultados de la caracterización fisicoquímica, microbiológica y de demanda de cloro para el agua de la piscina termal; en el capítulo 6 el análisis de resultados de la caracterización y la efectividad del cloro; y en el capítulo 7 las conclusiones del trabajo realizado.

Tabla de Contenido

Índice de Tablas	10
Índice de Figuras	12
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	14
CAPÍTULO 2. OBJETIVOS.....	16
CAPITULO 3. MARCO TEORICO.....	17
3.1 Aguas termales	17
3.1.1 Clasificación de aguas termominerales.....	18
3.1.2 Uso convencional de las piscinas termales	20
3.2 Organismos patógenos en piscinas termales	23
3.2.1 Principales enfermedades asociadas a organismos patógenos en piscinas termales.....	25
3.3 Cloración.....	26
3.3.1 Cloro gaseoso o líquido a presión (Cl ₂).....	27
3.3.2 Hipoclorito de sodio (NaOCl)	28
3.3.3 Hipoclorito de calcio Ca(OCl) ₂	28
3.3.4 Curva de demanda de cloro.....	29
3.3.5 Casos de desinfección con cloro.....	29
3.3.6 Eliminación de <i>Escherichia coli</i> mediante la sinergia de bioenzimas y el hipoclorito de sodio.....	32
3.4 Técnicas de tratamientos del agua en piscinas termales.....	34

3.5 Normas internacionales y nacionales para uso de piscinas	36
3.5.1 Normativa española	36
3.5.2 Normativa chilena	39
3.5.3 Normativa cubana	40
3.5.4 Normativa de la Organización Mundial de la Salud (OMS).....	41
3.5.5 Normativa colombiana	42
3.5.6 Normativa peruana	43
3.5.7 Normativa de Costa Rica	45
CAPITULO 4. METODOLOGIA	47
4.1 Ubicación de la piscina termal	47
4.2 Toma de muestras	48
4.3 Análisis fisicoquímico y microbiológico	50
4.4 Análisis de demanda de cloro.....	51
CAPITULO 5. RESULTADOS.....	52
5.1 Caracterización fisicoquímica de la piscina termal.....	52
5.2 Caracterización microbiológica del agua cruda en la piscina termal	52
5.3 Resultados de la demanda de cloro	53
CAPITULO 6. ANALISIS DE RESULTADOS	55
6.1 Análisis fisicoquímico de la piscina termal	55
6.1.1 Temperatura	55

6.1.2 Potencial de hidrógeno (pH)	55
6.1.3 Turbiedad y color	56
6.1.4 Conductividad eléctrica	58
6.1.5 Oxígeno disuelto	58
6.1.6 Hierro total y manganeso	59
6.1.7 Nitrógeno amoniacal	60
6.1.8 Análisis normativo con los parámetros fisicoquímicos del agua cruda	61
6.1.9 Análisis normativo con los parámetros microbiológicos del agua cruda	62
6.2 Análisis del ensayo de demanda de cloro en el agua de la piscina termal.....	62
6.2.1 Muestra integrada No. 1 (tomada el 12 de mayo de 2019).....	62
6.2.2 Muestra integrada No. 2 (tomada el 19 de mayo de 2019).....	65
6.2.3 Muestra integrada No. 3 (tomada el 03 de junio de 2019).....	68
6.2.4 Muestra integrada No. 4 (tomada el 08 de junio de 2019).....	71
6.2.5 Muestra integrada No. 5 (tomada el 23 de junio de 2019).....	74
6.2.6 Análisis normativo con los parámetros microbiológicos del agua clorada	77
6.3 Análisis entre la dosis de cloro y los resultados del tratamiento	79
CAPITULO 7. CONCLUSIONES.....	83
REFERENCIAS	85

Índice de Tablas

Tabla 1. Número de fuentes termales ubicadas en Colombia	14
Tabla 2. Clasificación geológica - genética	18
Tabla 3. Clasificación por su temperatura	19
Tabla 4. Clasificación de las minerales según Kurlov.....	19
Tabla 5. Clasificación por su salinidad	20
Tabla 6. Acción terapéutica del agua termomineral según composición química	22
Tabla 7. Efecto de 1.0 ppm de HOCl en bacterias planctónicas.....	30
Tabla 8. Condiciones de las biopelículas bajo la presencia de <i>E. coli</i>	30
Tabla 9. Ensayos de biopelículas con <i>E. coli</i> detectado en el flujo de salida de dos cámaras de flujo.	31
Tabla 10. Condiciones bacteriológicas en 4 parques acuáticos posterior a la desinfección con cloro a concentración promedio de 0.63mg/L de cloro libre.....	35
Tabla 11. Análisis comparativo de costo por m3.	36
Tabla 12. Límites microbiológicos máximos.	37
Tabla 13. Parámetros indicadores de calidad del agua para spa y piscinas terapéuticas	38
Tabla 14. Parámetros de calidad	39
Tabla 15. Aguas empleadas para el baño.....	41
Tabla 16. Frecuencia toma de muestras recomendadas y guía operacional para pruebas microbiológicas durante operación normal.....	42
Tabla 17. Parámetros admisibles Decreto 1076 de 2015 de Colombia	43

Tabla 18. Parámetros fisicoquímicos, inorgánicos, microbiológicos	43
Tabla 19. Parámetros físicos, químicos y microbiológicos	45
Tabla 20. Parámetros fisicoquímicos medidos en campo.	49
Tabla 21. Visita de la toma de muestras	49
Tabla 22. Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en laboratorio.....	50
Tabla 23. Determinación de la concentración de cloro residual	51
Tabla 24. Parámetros fisicoquímicos de la piscina termal.....	52
Tabla 25. Caracterización microbiológica del agua cruda de la piscina termal.....	53
Tabla 26. Resultados demanda de cloro para las muestras tomadas	54
Tabla 27. Comparación fisicoquímica del agua cruda con la normatividad	61
Tabla 28. Comparación microbiológica del agua cruda con la normatividad	62
Tabla 29. Parámetros microbiológicos y fisicoquímico de la muestra No. 1	63
Tabla 30. Parámetros microbiológicos y fisicoquímico de la muestra No. 2	66
Tabla 31. Parámetros microbiológicos y fisicoquímico de la muestra No. 3	69
Tabla 32. Parámetros microbiológicos y fisicoquímico de la muestra No. 4	72
Tabla 33. Parámetros microbiológicos y fisicoquímico de la muestra No. 5	75
Tabla 34. Comparación microbiológica del agua clorada con la normatividad	78

Índice de Figuras

Figura 1. Curva de demanda de cloro. (Romero Rojas, Calidad del Agua, 2013)	29
Figura 2. Imágenes (a, d) son las biopelículas del <i>E. coli</i> . Imágenes (b, e) son los <i>E. coli</i> sin tratamiento. Imágenes (c, f) es el medio tratado con NaOCl con 20ppm durante 10min. (Lim, Koo, kim, & kim, 2019).....	32
Figura 3. Número <i>E. coli</i> crecidas en una superficie de acero en presencia de proteinasa K, o celulosa a 25°C por 24h, e inactivación sinérgica con post tratamiento de 20ppm de NaOCl durante 10min. (Lim, Koo, kim, & kim, 2019)	33
Figura 4. Ubicación Termales Aguas Calientes. Google maps.....	47
Figura 5. Piscina termal temperatura promedio 35°C. Autor.	48
Figura 6. Lectura de parámetros in situ.....	49
Figura 7. Elementos de laboratorio	50
Figura 8. Equipos ensayo demanda de cloro	51
Figura 9. Conteo microbiológico en agua cruda. Coliformes totales (Rojas), <i>E. coli</i> (Azules). Muestra No. 5	53
Figura 10. Temperatura de la piscina termal. Clasificación según temperatura.....	55
Figura 11. Valores de pH de la piscina termal.....	56
Figura 12. Valores de turbiedad en la piscina termal.....	57
Figura 13. Valores de color en la piscina termal.....	57
Figura 14. Conductividad eléctrica	58
Figura 15. Concentraciones de oxígeno disuelto en la piscina termal.	59
Figura 16. Hierro total vs Manganeso en la piscina termal	60

Figura 17. Nitrógeno amoniacal	60
Figura 18. Curva demanda de cloro Muestra No. 1 – Ensayo No. 1.....	64
Figura 19. Curva demanda de cloro Muestra No. 1 – Ensayo No. 2.....	65
Figura 20. Curva demanda de cloro Muestra No. 2 – Ensayo No. 3.....	67
Figura 21. Curva demanda de cloro Muestra No. 2 – Ensayo No. 4.....	68
Figura 22. Curva demanda de cloro Muestra No. 3 – Ensayo No. 5.....	70
Figura 23. Curva demanda de cloro Muestra No. 3 – Ensayo No. 6.....	71
Figura 24. Curva demanda de cloro Muestra No. 4 – Ensayo No. 7.....	73
Figura 25. Curva demanda de cloro Muestra No. 4 – Ensayo No. 8.....	74
Figura 26. Curva demanda de cloro Muestra No. 5 – Ensayo No. 9.....	76
Figura 27. Curva demanda de cloro Muestra No. 5 – Ensayo No. 10.....	77
Figura 28. Agua cruda vs agua clorada en muestra No. 1	79
Figura 29. Agua cruda vs agua clorada en muestra No. 2	80
Figura 30. Agua cruda vs agua clorada en muestra No. 3	80
Figura 31. Agua cruda vs agua clorada en muestra No. 4	81
Figura 32. Agua cruda vs agua clorada en muestra No. 5	82
Figura 33. Agua cruda con <i>E. coli</i> vs agua clorada en muestra No. 5	82

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad Colombia posee 320 fuentes termales registradas en el Inventario Nacional de Manifestaciones Hidrotermales, de las cuales el 9.4% tienen potencial para convertirse en centros termales internacionales de primera calidad, especialmente en los departamentos de Cundinamarca, Boyacá, Santander, Norte de Santander, Magdalena, Chocó, Huila y Cauca (Programa de Transformación Productiva, 2014).

Tabla 1. Número de fuentes termales ubicadas en Colombia

Departamento	No. de Fuentes
Magdalena	1
Cesar	1
Atlántico	1
Norte de Santander	6
Antioquía	10
Santander	3
Boyacá	39
Arauca	1
Cundinamarca	49
Casanare	3
Caldas	31
Risaralda	19
Chocó	4
Tolima	56
Huila	16
Cauca	34
Nariño	30
Putumayo	4
Guaviare	2
Meta	7
Bogotá	3
Total	320

Fuente. (Inventario Nacional de Manifestaciones Hidrotermales, 2019)

Las aguas minerales de origen termal son ampliamente clasificadas según su mineralización, salinidad, y demás propiedades químicas, haciendo de ellas una alternativa curativa, mediante terapias para el tratamiento de traumatismos físicos en personas. Según

la Guía de Buenas Prácticas Termales (2007), los estudios sobre el servicio médico prestado por el termalismo continúa representando una buena alternativa en el tratamiento de numerosas enfermedades crónicas.

Dado que en varias investigaciones realizadas en Colombia en temas de termalismo, se evidencia la presencia de microorganismos de origen bacteriano asociados a diferentes enfermedades, debido principalmente a la falta de conocimiento en el manejo de éstas aguas y a la escasez normativa referente a calidad de agua de piscinas de éste tipo. Este proyecto de grado tiene como fin evaluar la desinfección del agua termal mediante la cloración, como posible solución al control sanitario en piscinas termales; previniendo riesgos a la salud humana y beneficiando al sector económico del turismo.

En ésta tesis se aportarán datos relevantes para el tratamiento del agua termal mediante la cloración, analizando parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de la piscina bajo la acción desinfectante del cloro, a diferentes concentraciones y para un mismo tiempo de contacto.

CAPÍTULO 2. OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar la eliminación de microorganismos (*Escherichia coli* y coliformes totales) en una piscina termal mediante la desinfección con cloro.

Objetivos Específicos

- Identificar las técnicas de tratamiento de agua para piscinas termales utilizadas a nivel internacional y nacional, así como los posibles efectos de la temperatura y contenido de minerales en la cloración mediante una revisión bibliográfica.
- Caracterizar la calidad fisicoquímica y microbiológica de la piscina termal.
- Determinar la demanda de cloro y concentración de cloro residual libre para diferentes dosis de cloro.
- Determinar los porcentajes de eficiencia de remoción de *Escherichia coli* y coliformes totales.
- Determinar la dosis óptima para la desinfección de la piscina termal.

CAPITULO 3. MARCO TEORICO

3.1 Aguas termales

Toda agua termal subterránea está relacionada con la temperatura desde su punto de emergencia. Ésta agua subterránea generalmente de temperatura mayor a la temperatura media anual del ambiente, tiene como diferencia 5°C o más (Burbano O., Pasquel S., & Becerra P., 2013).

Las aguas de origen termal provenientes de aguas infiltradas variarán de temperatura dependiendo de su ubicación. Éstas aguas van aumentando su temperatura por el gradiente geotérmico, que se le define como la profundidad de penetración en el suelo, expresada en metros, necesaria para que la temperatura aumente 1°C. Su valor es por término medio de 30 a 35 metros, variando según las localidades y profundidad. En las regiones volcánicas disminuye de 10 a 15 metros, a esto hay que añadir que en zonas de recién vulcanismo el agua puede verse afectada por el calor que el magma transfiere a las rocas adyacentes y por influencia de las aguas juveniles hipertermales. Cuando estas aguas surgen a la superficie a temperaturas superiores a la del ambiente, se las denomina “fuentes termales” (Burbano O., Pasquel S., & Becerra P., 2013).

Alfaro V., Aguirre C., Bernal C., & Gokcen (2003) mencionan 6 características del origen del calor en las fuentes termales:

1. Por el calor generado por un volcán activo o una cámara magmática en enfriamiento.
2. Por un cuerpo intrusivo en enfriamiento lento (rocas de gran profundidad y en grandes masas del magma).
3. Por el calor generado por el movimiento plástico de fallas regionales.
4. Por depósitos radioactivos.
5. Por adelgazamiento de la corteza terrestre: Cuando el magma brota por debajo de un continente, la corteza se eleva, se estira y adelgaza (Servicio Geológico Mexicano, 2017).
6. Por el gradiente geotérmico normal, el cual aumenta la temperatura del agua a medida que se profundiza en la corteza terrestre.

Además, su composición fisicoquímica será directamente relacionada con la distribución geológica del subsuelo. El agua al entrar en contacto con las rocas adquiere la composición química donde intervienen diferentes factores de tipo fisicoquímico, geológico, hidrogeológico, geomorfológico, pedológico, climático, antrópico y otros que le dan características de aguas minerales (Burbano O., Pasquel S., & Becerra P., 2013).

3.1.1 Clasificación de aguas termominerales

De acuerdo a sus propiedades, se distinguen de manera clara y precisa las clasificaciones de las aguas termales.

Clasificación geológica - genética

Tabla 2. Clasificación geológica - genética

Clasificación	Descripción
Agua Meteórica	Agua subterránea que en tiempos recientes ha formado parte del ciclo hidrológico.
Agua Congénita	Ha permanecido fuera del contacto con la atmósfera durante largos períodos de tiempo (millones de años).
Agua Metamórfica	La que está o ha estado en contacto con rocas durante su metamorfismo.
Agua Magmática	La que se encuentra y se ha originado en el interior de los magmas a poca profundidad.
Agua Plutónica	La que se encuentra y se ha originado en el interior de los magmas a grandes profundidades, probablemente a varios kilómetros.
Agua Juvenil	La que nunca ha formado ni estado en contacto con la atmósfera.

Fuente. (Burbano O., Pasquel S., & Becerra P., 2013)

Clasificación por su temperatura

La temperatura es la característica principal por la cual las aguas termales son conocidas y se clasifican según la Tabla 3.

Tabla 3. Clasificación por su temperatura

Clasificación	Temperatura
Frías	$\leq 20^{\circ}\text{C}$
Hipotermas	$20^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$
Mesotermas	$30^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C}$
Hipertermas	$\geq 41^{\circ}\text{C}$

Fuente. (Burbano O., Pasquel S., & Becerra P., 2013)

Clasificación de los minerales según Kurlov

Uno de los métodos más utilizados en la clasificación de aguas minerales, es el de Kurlov, el cual toma en consideración los aniones y cationes que exceden el 20% de mEq/L de la mineralización global (Burbano O., Pasquel S., & Becerra P., 2013).

Tabla 4. Clasificación de las minerales según Kurlov

Con relación a los aniones	Con relación a los cationes
Bicarbonatadas	Cálcicas
Sulfatadas	Magnésicas
Cloruradas	Sódicas
Bicarbonatadas sulfatadas	Cálcicas magnésicas
Bicarbonatadas cloruradas	Cálcicas sódicas
Sulfatadas cloruradas	Magnésicas sódicas
Sulfatadas cloruradas bicarbonatadas	Cálcicas magnésicas

Fuente. (Burbano O., Pasquel S., & Becerra P., 2013)

Clasificación por su salinidad

Burbano et al., (2013) plantean que la conductividad eléctrica es un elemento que se usa para medir de manera aproximada el contenido de sólidos disueltos en el agua, mediante la Ecuación 1:

$$\text{Ecuación 1. } SDT \text{ (ppm)} = CE[\mu S/cm] * 0.64$$

Según Burbano et al., (2013) el contenido de sales disueltas en el agua puede variar desde unos pocos miligramos hasta 15000 miligramos de sólidos disueltos totales (SDT); habitualmente el contenido es superior a 1000 mg/L.

En la Tabla 5, se realiza la clasificación de las fuentes termales, considerando su contenido de sólidos disueltos totales:

Tabla 5. Clasificación por su salinidad

SDT (mg/L)	Clasificación
0 a 160	Baja salinidad
160 a 480	Salinidad media
480 a 1440	Salinidad alta
Mayor a 1440	Salinidad muy alta

Fuente. (Burbano O., Pasquel S., & Becerra P., 2013)

3.1.2 Uso convencional de las piscinas termales

En el documento Guía de buenas prácticas termales (2007) elaborado por el Sindicato Nacional de Médicos de las Estaciones Termales, Marinas y Climáticas de Francia, se encuentran los diferentes tratamientos en patologías humanas por medio del uso terapéutico de aguas termominerales.

Las principales aguas termominerales utilizadas son las aguas sulfatadas que tienen la particularidad de poseer un elemento, el azufre, existiendo bajo varios estados de oxidación. El azufre juega un papel importante a nivel de mucosas respiratorias, sobre todo en los casos de infección crónica.

Las aguas bicarbonatadas contienen bicarbonato sódico y CO₂ libre en cantidad variable. Las aguas bicarbonatadas sódicas de La Bourboule y Mont Dore contienen también fluoruro, sílice y arsénico y son utilizadas fundamentalmente para el tratamiento de procesos alérgicos. La crenoterapia, el cual es un método curativo de algunas enfermedades por medio de aguas minerales, tiene a menudo una estrecha relación en reducir fenómenos alérgicos e infecciosos. Las aguas cloruradas sódicas, utilizadas esencialmente en las estaciones termales del este de Francia, son hipertermales, isotónicas, ricas en oligoelementos y de hecho favorables en patología otorrinolaringológica (ORL).

Las principales acciones terapéuticas del agua mineral se destacan según su temperatura, el grado de mineralización y la composición química. Según Ortega Maján, (2016) el agua a temperatura alta produce dilatación arteriolar y capilar, vasodilatación distal, aumento de la permeabilidad capilar, analgesia, aumento de la actividad enzimática y metabólica, aumento del tónus tisular, efecto sedante, relajación de la musculatura lisa y estriada, aumento de la diuresis y sudoración, taquicardia y taquipnea. Por otro lado, en aguas con grados de mineralización, en concentraciones medias favorecen la filtración renal haciendo que se excrete más agua por la orina, más volumen y con más catabolitos produciendo arrastre y lavado de las vías urinarias. Las aguas hipermineralizadas son excelentes en la rehabilitación, teniendo en cuenta dos leyes del agua, una por el principio de Arquímedes que permite al bañista perder parte de su peso estando sumergido en el agua, mejorando así su movilidad; y dos por la ley de la presión hidrostática del agua hacia el cuerpo sumergido, produciendo un estímulo mecánico a nivel del sistema respiratorio, siendo de utilidad para tratar bronquitis asmática (Ortega Maján, 2016).

En la Tabla 6 se indican los beneficios terapéuticos según la composición química.

Tabla 6. Acción terapéutica del agua termomineral según composición química

Tipo	Tipo de Agua	Acciones	Indicaciones
CLORURADAS	-Suelen estar acompañadas del catión sodio en proporción similar.	-Antiflogísticas -Tónicas, estimulantes de la cicatrización -Ligeramente antisépticas -Colagoga e hidrocolerética -Estimulante de la función secretora y motora -Estimulante de la secreción gástrica del ácido clorhídrico	-Recuperación de intervenciones quirúrgicas sobre aparato locomotor -Reumatismos -Procesos crónicos de vías respiratorias y aparato genital femenino
SULFATADAS	Sulfatadas sódicas, magnésicas y sulfato. Bicarbonatadas sódicas y magnésicas	-Efecto purgante -Colagoga, coleocistoquinética y colerética	-Sódicas, magnéticas y mixtas en tratamientos de estreñimiento y coleocistopatías -Cálcicas en procesos dispépticos, alteraciones hepáticas y de la vesícula biliar, obesidad y otros trastornos que necesite facilitar la diuresis
	Sulfatadas cálcicas, sulfatadas. Bicarbonatadas cálcicas	-Acción digestiva (antiácida y estimulación peristaltismo) -Acción hepatobiliar -Acción reguladora del tono vegetativo	
BICARBONATADAS	Bicarbonatadas sódicas	-Acción gástrica (antiácida) -Acción intestinal digestiva -Acción hepatoprotectora -Acción metabólica -Eliminación del ácido úrico	-Enfermedades del aparato digestivo -Alteraciones hepáticas -Trastornos metabólicos -Afecciones de las vías urinarias
	Bicarbonatadas cálcicas y Bicarbonatadas magnésicas	-Aparato digestivo (Antiácida) -Acción diurética -Efectos sobre fenómenos neuromusculares e inflamatorios	
	Bicarbonatadas mixtas	-Acción similar a las anteriores	
	Bicarbonatadas sulfatadas	-Igual a las anteriores según predominio de componentes	
	Bicarbonatadas cloruradas	-Estímulo de la secreción intestinal y peristaltismo intestinal y de vías biliares -Antiflogísticas y estimulantes de la función celular, cicatrización y trofismo -Ligeramente antisépticas	

Fuente. (Ortega Holguín & Tinoco Mejía, 2017)

Tipo	Tipo de Agua	Acciones	Indicaciones
SULFURADAS O SULFIDRICAS	Su olor es característico a huevo podrido	-Antitóxica general en la célula hepática -Antianafiláctica y antialérgica -Metabólica, trófica -Aparato digestivo y respiratorio -Sobre la piel	-Afecciones de las vías respiratorias: Rinitis, laringitis, bronquitis y asma -Dermatosis: eczemas crónicos y seborreicos, psoriasis, pruritos -Procesos reumáticos -Alteraciones hepáticas
OTRAS AGUAS	Carbogaseosas o Carbónicas	-Estimulación de las secreciones gástricas -Alteraciones circulatorias	-Reumatismos -Cardíacos crónicos y compensados -Enfermedades vasculares periféricas
	Radioactivas	-Acción diurética, antiespasmódica, sedante, efecto desensibilizante	-Distonías neurovegetativas, procesos reumáticos, disfunciones nerviosas y manifestación alérgica y dermatopatías
	Débil mineralización	-Efecto diurético por vía oral	-----
	Ferruginosas y Ferro Arsenicales	-Hematopoyética, estimulante a nivel óseo, antiflogística a nivel de la piel	-Anemias -Arsenicales en afecciones cutáneas

Fuente. (Ortega Holguín & Tinoco Mejía, 2017)

3.2 Organismos patógenos en piscinas termales

A nivel internacional se han realizados estudios para determinar la calidad microbiológica en piscinas termales.

En Perú, en un estudio de contaminación bacteriológica realizado en el 2016 a seis (6) piscinas termales, se confirmó la presencia de coliformes fecales y de *Escherichia coli* en un orden de 1.8 NMP/100mL hasta de 1.1×10^2 NMP/100mL para *Escherichia coli*, y de 1.8 NMP/100mL hasta de 9.2×10^2 NMP/100mL para coliformes fecales (Ramirez Flores, 2016).

En otro estudio realizado en Perú, se encontró también la presencia de coliformes fecales en aguas termales de tres (3) piscinas, dando como resultado para coliformes fecales un valor de 220 NMP/100mL (Condori Mendoza & Guillen Merino, 2018).

En Ecuador, se detectó en una piscina termal la presencia de coliformes fecales en un orden de 560 UFC/mL y máximo en 3300 UFC/mL. Para los resultados de *Escherichia coli* se encontraron valores de 3.0 UFC/mL hasta de 940 UFC/mL (Guallpa Uvidia, 2016).

A nivel nacional, también se han realizado caracterizaciones fisicoquímicas y microbiológicas en fuentes y piscinas termales.

En Colombia, en el estudio elaborado por Avendaño Sánchez (2016) se realizaron pruebas de laboratorio en aguas de una piscina termal ubicada en el municipio de Chocontá Cundinamarca, con el fin de identificar coliformes totales, *Escherichia coli*, *Pseudomonas*, y bacterias heterotróficas. Los valores máximos obtenidos fueron: 6000 UFC/100mL de coliformes totales, 870 UFC/100mL para *E. coli*, 16×10^6 UFC/100mL de *Pseudomonas* y 39.4×10^5 UFC/100mL de bacterias heterotróficas.

En otro estudio realizado en Colombia para tres (3) fuentes y tres (3) piscinas termales ubicadas en los municipios de Tabio, Guasca y Choachí, Chivatá López (2017) estableció que la concentración de la bacteria *Pseudomona Aeruginosa* a pH menores de 7.0 (condiciones ácidas) es inferior a 1.0 UFC/100mL, mientras que en condiciones de pH superiores a 7.0 (condiciones alcalinas) la bacteria tenía mayores concentraciones. Frente a esto, determinó que la concentración de *Pseudomonas aeruginosa* en el agua a pH mayor de 7.0, fue de 99 NMP/100mL y de 67 NMP/100mL para la fuente y piscina termal, respectivamente. Sin embargo, en condiciones donde el pH era inferior a 7.0 la concentración de las bacterias fue de 1.0 NMP/100mL en los dos casos.

En el municipio de Tabio - Cundinamarca, Hernández Romero (2018) determinó la presencia de organismos patógenos en las aguas de una piscina termal. Los valores máximos encontrados fueron 49.1×10^4 UFC/100mL para coliformes totales, 7×10^4 UFC/100mL de *Pseudomonas* y 20×10^5 UFC/100mL de bacterias heterotróficas.

Otros estudios se han enfocado en la presencia de biopelículas presentes en aguas termales, las cuales son portadoras de bacterias como *Pseudomonas aeruginosa*, *Vibrio cholerae*, *Escherichia coli* y *Salmonella enteritidis*. Estas bacterias en presencia de calcio y magnesio en el agua tienen a una mayor adherencia dentro de las biopelículas, haciendo más difícil la desinfección (González González, García Melían, & Mariné Alonso, 2014).

Según plantea Williams & Braun-Howland (2003), la habilidad de coliformes totales y *Escherichia coli* para sobrevivir en biofilms o biopelículas es un factor importante en la

industria del agua, ya que permite a la bacteria una protección significativa a agentes desinfectantes, incluyendo el ácido hipocloroso (HOCl) y las monocloraminas. La persistencia de éstos organismos y su liberación de las biopelículas pueden enmascarar verdaderos acontecimientos importantes en el tratamiento del agua.

3.2.1 Principales enfermedades asociadas a organismos patógenos en piscinas termales

Estudios previos han demostrado que las enfermedades en seres humanos son ocasionadas por la presencia de organismos patógenos. Entre ellos está la presencia de *Escherichia coli* en piscinas termales que provienen generalmente por la contaminación fecal humana, y que puede generar infecciones en niños y adultos como la gastroenteritis, llegando a ser letal si la deshidratación no es compensada (P. Nataro & B. Kaper, 1998).

Según Ríos Tobón et al. (2017), “el género *Escherichia* incluye cepas patógenas y no patógenas y corresponde a 80% de la microflora intestinal normal. En la actualidad están descritas las cepas patógenas para el humano causantes de enfermedades graves, como infecciones de vías urinarias, bacteriemia y meningitis”. De hecho, Ríos Tobón et al. (2017) menciona que “seis cepas enteropatógenas puede causar diarrea aguda: *E. coli* enterohemorrágica (STEC/VTEC/EHEC), *E. coli* enterotoxígena (ETEC), *E. coli* enteropatógena (EPEC), *E. coli* enteroinvasiva (EIEC), *E. coli* enteroagregativa (EAEC) y *E. coli* de adherencia difusa” Entre las patologías muy graves en seres humanos están la colitis hemorrágica (HC) y el síndrome urémico-hemolítico (HUS) producidas por el patotipo (STEC) (Blanco, 2012).

Otro agente patógeno presente en piscinas termales es la *Legionella*, causante de enfermedades como la legionelosis, que se manifiesta en dos tipos: fiebre de Pontiac, que es la forma más leve de infección parecida a la influenza o gripe, y la enfermedad del legionario, que es la forma más severa de infección y cursa con neumonía atípica y fiebre muy alta (Avendaño Sánchez, 2016).

Por otra parte, en algunos estudios se ha identificado la presencia de *Pseudomonas aeruginosa* en aguas termales, según Chivatá López (2017) son causantes de foliculitis y la otitis externa. El contacto con este patógeno aumenta el riesgo de contraer infecciones

en la piel, en heridas y quemaduras, ocasionando erupciones y ronchas, al igual que inflamación del conducto auditivo externo produciendo dolor, hinchazón y en ocasiones fiebre.

Entre las principales manifestaciones por contagio con *Pseudomonas aeruginosa* se encuentran las infecciones nosocomiales. Son infecciones presentes en casi todas las partes del cuerpo y colonizan a casi cualquier sitio que este expuesto. Entre los diferentes cuadros clínicos se destacan, la infección del tracto respiratorio en forma de neumonía, infecciones crónicas ya sea en pacientes con fibrosis quística FQ o con enfermedad pulmonar obstructiva crónica EPOC (Milagro Montero, 2012).

De acuerdo con Pécastaings et al. (2009) las bacterias como *Pseudomonas aeruginosa* y *Legionella* podían sobrevivir dentro de las biopelículas aún después del tratamiento con desinfección química en piscinas minerales. Entre las enfermedades relacionadas con éstas, se conoce que las biopelículas están implicadas en más del 80% de las infecciones crónicas causadas por bacterias, incluyendo otitis media, endocarditis, gastritis, infecciones del tracto urinario e infecciones pulmonares en pacientes con fibrosis quística FQ (Faleiro Naves, 2010).

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, es posible determinar organismos patógenos en piscinas termales y que éstos están relacionados con enfermedades infecciosas en seres humanos. Por lo tanto, es necesario estudiar un método de desinfección para aguas termales que ayude a la eliminación y control de estos microorganismos.

3.3 Cloración

El cloro ha sido un desinfectante principal en el tratamiento de aguas a nivel mundial, gracias a su facilidad de manejo, almacenamiento y a su costo de operación. Según Metcalf and Eddy (2014), los desinfectantes con cloro más usados en plantas de agua son el cloro gaseoso o líquido a presión (Cl_2), el hipoclorito de sodio (NaOCl) y el dióxido de cloro (ClO_2). Para pequeñas plantas es común utilizar hipoclorito de calcio (Ca(OCl)_2).

El cloro es un elemento que reacciona con el agua y forma el ácido hipocloroso HOCl, reacción que dependerá del pH del agua, y en consecuencia del ion hidrógeno. A $\text{pH} \leq 6$ el residual es predominantemente ácido hipocloroso HOCl; a pH igual a 7.7 los residuales de ácido hipocloroso y del ion hipoclorito OCl^- son aproximadamente similares y a $\text{pH} \geq 9$ casi todo el residual es OCl^- . Entre las propiedades el ácido hipocloroso HOCl, se resalta que es más efectivo que el ion hipoclorito OCl^- , generalmente el HOCl es 80 a 100 veces más efectivo que el OCl^- para exterminar *Escherichia coli* (Romero Rojas, Calidad del Agua, 2013).

Un factor determinante para la efectividad del cloro es la temperatura. Mientras a altas temperaturas la desinfección es más rápida, eficaz y con menores tiempos de contacto; a menores temperaturas se necesitará un mayor tiempo de contacto del cloro con las células del microorganismo para obtener la misma eficiencia que en condiciones de temperaturas altas (American Water Works Association, 2005).

Adicionalmente, la relación del pH y la temperatura son importantes en la concentración de cloro residual libre en el agua. Según el pH del agua, las concentraciones de cloro libre podrán estar sujetos a cambios. Normalmente, concentraciones de 0.5 a 1.0 mg/L de cloro libre son necesarios para mantener un adecuado control de colonias microbianas (American Water Works Association, 2005).

3.3.1 Cloro gaseoso o líquido a presión (Cl_2)

Típicamente presentados como gas o líquido a presión; según Metcalf and Eddy (2014) aunque el uso de cloro para la desinfección ha sido de gran importancia desde una perspectiva de la salud pública para sistemas de agua potable y agua residual; serios problemas se han presentado por su uso continuo; un ejemplo de ello son los siguientes:

1. El cloro es una sustancia altamente tóxica que es transportada por camiones y trenes, ambos propensos a accidentes.
2. El cloro es una sustancia altamente tóxica que posee potenciales riesgos a los operadores y al público en general, si es liberado por accidente.

3. Se requieren estrictos manejos de almacenamiento, entre ellos los exigidos por las normas de diseño contra incendio.
4. La reacción del cloro con constituyentes orgánicos en aguas residuales produce olores fétidos.
5. La reacción del cloro con constituyentes orgánicos en aguas residuales produce subproductos, muchos de los cuales son cancerígenos y/o mutágenos.
6. El cloro residual en los efluentes del tratamiento son tóxicos para la vida acuática.
7. Los compuestos del cloro orgánico tienen efectos de larga duración en el medioambiente que son desconocidos.

3.3.2 Hipoclorito de sodio (NaOCl)

El hipoclorito de sodio disponible como solución líquida, usualmente tiene 12.5% a 17% de cloro disponible al momento de su producción. La solución de hipoclorito de sodio se descompone fácilmente a concentraciones altas y es afectado por la exposición a la luz o al calor. Un 16.7% de solución almacenada a 26.7°C puede perder 10% de su potencia en 10 días, 20% en 25 días y 30% en 43 días (Metcalf and Eddy, 2014).

Los costos de compra son mayores en un 150% a 200% del cloro líquido a presión. La manejabilidad del hipoclorito de sodio requiere consideraciones especiales de diseño por ser corrosivo. Varios sistemas están disponibles para la generación de hipoclorito de sodio desde el cloruro de sodio (NaCl) o de agua de mar. Estos sistemas son eléctricos de potencia intensa que arrojan soluciones diluidas a máximo 0.8% de cloro (Metcalf and Eddy, 2014).

3.3.3 Hipoclorito de calcio Ca(OCl)₂

El hipoclorito de calcio está disponible comercialmente de forma sólida o líquida. En la forma sólida es fácilmente soluble en agua. Por su potencial de oxidación, el hipoclorito de calcio debe ser almacenado en frío en contenedores resistentes a la corrosión. El hipoclorito de calcio es más costoso que el cloro líquido, pierde su potencial al ser almacenado, debe ser disuelto antes de ser usado, y es difícil de maniobrar en instalaciones muy grandes. El

hipoclorito de calcio puede ocasionar atascamiento en bombas, tuberías y válvulas por su tendencia a cristalizar fácilmente (Metcalf and Eddy, 2014).

3.3.4 Curva de demanda de cloro

La demanda de cloro se construye a partir de la medición del cloro residual libre y combinado del agua tratada con de diferentes dosis de cloro, con el fin de determinar la mejor dosis aplicada viendo en la curva su punto de quiebre (Ver Figura 1).

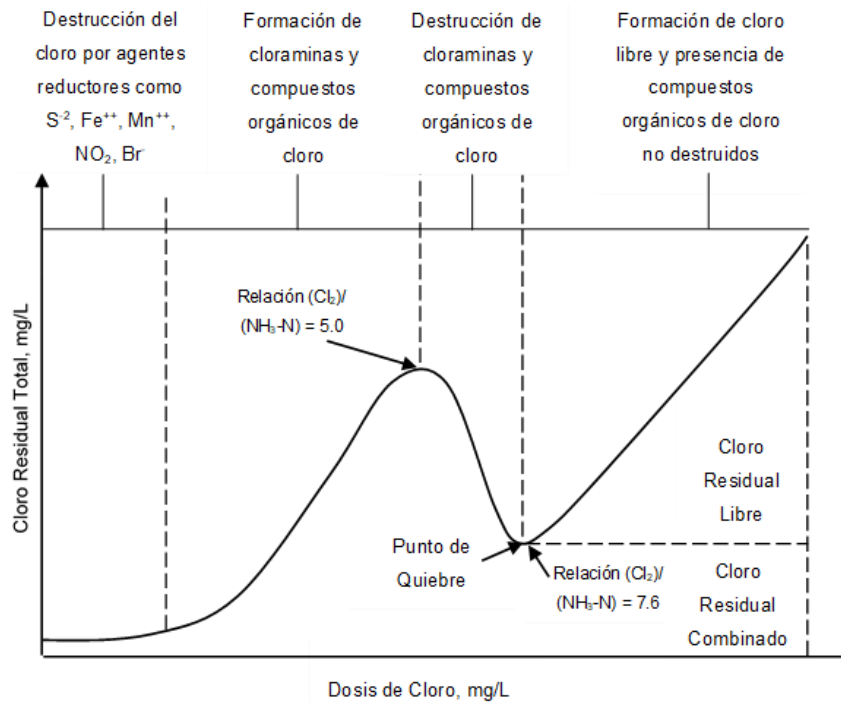


Figura 1. Curva de demanda de cloro. (Romero Rojas, Calidad del Agua, 2013)

3.3.5 Casos de desinfección con cloro

En un estudio realizado por Williams & Braun-Howland (2003) se analizó el crecimiento de la *Escherichia coli* y su supervivencia dentro de las biopelículas en un sistema modelo de distribución de agua expuestos al efecto del ácido hipocloroso HOCl a diferentes tiempos de contacto.

Los resultados sugieren que luego de aplicar cloro al sistema modelo, se lograba reducir la cantidad de *E. coli* en un 99.3% para un tiempo de contacto de 10 minutos (Ver Tabla 7).

Tabla 7. Efecto de 1.0 ppm de HOCl en bacterias planctónicas (Williams & Braun-Howland, 2003)

TABLE 1. Effects of 1 ppm of ClOH on the hybridization efficiency of Universal 342 probe to 16S rRNA in planktonic bacteria^a

Time (min)	% of cells positive after hybridization ^c			
	<i>E. coli</i> control	<i>E. coli</i> , 1 ppm of ClOH	TW ^b control	TW, 1 ppm of ClOH
0	108.5 ± 2.12	104.5 ± 2.12	20.7 ± 15.3	31.7 ± 7.14
10	103.5 ± 0.707	0.63 ± 0.891	25.8 ± 11.5	4.25 ± 4.60
30	98.2 ± 0.848	1.69 ± 2.39	39.9 ± 22.3	4.32 ± 2.66

^a The *E. coli* isolate, obtained from Thames Water Utilities, was grown to log phase in BHI broth and washed twice prior to treatment. The distribution system bacteria were treated and analyzed directly after they were sampled.

^b TW, bacteria present in tap water filter concentrates.

^c Two experiments were averaged, and the mean ± standard deviation is shown.

Sin embargo, Williams et al. (2003) encontró que las biopelículas tenían mayor resistencia a la desinfección con cloro, y que a su vez, la *Escherichia coli* habitada dentro de ellas aparecía luego de 2 semanas posteriores al ensayo. En la Tabla 8, se muestran las condiciones iniciales de los sistemas modelos utilizados:

Tabla 8. Condiciones de las biopelículas bajo la presencia de *E. coli* (Williams & Braun-Howland, 2003)

TABLE 2. Biofilm conditions under which the presence of *E. coli* and other populations were observed^a

Biofilm designation	Disinfectant concn and exposure time	No. of <i>E. coli</i> CFU inoculated
1	None	0
2	None	0
3	None	0
4	1 CT ClOH (1 ppm for 67 min)	0
5	0.2 ppm of residual ClOH starting on day 6	0
6	0.2 ppm of residual ClOH	0
7	None	10 ⁶
8	1 CT ClOH	10 ⁶
9	1 CT ClOH	10 ⁶
10	4 ppm of NH ₂ Cl for 155 min	10 ⁶
11	2 ppm of residual NH ₂ Cl	10 ⁶
12	4 ppm of residual NH ₂ Cl	10 ⁶

^a Disinfectant type, concentration, and exposure time are summarized for 12 biofilms that were cryoembedded and sectioned for whole-cell hybridizations. *E. coli* 01571 was inoculated into biofilms 7 to 12.

En la Tabla 9, están los resultados después de la desinfección con cloro sobre las biopelículas y el número detectado de *E. coli*:

Tabla 9. Ensayos de biopelículas con *E. coli* detectado en el flujo de salida de dos cámaras de flujo.

TABLE 3. *E. coli* detected in outflow from two flow chamber biofilm experiments by using Colilert Quanti-Tray MPN^a

Biofilm designation	Outflow sample day	Time (days) after final bacterial inoculation	Biofilm conditions	No. of <i>E. coli</i> or coliform cells/100 ml of outflow
3	6	1	Control (no <i>E. coli</i> added)	<1
3	7	2	Control	<1
3	8	3	Control	3
3	9	4	Control	1
3	10	5	Control	<1
8	11	6	1 CT ClO ₂ H (on day 14)	>201 ^b
11			2 ppm NH ₂ Cl residual	<1
12			4 ppm NH ₂ Cl residual	<1
7	12	7	Control	254
8			1 CT ClO ₂ H (on day 14)	4,425
7	14	9 ^c	Control	750
8			1 CT ClO ₂ H (on day 14)	504
10			4 ppm NH ₂ Cl for 155 min (on day 14)	4,725

^a Bacteria were inoculated once a day during the first 5 days of the 2-week incubation period.

^b The *E. coli* concentrations in the sample exceeded the upper detection limit of the Quanti-Tray. Subsequent samples were diluted before incubation with the Colilert medium.

^c Samples collected after chlorine and monochloramine exposures.

Fuente. (Williams & Braun-Howland, 2003)

En conclusión, Williams et al. plantearon que aunque las eficiencias en la desinfección del cloro son efectivas en la eliminación del *E. coli*; mantener condiciones libres de éstos organismos dependerá de la existencia de biopelículas adheridas a superficies del medio existente.

3.3.6 Eliminación de *Escherichia coli* mediante la sinergia de bioenzimas y el hipoclorito de sodio

Según la literatura consultada, se encontraron estudios como los reportados por Eun Seob Lim, Ok Kyung Koo, Min-Jeong Kim & Joo-Sung kim (2019), donde se propone una mejor eficiencia para la eliminación de biopelículas y por consiguiente la eliminación de la *Escherichia coli* protegida dentro de ella, implementando tres diferentes clases de enzimas que encajan con los efectos desinfectantes del hipoclorito de sodio NaOCl. Las tres enzimas utilizadas fueron el DNase I, proteinasa K y celulasa, con el objetivo de destruir el ADN extracelular, proteínas y celulosa, de la biopelícula respectivamente.

En la Figura 2 se muestra el ensayo de desinfección con solo hipoclorito de sodio en la que demuestra el gran efecto que tiene el cloro para eliminar las células de *Escherichia coli*, pero la baja eficiencia en remoción de biopelículas.

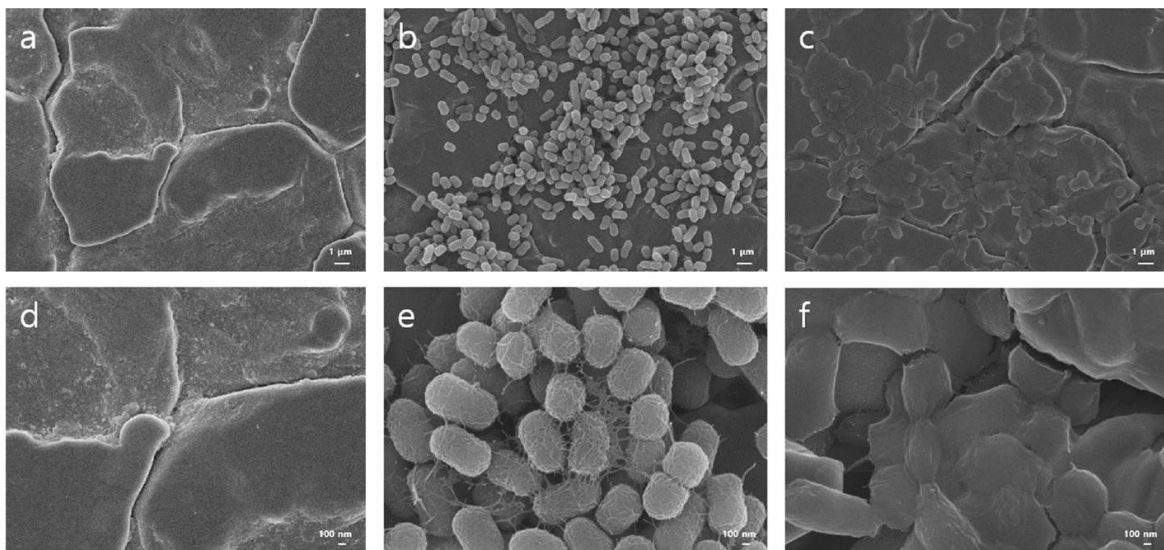


Figure 2. SEM images of *E. coli* O157:H7 biofilms on stainless steel surfaces: No inoculation (a,d); *E. coli* O157:H7 biofilm untreated (b,e) or treated with NaClO (c,f) at 20 ppm for 10 min. The biofilms were formed on a stainless steel surface in BHI at 25 °C for 24 h following 2 h preincubation for attachment. Magnifications and bar markers are $\times 10,000$ and 1 μm long (a-c) or $\times 50,000$ and 100 nm long (d-f), respectively.

Figura 2. Imágenes (a, d) son las biopelículas del *E. coli*. Imágenes (b, e) son los *E. coli* sin tratamiento. Imágenes (c, f) es el medio tratado con NaOCl con 20ppm durante 10min. (Lim, Koo, kim, & kim, 2019)

Como se puede observar en las imágenes (c, f), las biopelículas no fueron eliminadas sobre la superficie luego de 24 horas a una temperatura de 25°C.

Por lo anterior, Kim et al. (2019) con el objetivo de reducir la cantidad de biopelículas y de *Escherichia coli* en el medio, evaluaron cinco (5) diferentes desinfectantes para determinar cuál era la de mejor eficiencia en remoción:

1. Con solo hipoclorito de sodio (NaOCl)
2. Con Bio-enzima: Proteínasa K
3. Con Proteínasa K + NaOCl
4. Con Bio-enzima: Celulosa
5. Con Celulosa + NaOCl

Al finalizar las diferentes pruebas se concluyó que la mejor eficiencia en remoción de *E. coli* y de biopelículas fue la combinación No. 3, la bio-enzima proteínasa K más tratamiento con cloro (NaOCl) a una concentración de 20mg/L durante 10 minutos de contacto. En la Figura 3, Kim et al. (2019) demuestran los resultados de la eficiencia obtenida al mezclar las bio-enzimas con el hipoclorito de sodio.

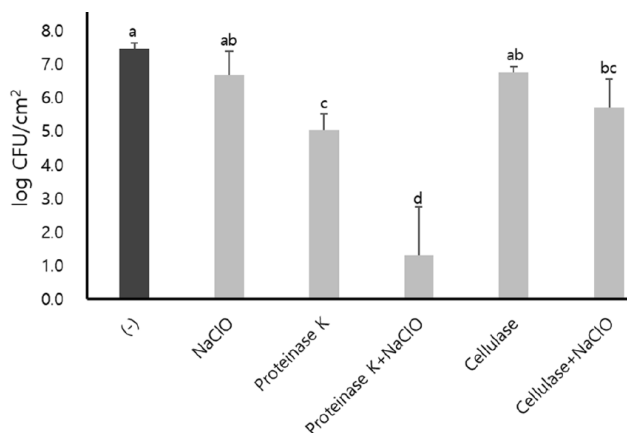


Figure 3. Numbers of *E. coli* O157:H7 viable cells on stainless steel surfaces grown in the presence of proteinase K or cellulase in BHI at 25 °C for 24 h and synergistic inactivation with NaClO post-treatment at 20 ppm for 10 min. The vertical lines represent the standard deviation of three independent experiments performed in duplicate. The different lowercase letters indicate significant differences at $p < 0.05$ using Tukey's HSD.

Figura 3. Número *E. coli* crecidas en una superficie de acero en presencia de proteínasa K, o celulosa a 25°C por 24h, e inactivación sinérgica con post tratamiento de 20ppm de NaOCl durante 10min. (Lim, Koo, kim, & kim, 2019)

3.4 Técnicas de tratamientos del agua en piscinas termales

Frente a los últimos casos en el tratamiento de microorganismos en la última década registrados en aguas recreativas, se ha venido desarrollando técnicas de desinfección en piscinas termales debido a la presencia de organismos patógenos evidenciados con los estudios reportados en la literatura; con el objetivo de erradicar o minimizar los riesgos que éstos pueden llegar a ocasionar a los usuarios.

A continuación, se presentan algunos estudios en tratamiento y control microbiológico en aguas termales:

- En Francia, Pécastaings, Dubourg, & Roques (2009) plantearon la eliminación de *Pseudomonas* y *Legionella* por 2 técnicas. Una por choque térmico a 80°C y otra con Polihexametileno Biguanida (PHMB) en concentraciones de 25 mg/L. Según Pécastaings et al. (2009), la concentración de *Pseudomonas* de $4,00 \times 10^6$ UFC/250mL fue posible reducirla a menos de 1,0 UFC/250mL con ambos métodos de desinfección. Sin embargo, observó que posterior a la desinfección, el crecimiento de la *Pseudomonas* aumentó al cabo de 4 a 7 días. Este fenómeno ocurrió gracias a que se pueden formar biopelículas donde habita y se protege la bacteria, y luego cuando las condiciones vuelven hacer favorables, invade de nuevo el medio.
- El tratamiento convencional de desinfección en aguas utiliza el cloro como el desinfectante más usado, y se ha comprobado en estudios previos que tiene una alta eficiencia en remoción de microorganismos. Dentro de los artículos relacionados con el tema, se encuentra la investigación realizada por Bešić et al. (2017) en Bosnia y Herzegovina, en la que evaluaron el efecto del cloro residual y la temperatura en presencia de *Legionella* en más de 160 muestras de aguas minerales y spa.

Los resultados obtenidos muestran que a temperaturas entre 21 a 49°C la presencia de *Legionella* aumenta hasta un 34.48%, mientras que a temperaturas menores de 20°C la presencia es de 14.28%. Así mismo, la presencia de *Legionella* disminuyó a un 9.52% en concentraciones superiores a 0.20 mg/L de cloro residual libre, mientras que para

concentraciones inferiores de cloro residual libre, la presencia fue de 20.98% (Bešić, Obradović, Dautbegović, & Obradović, 2017).

- Estudios previos en Ecuador, en cuatro (4) piscinas acuáticas hipotermales con desinfección a base de cloro en concentraciones promedio de 0.63mg/L de cloro libre, demostraron la capacidad del cloro para controlar la proliferación de la *Escherichia coli* en el medio acuático y en algunos casos el control para bacterias como *Pseudomonas aeruginosa* y coliformes totales (Ortega Holguín & Tinoco Mejía, 2017).

Según Ortega Holguín et al. (2017), las condiciones bacteriológicas en las cuatro (4) piscinas acuáticas después de la desinfección no presentaban colonias de *Escherichia coli*, como se observa en la Tabla 10:

Tabla 10. Condiciones bacteriológicas en 4 parques acuáticos posterior a la desinfección con cloro a concentración promedio de 0.63mg/L de cloro libre

Condiciones bacteriológicas de los parques acuáticos										
Parámetro	Límite permisible	Unidad	A		B		C		D	
			Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar
<i>Escherichia coli</i>	0	NMP / 100ml	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	0	NMP / 100ml	0	0	0,75	1,500	0	0	0	0
<i>Coliformes Totales</i>	0	NMP / 100ml	42,80	93,484	0	0	0	0	1,75	3,500

Fuente. (Ortega Holguín & Tinoco Mejía, 2017)

Como valor agregado a los tratamientos usados a base de cloro en piscinas termales, Jurado Herrera & Astudillo Ramírez (2008) realizaron un estudio evaluando los costos de operación por metro cúbico de dos desinfectantes a base de cloro y uno por ozono, para un volumen de agua de 214.6m³, concluyendo que el tratamiento con hipoclorito de sodio es viable en términos de costo y de amplio alcance al público en general.

El análisis de costo por metro cubico de agua se puede observar en la Tabla 11:

Tabla 11. Análisis comparativo de costo por m3.

Agente Oxidante	Fórmula	Costo USD/m3
Hipoclorito de sodio	Ca(OCl) ₂	0.050
Hipoclorito de calcio	NaOCl	0.063
Ozono	O ₃	0.066

Fuente. (Jurado Herrera & Astudillo Ramírez, 2008)

3.5 Normas internacionales y nacionales para uso de piscinas

3.5.1 Normativa española

En España en lo que refiere a parámetros límites para tener calidad de agua óptima y de bajo riesgo sanitario es el Real Decreto 865/2003, del 4 de julio, donde se establece los criterios higiénicos-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis. Indica en su Artículo 2 que el ámbito de aplicación se extenderá a las instalaciones que utilicen agua climatizada con agitación constante y recirculación a través de chorros de alta velocidad o la inyección de aire como son spas, jacuzzi, piscinas, vasos o bañeras terapéuticas, bañeras de hidromasaje, tratamientos con chorro a presión, entre otros (Corral Lledó, LLanos, & López Geta, 2006).

Según el Real Decreto 865/2003, los criterios definidos en piscinas de balnearios son mantener un cloro residual libre entre 0.8 y 2.0 mg/L, bromo residual libre entre 2.0 y 4.0 mg/L para aguas templadas, y mantener el pH en rango de 7.2 y 7.8.

En los requisitos de funcionamiento numeral 6 de la Consejería de Sanidad (2007), solicita un programa de limpieza y desinfección de las instalaciones y los equipamientos, cuya eficacia se comprobará periódicamente, mediante análisis microbiológicos. Así mismo, dispondrán de un programa de vigilancia de las condiciones sanitarias de las aguas utilizadas en el establecimiento balneario que permita asegurar la ausencia de microorganismos patógenos, especialmente de *Legionella pneumophila* y que incluya el seguimiento de microorganismos indicadores de contaminación fecal.

Del mismo modo, en la ciudad de Galicia se promulgó la orden del 5 de noviembre de 1996, donde menciona en su anexo I los requisitos y condiciones técnico sanitarias de los establecimientos balnearios. En ella, solicitan el control sobre las aguas destinadas a duchas y baños medicinales o a baños colectivos y piscinas de uso terapéutico, para que estén exentas de microorganismos indicadores de contaminación fecal (*Escherichia coli* y estreptococos fecales) así como de microorganismos y parásitos patógenos (Cancillería de Sanidad y Servicios Sociales, 2001).

En el Decreto No. 55/1997, del 11 de julio, sobre condiciones sanitarias de balnearios, baños termales y establecimientos de talasoterapia y de aplicación de peloides, está el Anexo I con los límites microbiológicos máximos en aguas minero-medicinales, termales, salinas y lodos; como se observa en la Tabla 12:

Tabla 12. Límites microbiológicos máximos.

PARÁMETRO	VALOR LÍMITE
Bacterias aerobias	----- (en 1ml)*
Mohos y levaduras	100 UFC/1g o 1ml
Coliformes totales	Ausencia en 1g o 100ml
<i>Escherichia coli</i>	Ausencia en 1g o 100ml
Estreptococos fecales	Ausencia en 1g o 100ml
<i>Staphylococcus aureus</i>	Ausencia en 1g o 100ml
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Ausencia en 1g o 100ml
<i>Candida albicans</i>	Ausencia en 1g o 100ml
<i>Legionella pneumophila</i>	----- (en 1L)*

Fuente. Decreto No. 55/1997

* A la vista de los resultados obtenidos, la Dirección General de Salud indicará, en su caso, las medidas a adoptar.

En el Real Decreto 742/2013 del Ministerio de Sanidad (2013), se establecen los criterios técnico sanitarios de las piscinas para uso público, entre ellas los spa y piscinas terapéuticas, (Ver Tabla 13):

Tabla 13. Parámetros indicadores de calidad del agua para spa y piscinas terapéuticas

Parámetro	Unidad	Límite	Notas
pH	-----	7.2 – 8.0	Cuando los valores estén fuera del rango se determinará el índice de Langellier que deberá estar entre -0.5 y +0.5
Temperatura	°C	24 – 30. < 36°C en hidromasaje	Solo en el caso de vasos climatizados
Transparencia	-----	Que sea bien visible el desagüe de fondo	-----
Potencial REDOX	-----	Entre 250 y 900mV	Se medirá cuando los desinfectantes sean distintos del cloro o del bromo y sus derivados
Tiempo de recirculación	Horas	Tiempos según las especificaciones y necesidades de la piscina para cumplir con los parámetros de calidad	-----
Turbidez	UNT	< 5	-----
Cloro residual libre	mg/L Cl ₂	0.5 – 2.0	Se controlará cuando se utilice cloro o derivados del cloro como desinfectante. No superar los 5.0mg/L Cl ₂
Cloro combinado residual	mg/L Cl ₂	< 0.6	Se controlará cuando se utilice cloro o derivados del cloro como desinfectante. No superar los 3.0mg/L Cl ₂
Bromo total	mg/L Br ₂	0.5 – 2.0	Se controlará cuando se utilice bromo como desinfectante. No superar los 10.0mg/L Br ₂
Ácido isocianúrico	mg/L	< 75	Se controlará cuando se utilicen derivados del ácido tricloroisocianúrico. No superar los 150.0mg/L

Parámetro	Unidad	Límite	Notas
<i>Escherichia coli</i>	UFC ó NMP en 100mL	0	En caso de sospecha o constatación de incumplimiento del valor paramétrico, se cerrará el vaso y se pondrán las medidas correctoras oportunas para que no exista un riesgo para la salud de los bañistas.
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	UFC ó NMP en 100mL	0	
<i>Legionella spp</i>	UFC/L	<100. Solo en caso de vasos con aerosolización y climatizados	

Fuente. (Ministerio de Sanidad, 2013)

3.5.2 Normativa chilena

La normativa chilena tiene como control el Decreto 209/2002 por el cual establece límites máximos microbiológicos. En el título III artículo 10 define:

Para la alimentación de las piletas deberá usarse agua potable obtenida directamente de un abasto público, siempre que sea posible. Si es necesario recurrir a una fuente distinta, ésta deberá ser autorizada previamente por el Servicio de Salud, el que determinará el tratamiento a que se deberá someter el agua, en su caso, y sobre su desinfección, (Ministerio de Salud, Reglamento de Piscinas de Uso Público. Decreto 209, 05 de julio de 2002., 2002).

Tabla 14. Parámetros de calidad

PARÁMETRO	VALOR LÍMITE
pH	7.2 – 8.2
Cloro libre residual	0.5 – 1.5 (ppm o mg/L)
Cobre (Alguicidas)	Máximo 1.5 (mg/L)
Bromo (Desinfectante)	1 – 3 (mg/L)
Espumas, grasas y partículas en suspensión	Ausencia
Bacterias aeróbicas	< 200 colonias/mL
Coliformes fecales	Ausencia

PARÁMETRO	VALOR LÍMITE
Coliformes totales	< 20 colonias/100mL
Algas, larvas u otro organismo vivo	Ausencia

Fuente. Decreto 209/2002

3.5.3 Normativa cubana

Las aguas minero medicinales son aguas especiales con características físicas, químicas y biológicas específicas que las hacen adecuadas para el tratamiento de determinadas enfermedades. Su aplicación terapéutica puede ser como agua de bebida y/o en forma externa por medio de baños llamados termales.

Las actividades técnicas a realizar para el control sanitario de las aguas mineromedicinales son las que se ejecutan sobre los balnearios minero medicinales y que se establecen en las normas cubanas (Ministerio de Salud Pública, 2002).

- NC 93-09:85 Higiene Comunal. BALNEARIOS MINERO MEDICINALES. Requisitos Sanitarios.
- NC 93-28:88 Sistema de Normas de Protección del Medioambiente. HIGIENE COMUNAL. INSTALACIONES DE ALOJAMIENTO. Requisitos Higiénico Sanitarios.

Según la norma, exige parámetros mensuales que se deberán tomar a fuentes, puntos críticos del sistema, llaves de salida importantes, pocetas, bañeras o piscinas, etc.

En la Tabla 15 están los límites microbiológicos exigidos:

Tabla 15. Aguas empleadas para el baño

PARÁMETRO	VALOR LÍMITE
Conteo total de heterótrofos*	100 – 10000 UFC/mL
Coliformes fecales	< 2.2 NMP/100mL
Estreptococos fecales	< 2.2 NMP/100mL
Pseudomonas aeruginosas	< 2.2 NMP/100mL

Fuente. (Ministerio de Salud Pública, 2002)

* Este análisis se refiere al conteo total de bacterias a 37°C y 20 – 22 °C.

3.5.4 Normativa de la Organización Mundial de la Salud (OMS)

En la guía de la Organización Mundial de la Salud, se presenta como valor máximo recomendado de cloro libre en piscinas de uso público 5.0 mg/L. Sin embargo, usar altas dosis de cloro (mayores a 20 mg/L), como choque puede ser una efectiva medida y estrategia para controlar los microorganismos y minimizar la creación de biopelículas y cloraminas (World Health Organization, 2006).

En cuanto a la calidad microbiológica del agua en piscinas de uso público y semipúblico, la Organización Mundial de la Salud aconseja seguir rutinas de chequeo y los valores límites en la presencia de coliformes totales, *Pseudomonas*, *E. coli* y *Legionella*, como se describe en la Tabla 16:

Tabla 16. Frecuencia toma de muestras recomendadas y guía operacional para pruebas microbiológicas durante operación normal.

Tipo de piscina	Conteo de placa de Heterótrofos	Coliformes Termotolerantes / <i>E. coli</i>	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	<i>Legionella spp.</i>
Piscinas desinfectadas públicas y de alto uso	Semanalmente (< 200UFC/mL)	Semanalmente (<1UFC/100mL)	Cuando la situación lo requiera (<1UFC/100mL)	Trimestralmente (<1UFC/100mL)
Piscinas desinfectadas semi públicas	Mensualmente (< 200UFC/mL)	Mensualmente (<1UFC/100mL)	Cuando la situación lo requiera (<1UFC/100mL)	Trimestralmente (<1UFC/100mL)
Spas Natural	N/A	Semanalmente (<1UFC/100mL)	Semanalmente (<10UFC/100mL)	Mensualmente (<1UFC/100mL)
Jacuzzi	N/A	Semanalmente (<1UFC/100mL)	Semanalmente (<1UFC/100mL)	Mensualmente (<1UFC/100mL)

Fuente. (World Health Organization, 2006)

3.5.5 Normativa colombiana

El Decreto exigido por el Ministerio de Salud y Protección Social para piscinas de uso público, a excepción de piscinas termales, es el número 554 del 2015 del 27 de marzo, el cual menciona en el Capítulo 2 Artículo 6:

Parámetros de calidad del agua y productos y sustancias químicas utilizadas en el tratamiento de agua contenida en estanques de piscinas. El agua que se almacene en estanques de piscina debe ser limpia y sana. Para el efecto, el Ministerio de Salud y Protección Social definirá los parámetros generales físico químicos y microbiológicos del agua, los cuales será la referencia para las autoridades sanitarias departamentales, distritales y municipales categoría especial 1, 2 y 3.

Parágrafo. Los parámetros generales físico químicos y microbiológicos del agua no serán exigibles a los estanques que almacenen aguas termales y de usos terapéuticos. El Ministerio de Salud y Protección Social definirá dichos parámetros.

En el Decreto 1076 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo (2015), artículo 2.2.3.3.9.7 se mencionan algunos criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso hídrico con fines recreativos mediante contacto primario, entendiendo como fines recreativos de contacto primario las actividades de natación y buceo.

Tabla 17. Parámetros admisibles Decreto 1076 de 2015 de Colombia

Referencia	Expresado como	Valor
Coliformes fecales	NMP/100mL	200
Coliformes totales	NMP/100mL	1000
Compuestos fenólicos	Fenol	0.002
Oxígeno disuelto	%	70% concentración de saturación
pH	Unidades	5.0 – 9.0
Tensoactivos	Sustancias activas al azul de metileno	0.5

Fuente. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015)

3.5.6 Normativa peruana

En el Decreto Supremo No. 015-2015 del Ministerio de Ambiente se definen los parámetros límites que deben asegurar las aguas superficiales destinadas para la recreación de primer y segundo contacto (Ver Tabla 18):

Tabla 18. Parámetros fisicoquímicos, inorgánicos, microbiológicos

PARAMETRO	UNIDADES	AGUAS SUPERFICIALES DESTINADAS PARA RECREACION	
		B1 (Primer contacto)	B2 (Segundo contacto)
Físico - Químicos			
Aceites y Grasas	mg/L	Ausencia de película visible	----
Cianuro Libre	Cianuro Libre	0.022	0.022
Cianuro Wad	mg/L	0.08	----

PARAMETRO	UNIDADES	AGUAS SUPERFICIALES DESTINADAS PARA RECREACION	
		B1 (Primer contacto)	B2 (Segundo contacto)
Color verdadero	UPC	Sin cambio normal	Sin cambio normal
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	5	10
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	30	50
Detergentes (SAAM)	mg/L	0.5	Ausencia de material flotante
Materiales Flotantes de origen antropogénico	----	Ausencia de material flotante	Ausencia de material flotante
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	10	----
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	1	----
Olor	Factor de dilución a 25°C	Aceptable	----
Oxígeno Disuelto	mg/L	> 5	> 4
pH	----	6.0 – 9.0	----
Sulfuros	mg/L	0.05	----
Turbiedad	UNT	100	----
Inorgánicos			
Aluminio	mg/L	0.2	----
Antimonio	mg/L	0.006	----
Arsénico	mg/L	0.01	----
Bario	mg/L	0.7	----
Berilio	mg/L	0.04	----
Boro	mg/L	0.5	----
Cadmio	mg/L	0.01	----
Cobre	mg/L	2	----
Cromo Total	mg/L	0.05	----
Cromo VI	mg/L	0.05	----
Hierro	mg/L	0.3	----
Manganeso	mg/L	0.1	----
Mercurio	mg/L	0.001	----
Niquel	mg/L	0.02	----
Plata	mg/L	0.01	0.05
Plomo	mg/L	0.01	----
Selenio	mg/L	0.01	----
Uranio	mg/L	0.02	0.02
Vanadio	mg/L	0.1	0.1
Zinc	mg/L	3	----

PARAMETRO	UNIDADES	AGUAS SUPERFICIALES DESTINADAS PARA RECREACION	
		B1 (Primer contacto)	B2 (Segundo contacto)
Microbiológicos			
Coliformes Totales (35 – 37°C)	NMP/100mL	1000	4000
Coliformes Termotolerantes (44.5°C)	NMP/100mL	200	1000
<i>Escherichia coli</i>	<i>E.coli</i> /100mL	Ausencia	Ausencia
Formas Parasitarias	No. Organismo/L	0	----
Giardia duodenails	No. Organismo/L	Ausencia	Ausencia
Enterococos intestinales	NMP/100MI	200	----
Salmonella sp	Presencia/100mL	0	0
Vibrio Cholerae	Presencia/100mL	Ausencia	Ausencia

Fuente. (Ministerio de Ambiente, 2015)

3.5.7 Normativa de Costa Rica

Según el Decreto No. 35309-S del 30 de marzo de 2009 establece las condiciones fisicoquímicas y microbiológicas que toda piscina de contacto primario deberá cumplir para el buen manejo de las aguas y la salud de los usuarios (Ver Tabla 19).

Tabla 19. Parámetros físicos, químicos y microbiológicos

PARAMETROS	UNIDADES	VALOR LIMITE
Físico - Químicos		
Color y Olor	----	Ausencia, salvo ligera presencia por tratamiento
Espumas permanentes, grasas y sustancias extrañas	----	Ausencia
Transparencia del agua	----	Visibilidad perfecta de las marcas del fondo en el punto de máxima profundidad
pH	----	6.8 – 8.0

PARAMETROS	UNIDADES	VALOR LIMITE
Cloro residual libre o combinado	mg/L	Cloro residual libre: 2.0 - 3.0 Cloro combinado < 0.3
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	80 - 150
Bromo total		1.0 – 3.0
Ozono	mg/L	0.01 mínimo. 0.4 antes de entrar el agua al dispositivo de desozonización, con un tiempo de contacto de 4 minutos.
Derivados polímeros de la biguadina (PHMB)	mg/L	25 – 50
Plata	mg/L	10
Temperatura del agua	°C	24 – 30
Temperatura ambiente	°C	Superior a la del agua entre 2 – 4
Humedad Ambiental Relativa	%	< 80%
Turbiedad	UNT	< 1.5
Conductividad a 20°C	μS/cm	< 800
Amoníaco	mg/L	0.5
Nitratos	mg/L	< 10
Aluminio	mg/L	0.3
Cobre	mg/L	2
Ácido Isocianúrico	mg/L H	75
Dureza	mg/L CaCO ₃	< 250
Microbiológicos		
Recuento aeróbico total 37	UFC o NMP/mL	< 200 colonias
Coliformes fecales	UFC o NMP/100mL	Ausencia
<i>E. coli</i>	UFC o NMP/100mL	Ausencia
<i>Staphylococcus aureus</i>	UFC o NMP/100mL	Ausencia
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	UFC o NMP/100mL	Ausencia
<i>Streptococos fecales</i>	UFC o NMP/100mL	Ausencia

Fuente. (Ministerio de Salud, Decreto No. 35309-S del 30 de marzo, 2009)

CAPITULO 4. METODOLOGIA

Por ser un estudio de recolección de muestras y análisis empírico, la metodología escogida fue de investigación experimental mediante técnicas de laboratorio. Para ello, se seleccionó el balneario “Termales Aguas Calientes” ubicado en el municipio de Paratebueno, Cundinamarca; sitio turístico que cuenta con una fuente termal clasificada como hipertermal por su temperatura in situ de hasta 75°C. Además, es un balneario que está en desarrollo para su máxima capacidad de usuarios, y donde concurren turistas de diferentes zonas del país como son Cundinamarca, Meta y Casanare; haciendo de éste lugar un apropiado sitio de análisis fisicoquímico y microbiológico.

4.1 Ubicación de la piscina termal

El balneario Termales Aguas Calientes está en el municipio de Paratebueno, departamento de Cundinamarca, entrando por la vía rural a 10 km de la ruta nacional 6510. Aproximadamente a 340 m.s.n.m. con una temperatura ambiente de 27°C.

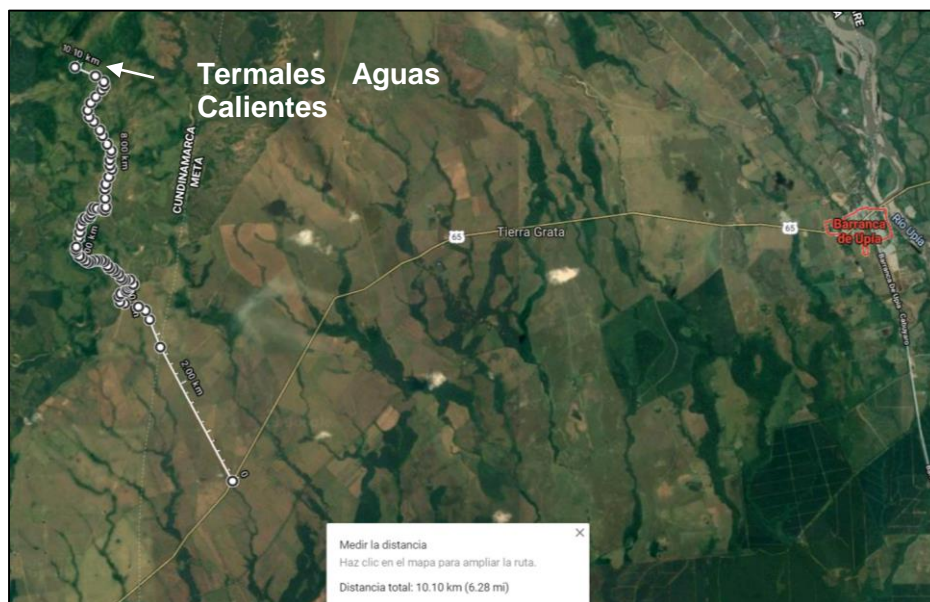


Figura 4. Ubicación Termales Aguas Calientes. Google maps.

El balneario cuenta con una sola piscina termal de 10m x 25m y profundidad de 1.60m. El agua de la fuente hipertermal nace a ras de piso y es conducida por canales y tuberías hasta un tanque primario. Luego, es enfriada con agua fría que es conducida por una tubería

hasta el tanque primario, proveniente de un nacedero cercano, con el fin de mezclar el agua fría y caliente ajustando la temperatura del agua en la piscina termal a máximo 35°C. El llenado de la piscina se hace por medio de 4 mangueras que caen a manera de chorro, permitiendo la oxigenación del agua. En la Figura 5 se observa la piscina termal.



Figura 5. Piscina termal temperatura promedio 35°C. Autor.

4.2 Toma de muestras

Para la planificación del programa de muestreo se tuvo como referencia la norma NTC-ISO 5667-1 y para la ejecución del mismo, la norma NTC-ISO 5667-2, en la cual se estipula tomar muestras en proporciones conocidas, a partir de las cuales se puede obtener el resultado promedio de una característica deseada, (ICONTEC, 1995). Las muestras tomadas para la realización de esta investigación, se clasifican como integradas, ya que cada muestra se integró a partir de cinco (5) muestras puntuales tomadas a la misma profundidad, dos (2) a cada lado longitudinal y una (1) en la zona más profunda de la piscina termal.

En cada toma de muestra se midieron parámetros fisicoquímicos *in situ* con un equipo multiparámetro (Ver Tabla 20). Así mismo, en las visitas no fue necesario medir la concentración del cloro libre, pues los operadores no utilizan cloro para la desinfección del agua termal. Su único mantenimiento es semanal cuando retiran la totalidad del agua de la piscina y realizan limpieza de paredes con detergente.

Tabla 20. Parámetros fisicoquímicos medidos en campo.

Parámetro	Unidad	Método de Referencia	Equipo
Temperatura	°C	SMWW 2550	HQd/IntelliCAL™ Rugged Field Kit 8505300. Marca HACH
pH	-----	SMWW 4500-H+ B	
Oxígeno disuelto	mg/L O ₂	SMWW 4500-O C	
Conductividad	μS/cm	SMWW 2510 B	

Fuente. Autor

En la Tabla 21 se encuentran las fechas en las que se realizaron las tomas de muestra integradas y se analizaron los parámetros in situ.

Tabla 21. Visita de la toma de muestras

Fecha	Toma de muestra	Hora	No. de Bañistas
Mayo 12	Para muestra No. 1	12:05 pm	0
Mayo 19	Para muestra No. 2	5:25 pm	2
Junio 03	Para muestra No. 3	12:10 pm	0
Junio 08	Para muestra No. 4	4:30 pm	0
Junio 24	Para muestra No. 5	3:00 pm	13

Fuente. Autor

Después de medir los parámetros in situ, las muestras de agua integradas fueron refrigeradas, almacenadas y llevadas a las instalaciones del laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.



Figura 6. Lectura de parámetros in situ.

4.3 Análisis fisicoquímico y microbiológico

El análisis fisicoquímico y microbiológico se determinó siguiendo las metodologías descritas por el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater y de la United States Environmental Protection Agency. A continuación, se describen las metodologías de cada análisis:

Tabla 22. Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en laboratorio

Parámetro	Unidad	Técnica	Método de Referencia
Turbiedad	UNT	Nefelométrico	SMWW 2130 B
Color	UPC	Comparación Visual	SMWW 2120 B
Manganeso	mg/L	Espectrofotómetro	USEPA Method 8034
Hierro	mg/L	Colorimétrico	SMWW 3500 Fe B
Nitrógeno amoniacal	mg/L	Nesslerización	SMWW 417
Escherichia coli	UFC/100mL	Filtración Membrana	SMWW 9222 K
Coliformes totales	UFC/100mL	Filtración Membrana	SMWW 9222 K

Fuente: (SMWW, 2017)

En la Figura 7, se muestran los elementos de laboratorio donde se desarrollaron los análisis fisicoquímicos y microbiológicos.



Figura 7. Elementos de laboratorio

4.4 Análisis de demanda de cloro

Para el análisis de demanda de cloro se siguieron las metodologías descritas por el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, que se muestran a continuación:

Tabla 23. Determinación de la concentración de cloro residual

Parámetro	Unidad	Técnica	Método de Referencia
Demanda de cloro	mg/L	Titulométrico	SMWW 2350 B
Cloro residual libre	mg/L	Titulométrico	SMWW 4500-CI F. DPD

Fuente: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd Edition. (SMWW, 2017)

En la Figura 8, están los elementos utilizados para el ensayo de demanda cloro.



Figura 8. Equipos ensayo demanda de cloro

CAPITULO 5. RESULTADOS

5.1 Caracterización fisicoquímica de la piscina termal

En la Tabla 24 se muestran los resultados de los parámetros medidos *in situ* y de los ensayos realizados en el laboratorio para el agua de la piscina termal. La fecha mostrada, corresponde a la toma de muestra.

Tabla 24. Parámetros fisicoquímicos de la piscina termal

PARAMETRO	UNIDAD	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Muestra No. 4	Muestra No. 5
		Mayo 12	Mayo 19	Junio 03	Junio 08	Junio 23
		VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR
Temperatura	°C	35.4	35.4	33.8	34.1	35.9
pH	---	6.5	6.7	6.7	6.1	6.8
Conductividad	μS/cm	265.2	362.4	247.2	213.5	407.6
Oxígeno disuelto	mg/L O ₂	6.5	6.8	7.1	7.0	6.3
Nitrógeno Amoniacal	mg/L NH ₃ -N	0.49	0.61	0.48	0.46	0.71
Hierro Total	mg/L Fe	0.44	0.18	0.73	0.12	0.29
Turbiedad	UNT	3.89	2.41	1.72	1.75	2.41
Color	UPC	14.0	9.1	7.4	6.1	7.8
Manganeso	mg/L Mn	0.50	0.30	0.60	0.70	0.30

5.2 Caracterización microbiológica del agua cruda en la piscina termal

En la Tabla 25 se muestran los resultados del conteo microbiológico del agua cruda.

Tabla 25. Caracterización microbiológica del agua cruda de la piscina termal

PARAMETRO	UNIDAD	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Muestra No. 4	Muestra No. 5
		Mayo 12	Mayo 19	Junio 03	Junio 08	Junio 23
		VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR
<i>Escherichia coli</i>	UFC/100mL	0	0	0	0	40
Coliformes totales	UFC/100mL	50	280	340	50	410

Para la muestra No. 5 la piscina termal tuvo gran afluencia turística, lo cual se refleja en la presencia de organismos patógenos como *Escherichia coli*.

En la Figura 9, se muestra el resultado para la muestra No. 5 en la que destacó la presencia de *E. coli*.

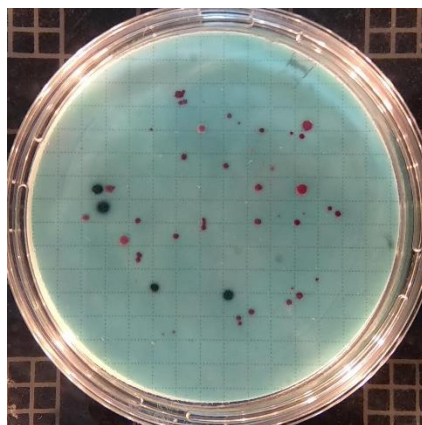


Figura 9. Conteo microbiológico en agua cruda. Coliformes totales (Rojas), *E. coli* (Azules). Muestra No. 5

5.3 Resultados de la demanda de cloro

En la Tabla 26 se presentan los resultados de los ensayos de demanda de cloro para las muestras tomadas en campo. Por muestra se analizaron diez (10) dosis diferentes de cloro para un mismo tiempo de contacto de 10 minutos.

Tabla 26. Resultados demanda de cloro para las muestras tomadas

			Muestra No. 1						Muestra No. 2		Muestra No. 3		Muestra No. 4		Muestra No. 5	
			Cloro Residual						Cloro Residual		Cloro Residual		Cloro Residual		Cloro Residual	
Dosis	Libre	Comb.				Dosis	Libre	Comb.	Libre	Comb.	Libre	Comb.	Libre	Comb.	Libre	Comb.
mg/L Cl ₂	mg/L Cl ₂	mg/L Cl ₂	mg/L Cl ₂	mg/L Cl ₂	mg/L Cl ₂	mg/L Cl ₂	mg/L Cl ₂	mg/L Cl ₂	mg/L Cl ₂	mg/L Cl ₂	mg/L Cl ₂	mg/L Cl ₂	mg/L Cl ₂	mg/L Cl ₂	mg/L Cl ₂	mg/L Cl ₂
2.00	0.10	1.40				1.00	0.10	0.90	0.30	0.60	0.20	0.70	0.20	0.80		
2.50	0.10	1.70				2.00	0.20	1.70	0.30	1.70	0.30	1.80	0.30	1.50		
3.00	0.20	2.20				3.00	0.30	2.30	0.90	1.80	0.70	2.00	0.30	2.50		
3.50	0.40	2.10				4.00	0.60	2.50	1.40	1.50	2.70	0.40	0.60	2.60		
4.00	0.60	1.90				5.00	1.20	1.10	2.10	1.00	2.40	0.90	0.90	2.10		
4.50	0.90	1.80				6.00	2.00	1.10	3.10	0.60	3.30	0.70	1.70	1.10		
5.00	1.20	1.20				7.00	3.00	0.50	4.00	0.50	4.10	0.50	2.40	0.80		
5.50	1.40	1.40				8.00	3.80	0.60	4.60	0.80	5.10	0.50	3.30	0.60		
6.00	2.10	0.50				9.00	4.30	0.80	5.40	0.60	5.60	0.60	3.90	0.70		
6.50	2.50	0.70				10.00	5.30	0.50	6.60	0.60	6.80	0.70	4.70	0.70		

CAPITULO 6. ANALISIS DE RESULTADOS

6.1 Análisis fisicoquímico de la piscina termal

6.1.1 Temperatura

La temperatura promedio del agua en la piscina es de 35°C, y se encuentra en un rango aceptable por debajo de los 36°C, según el Decreto 742/2013 de España.

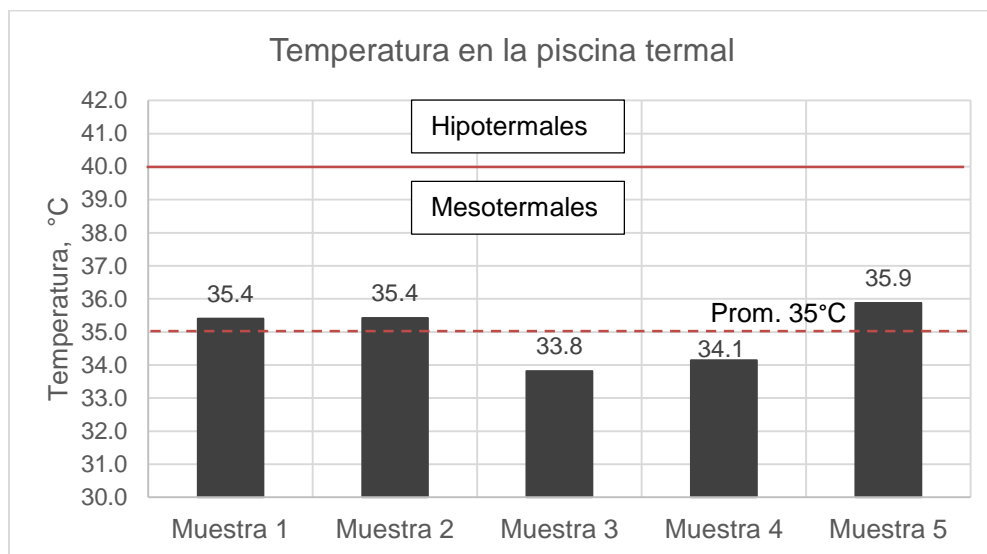


Figura 10. Temperatura de la piscina termal. Clasificación según temperatura.

Según la clasificación por temperatura del numeral 3.1.1, la fuente termal estaría clasificada como hipertermal con una temperatura de 75°C y la piscina como mesotermal. Según Romero Rojas (2013), las temperaturas óptimas donde la proliferación de bacterias puede ocurrir es de 25°C a 35°C.

6.1.2 Potencial de hidrógeno (pH)

Los datos registrados del pH tienen como valor promedio 6.60, un mínimo de 6.08 y un máximo de 6.85; valores aceptables dentro de las normas de España, Chile, Perú, Costa Rica y Colombia. En general el agua de la piscina mantiene condiciones por debajo de la

neutralidad (pH 7), correspondiente a aguas ácidas, favoreciendo la capacidad desinfectante del cloro.

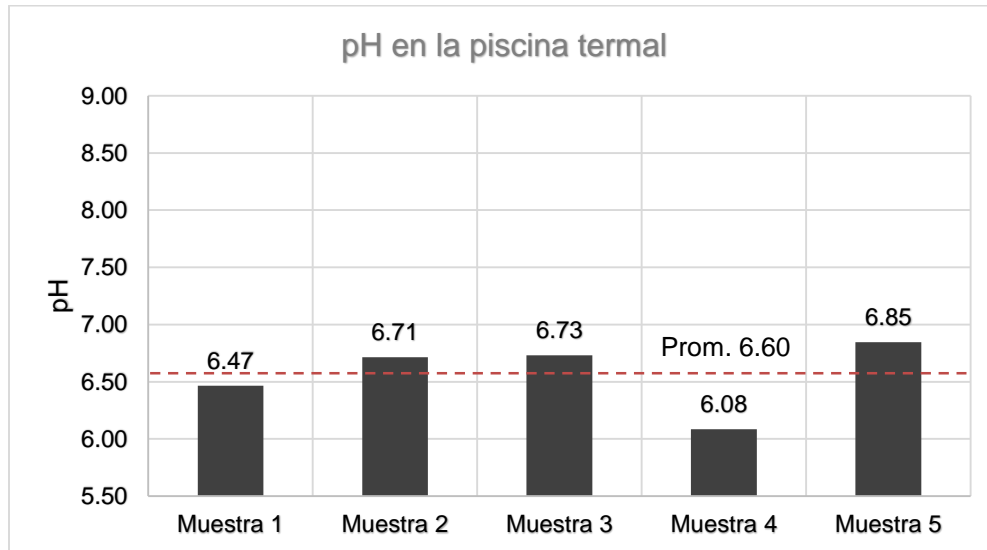


Figura 11. Valores de pH de la piscina termal.

6.1.3 Turbiedad y color

Según el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS, 2010), fuentes de agua con turbiedad alrededor de 2 UNT son fuentes aceptables. Para el caso de nuestra piscina termal donde su turbiedad promedio es de 2.44 UNT, podemos afirmar que la fuente termal que suministra agua a la piscina tiene turbiedades en ordenes aceptables. Por otro lado, en España según el Real Decreto 742/2013 exige para piscinas de primer contacto turbiedad menor a 5 UNT; mientras que en Costa Rica el Decreto 35309-S el parámetro es más estricto solicitando 1.5 UNT máximo. Por lo que, la piscina termal cumple con la normativa de España, pero no con la de Costa Rica (Ver Figura 12).

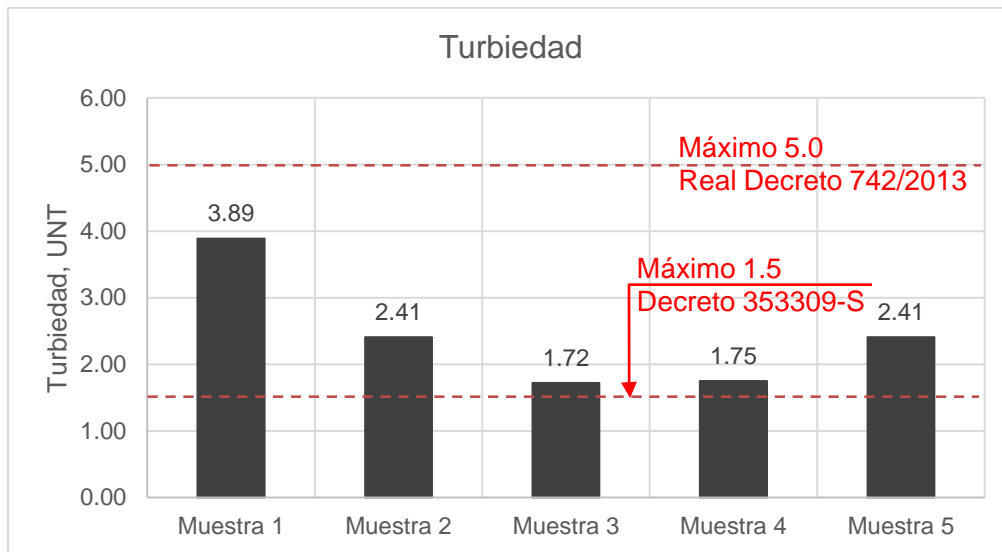


Figura 12. Valores de turbiedad en la piscina termal

El color de la piscina termal tiene un valor promedio de 8.9 UPC, un mínimo de 6.10 y un máximo de 14. En las normas consultadas en éste trabajo, no se establecen límites para este parámetro.

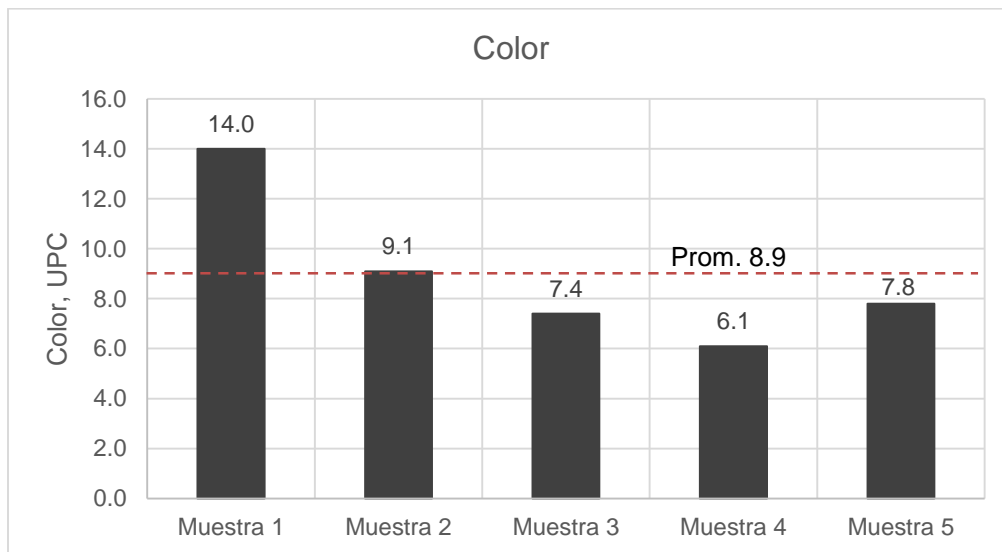


Figura 13. Valores de color en la piscina termal

6.1.4 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica se puede correlacionar con la presencia de sólidos disueltos totales (SDT) según la Ecuación 1, obteniendo valores mínimos y máximos de SDT, así:

$$SDT \text{ mínimos (mg/L)} = 213[\mu \text{ siemens/cm}] * 0.64 = 136 \text{ mg/L}$$

$$SDT \text{ máximos (mg/L)} = 408[\mu \text{ siemens/cm}] * 0.64 = 261 \text{ mg/L}$$

Como se puede observar en la Figura 14, el posible incremento de la conductividad eléctrica en la muestra No. 5, puede relacionarse por la mayor carga orgánica presente en agua de la piscina termal que fue cuando hubo mayor número de bañistas.

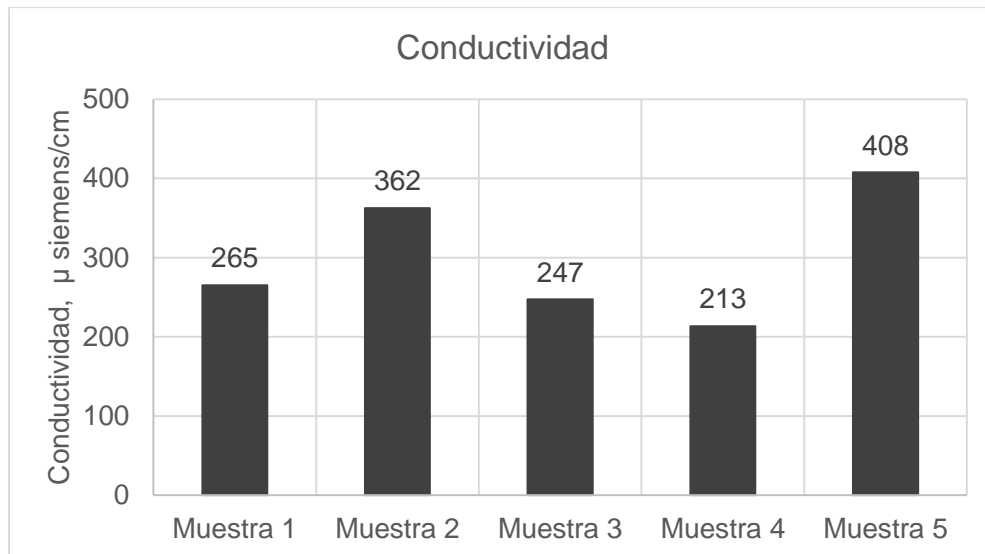


Figura 14. Conductividad eléctrica

6.1.5 Oxígeno disuelto

Según el Decreto 1076 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, el oxígeno disuelto en piscinas de uso recreativo debe ser por lo menos 70% de la concentración de saturación. Así que para nuestro caso con los valores obtenidos in situ, como temperatura de agua a 35°C y altitud aproximada de 340 m.s.n.m., se tiene que la concentración de saturación de oxígeno disuelto para la piscina termal es de 6.60mg/L.

Por lo tanto, se puede afirmar que el valor mínimo de oxígeno disuelto para cumplir con el Decreto 1076 de 2015 corresponde a 4.80mg/L O₂ y que las concentraciones de oxígeno disuelto que tiene la piscina termal cumplen con la normatividad colombiana.

En la Figura 15, se encuentran las concentraciones de oxígeno disuelto medido en la piscina termal.

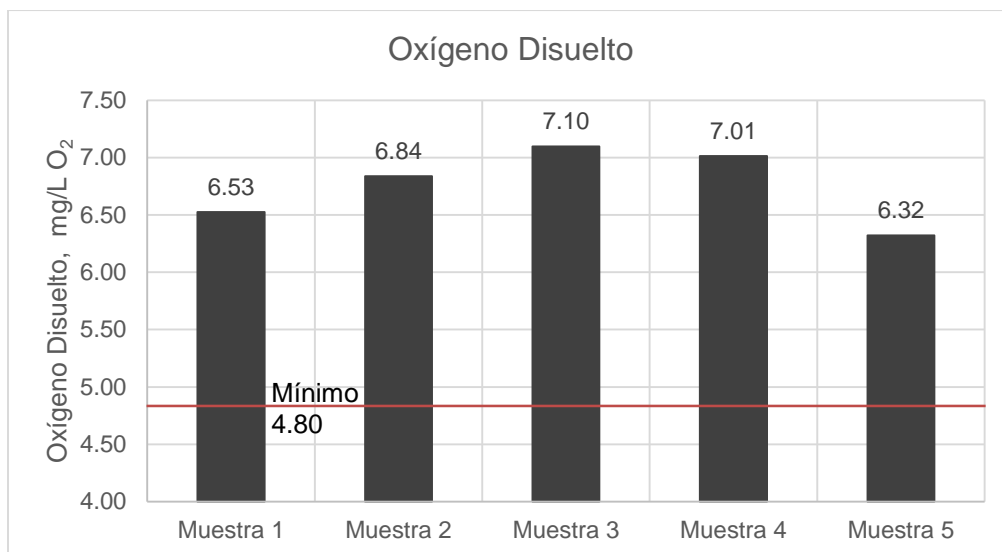


Figura 15. Concentraciones de oxígeno disuelto en la piscina termal.

Analizando el valor de oxígeno disuelto de la muestra No. 5; que fue el más bajo obtenido en la piscina termal; se asume que pudo ser posible por un mayor contenido orgánico dado el aumento de bañistas. Además, para la muestra No. 5 se tuvo la presencia de *Escherichia coli* y coliformes totales en los resultados microbiológicos.

6.1.6 Hierro total y manganeso

En la piscina termal se tuvo un valor mínimo y máximo de hierro de 0.12 y 0.73 mg/L, respectivamente. Con respecto al manganeso su valor mínimo fue de 0.30mg/L y el máximo de 0.70mg/L. Según Romero Rojas (2013), en aguas subterráneas es común encontrar concentraciones de hierro y manganeso de hasta 1.0mg/L.

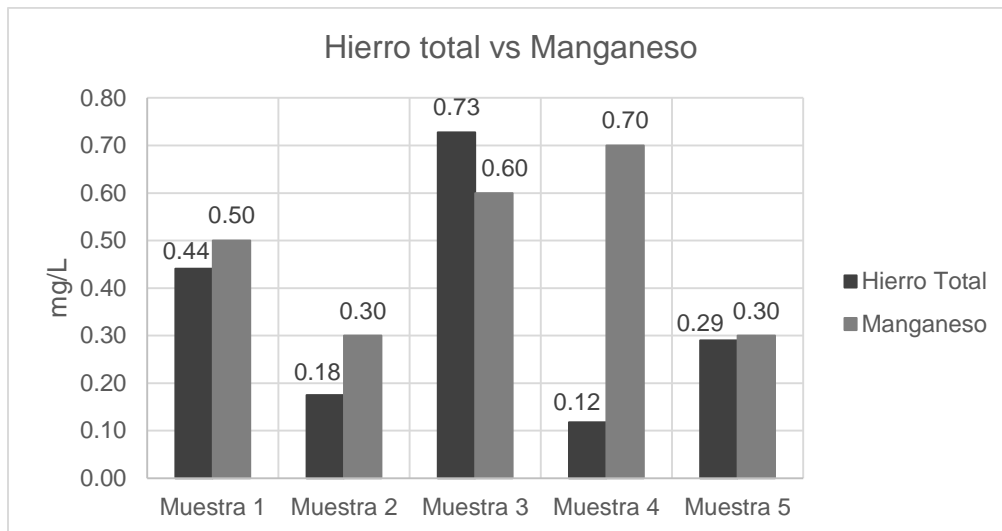


Figura 16. Hierro total vs Manganeseo en la piscina termal

6.1.7 Nitrógeno amoniacal

En la figura 17 se observa los resultados de la medición del nitrógeno amoniacal en cada una de las muestras. Así mismo, se puede identificar que para cuando se tuvo mayor presencia de bañistas en la piscina, como en el caso de la muestra No. 5, la concentración del nitrógeno amoniacal aumentó.

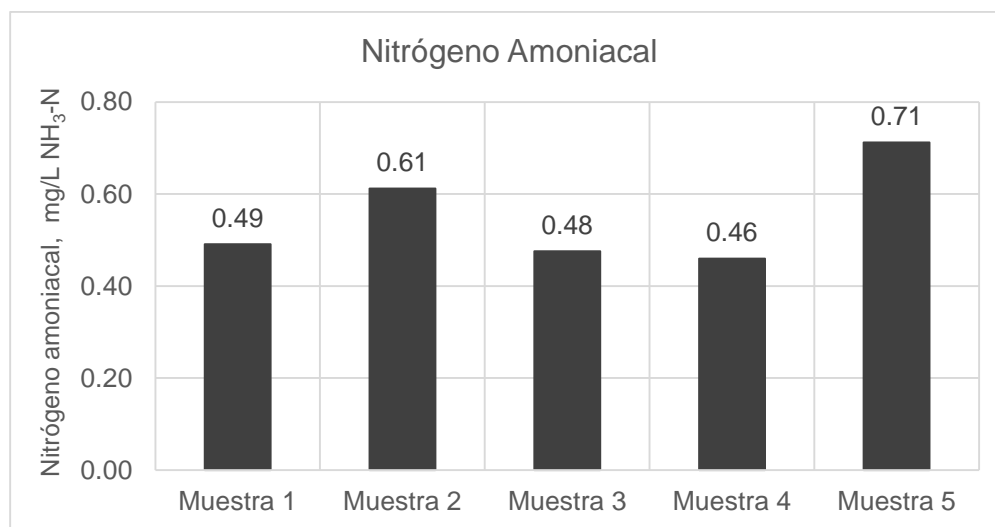


Figura 17. Nitrógeno amoniacal

6.1.8 Análisis normativo con los parámetros fisicoquímicos del agua cruda

Tomando los valores promedios de la Tabla 24 se analizan los resultados con la normativa consultada para los parámetros fisicoquímicos (Ver Tabla 27).

Tabla 27. Comparación fisicoquímica del agua cruda con la normatividad

PARAMETRO	UNIDAD	Valor promedio piscina termal	Real Decreto 742/2013 España	Decreto 209/2002 Chile	Decreto Supremo 015-2015 Perú	Decreto 35309-S Costa Rica	Decreto 1076 de 2015 Colombia
Temperatura	°C	34.9	24 – 30 < 36°C			24 – 30	
pH	---	6.60	7.2 – 8.0	7.2 – 8.2	6.0 – 9.0	6.8 – 8.0	5.0 – 9.0
Conductividad Eléctrica	µS/cm	299				< 800	
Oxígeno Disuelto	mg/L O ₂	6.76			> 5.0		> 70% concentración de saturación
N. Amoniacal	mg/L NH ₃ -N	0.55					
Hierro Total	mg/L Fe	0.35			0.30		
Turbiedad	UNT	2.40	< 5.0		100	< 1.5	
Color	UPC	8.90			Sin cambio normal	Ausencia, salvo ligera presencia debida al tratamiento	
Manganeso	mg/L Mn	0.48			0.10		

Fuente. Autor

Los parámetros que cumplen la normatividad son turbiedad, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, pH y temperatura. Por otro lado, ninguna de las normas consultadas establece límites para la concentración de nitrógeno amoniacal.

Para las concentraciones de manganeso, solo el Decreto Supremo 015-2015 de Perú fija un límite de 0.10 mg/L Mn, el cual la piscina termal no lo cumple.

6.1.9 Análisis normativo con los parámetros microbiológicos del agua cruda

Tomando los valores máximos de la Tabla 25, se analizaron los resultados microbiológicos con la normativa consultada (Ver Tabla 28).

Tabla 28. Comparación microbiológica del agua cruda con la normatividad

PARAMETRO	UNIDAD	Valor Máximo	Decreto No. 55/1997 España	Real Decreto 742/2013 España	Decreto 209/2002 Chile	OMS 2006	Decreto Supremo 015-2015 Perú	Decreto 35309-S Costa Rica
<i>Escherichia coli</i>	UFC/100mL	40	0	0	0	< 1.0	0	0
Coliformes totales	UFC/100mL	410	0	0	< 20	0	< 1000 NMP/100mL	N.A.

Para las normas de Cuba, Perú y Colombia que exigen límites con unidades NMP/100mL, no son comparables con los valores medidos por el ensayo de filtración membrana. Respecto a las normas comparadas en la Tabla 28, ninguno de los parámetros microbiológicos medidos cumple con lo exigido.

6.2 Análisis del ensayo de demanda de cloro en el agua de la piscina termal

Una vez realizada la caracterización microbiológica del agua cruda, se procedieron con los ensayos de demanda de cloro utilizando diez (10) dosis diferentes para un mismo tiempo de contacto de 10 minutos. Además, se observaron las eficiencias en la eliminación de coliformes totales y *Escherichia coli*. En las figuras a continuación, se muestran los resultados de dichos ensayos.

6.2.1 Muestra integrada No. 1 (tomada el 12 de mayo de 2019)

Caracterización microbiológica del agua cruda (pH 6.47)

Coliformes totales 50 UFC/100mL

Escherichia coli 0 UFC/100mL

En la Tabla 29, se recopilaron los dos ensayos de demanda de cloro para la muestra No. 1 con la eliminación de coliformes totales. Además, se muestran los resultados para el punto de quiebre de los dos ensayos de demanda de cloro presentados en las Figuras 18 y 19.

Tabla 29. Parámetros microbiológicos y fisicoquímico de la muestra No. 1

Dosis	Cloro Residual Libre	Cloro Residual Combinado	Coliformes Totales		HOCl	OCl ⁻
			UFC/100mL	% Eliminación		
mg/L Cl ₂	mg/L Cl ₂	mg/L Cl ₂			mg/L	mg/L
2.00	0.10	1.40	0.0	100	0.09	0.01
2.50	0.10	1.70	1.0	98	0.09	0.01
3.00	0.20	2.20	1.0	98	0.18	0.02
3.50	0.40	2.10	0.0	100	0.37	0.03
4.00	0.60	1.90	0.0	100	0.55	0.05
4.50	0.90	1.80	0.0	100	0.83	0.07
5.00	1.20	1.20	0.0	100	1.11	0.09
5.50	1.40	1.40	0.0	100	1.29	0.11
6.00	2.10	0.50	0.0	100	1.93	0.17
6.50	2.50	0.70	0.0	100	2.30	0.20

Fuente. Autor

Se observa en la Tabla 29 que no existe tendencia en decrecer la eliminación de coliformes totales a medida que aumenta la concentración de cloro. Sin embargo, para las dosis en los puntos de quiebre como son 5.0 y 5.5mg/L de cloro, los porcentajes de eliminación de coliformes totales estuvieron en un 100%. Cabe resaltar que el conteo de coliformes totales en el agua cruda estuvo en 50 UFC/100mL.

De acuerdo a los datos presentados en la Tabla 29 se puede indicar en la muestra No. 1 que el punto de quiebre de la curva de demanda de cloro del ensayo No. 1 (Figura 18) corresponde a la dosis 5.0mg/L de cloro, para la cual se calcula una concentración de HOCl de 1.11mg/L y de OCl⁻ en 0.09mg/L.

Se observa que para un pH del agua de la piscina termal de 6.47, el porcentaje de HOCl y OCl⁻ en la muestra clorada fue de 92.5% y 7.5%, respectivamente.

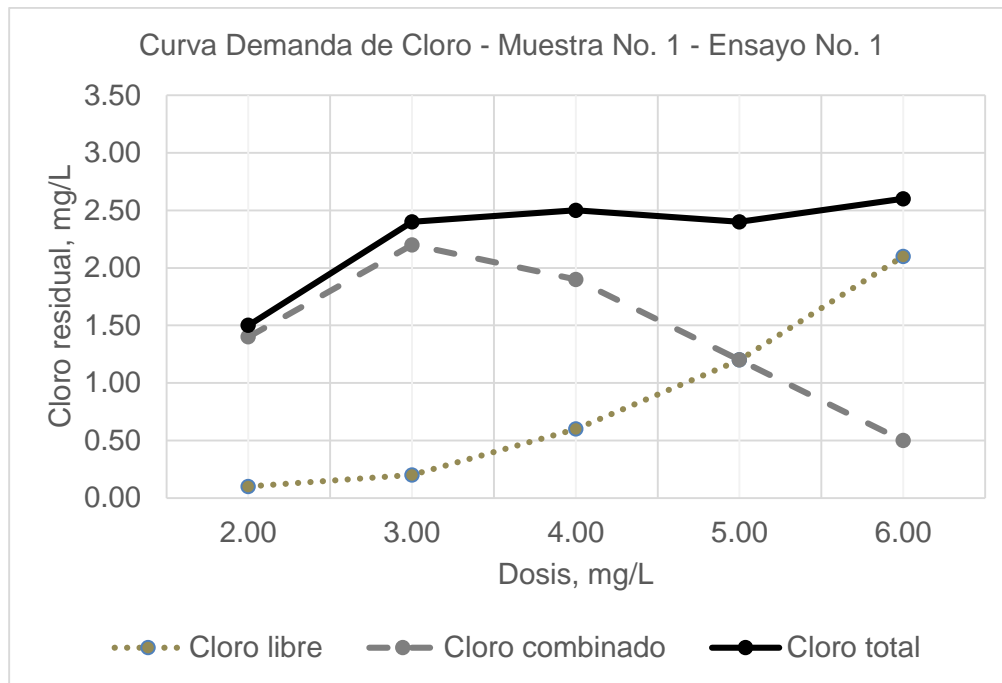


Figura 18. Curva demanda de cloro Muestra No. 1 – Ensayo No. 1

De acuerdo a los datos presentados en la Tabla 29 se puede indicar en la muestra No. 1 que el punto de quiebre de la curva de demanda de cloro del ensayo No. 2 (Figura 19) corresponde a la dosis 5.5mg/L de cloro, para la cual se calcula una concentración de HOCl de 1.29mg/L y de OCl⁻ en 0.11mg/L.

Se observa que para un pH del agua de la piscina termal de 6.47, el porcentaje de HOCl y OCl⁻ en la muestra clorada fue de 92.1% y 7.9%, respectivamente.

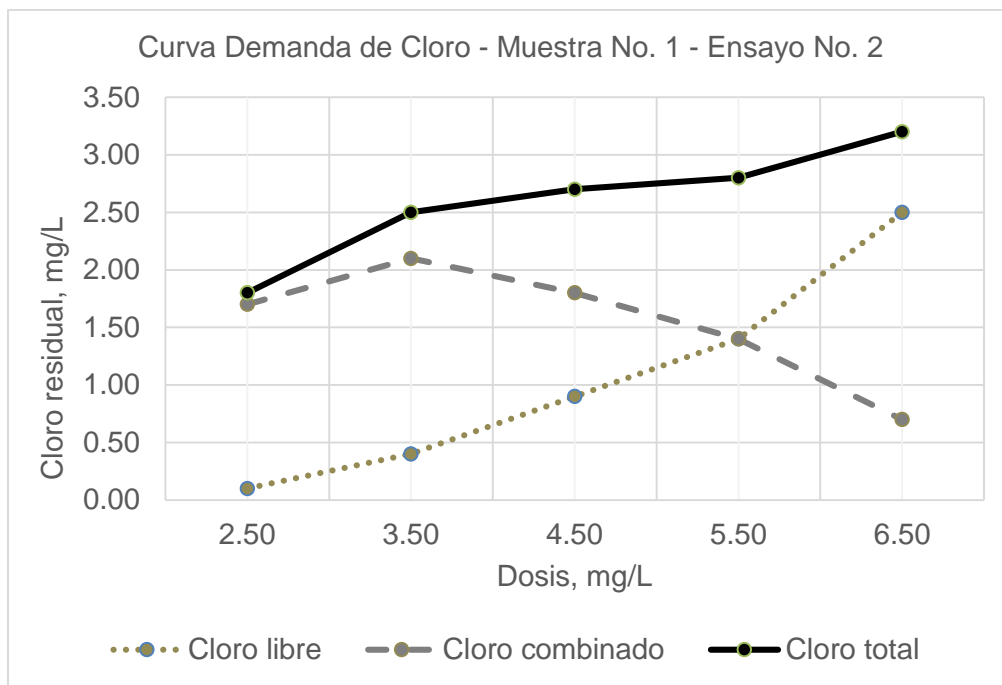


Figura 19. Curva demanda de cloro Muestra No. 1 – Ensayo No. 2

6.2.2 Muestra integrada No. 2 (tomada el 19 de mayo de 2019)

Caracterización microbiológica del agua cruda (pH 6.71)

Coliformes totales 280 UFC/100mL

Escherichia coli 0 UFC/100mL

En la Tabla 30, se recopilaron los dos ensayos de demanda de cloro para la muestra No. 2 con la eliminación de coliformes totales. Además, se muestran los resultados para el punto de quiebre de las curvas de demanda de cloro de las Figuras 20 y 21.

Tabla 30. Parámetros microbiológicos y fisicoquímico de la muestra No. 2

Dosis	Cloro Residual Libre	Cloro Residual Combinado	Coliformes Totales		HOCl	OCl ⁻
			UFC/100mL	% Eliminación		
1.00	0.10	0.90	5.0	98.2	0.09	0.01
2.00	0.20	1.70	9.0	96.8	0.17	0.03
3.00	0.30	2.30	10.0	96.4	0.26	0.04
4.00	0.60	2.50	3.0	98.9	0.52	0.08
5.00	1.20	1.10	6.0	97.9	1.04	0.16
6.00	2.00	1.10	0.0	100	1.74	0.26
7.00	3.00	0.50	2.0	99.3	2.61	0.39
8.00	3.80	0.60	0.0	100	3.31	0.49
9.00	4.30	0.80	6.0	97.9	3.74	0.56
10.00	5.30	0.50	0.0	100	4.61	0.69

Fuente. Autor

Se observa en la Tabla 30 que no existe tendencia en decrecer la eliminación de coliformes totales a medida que aumenta la concentración de cloro. Sin embargo, para las dosis en los puntos de quiebre como son 5.0 y 6.0mg/L de cloro, los porcentajes de eliminación de coliformes totales estuvieron entre un 97.9% y 100%. Cabe resaltar que el conteo de coliformes totales en el agua cruda estuvo en 280 UFC/100mL.

De acuerdo a los datos presentados en la Tabla 30 se puede indicar en la muestra No. 2 que el punto de quiebre de la curva de demanda de cloro del ensayo No. 3 (Figura 20) corresponde a la dosis 5.0mg/L de cloro para la cual se calcula una concentración de HOCl de 1.04mg/L y de OCl⁻ en 0.16mg/L.

Se observa que para un pH del agua de la piscina termal de 6.71, el porcentaje de HOCl y OCl⁻ en la muestra clorada fue de 86.6% y 13.4%, respectivamente.

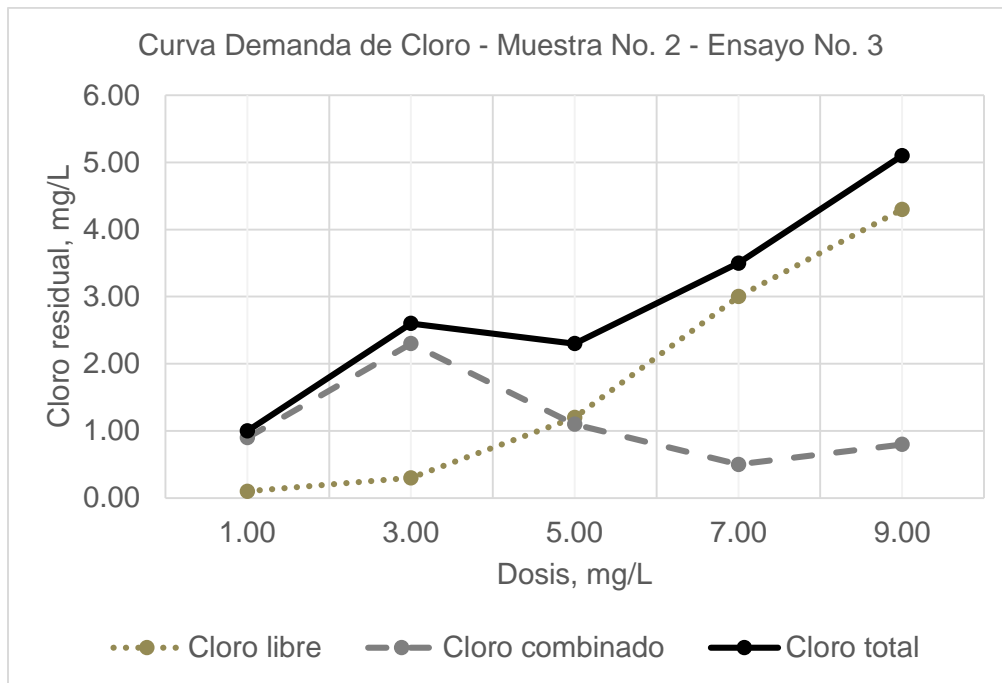


Figura 20. Curva demanda de cloro Muestra No. 2 – Ensayo No. 3

De acuerdo a los datos presentados en la Tabla 30 se puede indicar en la muestra No. 2 que el punto de quiebre de la curva de demanda de cloro del ensayo No. 4 (Figura 21) corresponde a la dosis 6.0mg/L de cloro para la cual se calcula una concentración de HOCl de 1.74mg/L y de OCl⁻ en 0.26mg/L.

Se observa que para un pH del agua de la piscina termal de 6.71, el porcentaje de HOCl y OCl⁻ en la muestra clorada fue de 87% y 13%, respectivamente.

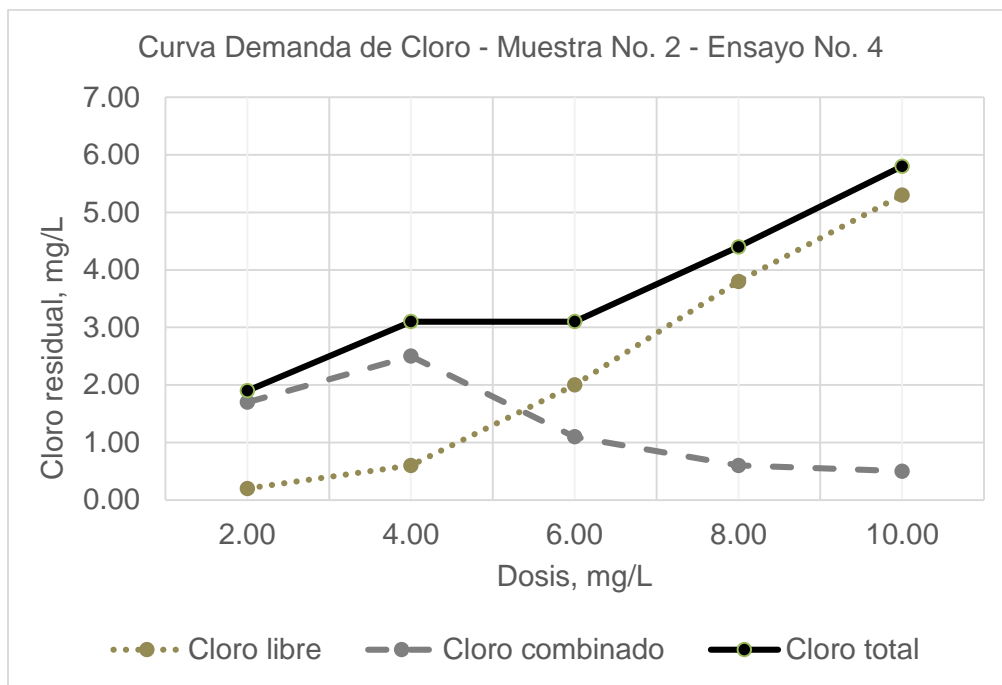


Figura 21. Curva demanda de cloro Muestra No. 2 – Ensayo No. 4

6.2.3 Muestra integrada No. 3 (tomada el 03 de junio de 2019)

Caracterización microbiológica del agua cruda (pH 6.73)

Coliformes totales 340 UFC/100mL

Escherichia coli 0 UFC/100mL

En la Tabla 31, se recopilaron los dos ensayos de demanda de cloro para la muestra No. 3 con la eliminación de coliformes totales. Además, se muestran los resultados para el punto de quiebre de las curvas de demanda de cloro de las Figuras 22 y 23.

La cantidad de coliformes totales en la muestra de agua cruda aumentaron, posiblemente por la visita de 100 bañistas el día anterior a la toma de muestra. Igualmente, no hubo presencia de *E. coli*.

Tabla 31. Parámetros microbiológicos y fisicoquímico de la muestra No. 3

Dosis	Cloro Residual Libre	Cloro Residual Combinado	Coliformes Totales		HOCl	OCl ⁻
			UFC/100mL	% Eliminación		
1.00	0.30	0.60	3.0	99.1	0.26	0.04
2.00	0.30	1.70	2.0	99.4	0.26	0.04
3.00	0.90	1.80	0.0	100	0.78	0.12
4.00	1.40	1.50	4.0	98.8	1.21	0.19
5.00	2.10	1.00	0.0	100	1.82	0.28
6.00	3.10	0.60	3.0	99.1	2.68	0.42
7.00	4.00	0.50	0.0	100	3.46	0.54
8.00	4.60	0.80	0.0	100	3.98	0.62
9.00	5.40	0.60	3.0	99.1	4.67	0.73
10.00	6.60	0.60	1.0	99.7	5.71	0.89

Fuente. Autor

Se observa en la Tabla 31 que no existe tendencia en decrecer la eliminación de coliformes totales a medida que aumenta la concentración de cloro. Sin embargo, para las dosis en los puntos de quiebre como son 5.0 y 6.0mg/L de cloro, los porcentajes de eliminación de coliformes totales estuvieron entre un 99% y 100%. Cabe resaltar que el conteo de coliformes totales en el agua cruda estuvo en 340 UFC/100mL.

De acuerdo a los datos presentados en la Tabla 31 se puede indicar en la muestra No. 3 que el punto de quiebre de la curva de demanda de cloro del ensayo No. 5 (Figura 22) corresponde a la dosis 5.0mg/L de cloro para la cual se calcula una concentración de HOCl de 1.82mg/L y de OCl⁻ en 0.28mg/L.

Se observa que para un pH del agua de la piscina termal de 6.73, el porcentaje de HOCl y OCl⁻ en la muestra clorada fue de 86.6% y 13.4%, respectivamente.

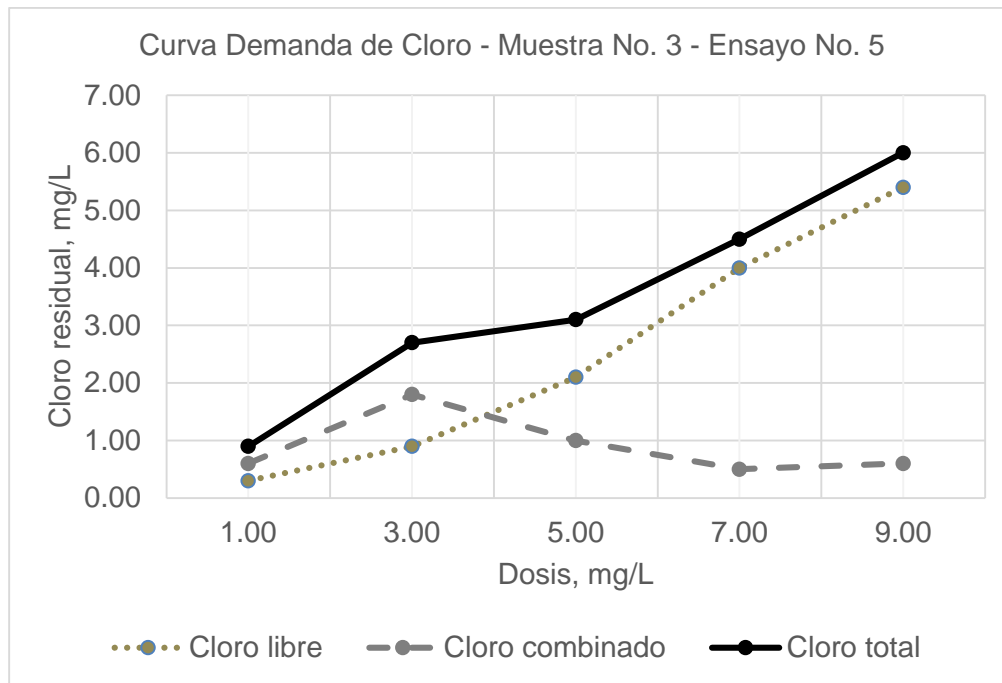


Figura 22. Curva demanda de cloro Muestra No. 3 – Ensayo No. 5

De acuerdo a los datos presentados en la Tabla 31 se puede indicar en la muestra No. 3 que el punto de quiebre de la curva de demanda de cloro del ensayo No. 6 (Figura 23) corresponde a la dosis 6.0mg/L de cloro para la cual se calcula una concentración de HOCl de 2.68mg/L y de OCl⁻ en 0.42mg/L.

Se observa que para un pH del agua de la piscina termal de 6.73, el porcentaje de HOCl y OCl⁻ en la muestra clorada fue de 86.4% y 13.6%, respectivamente.

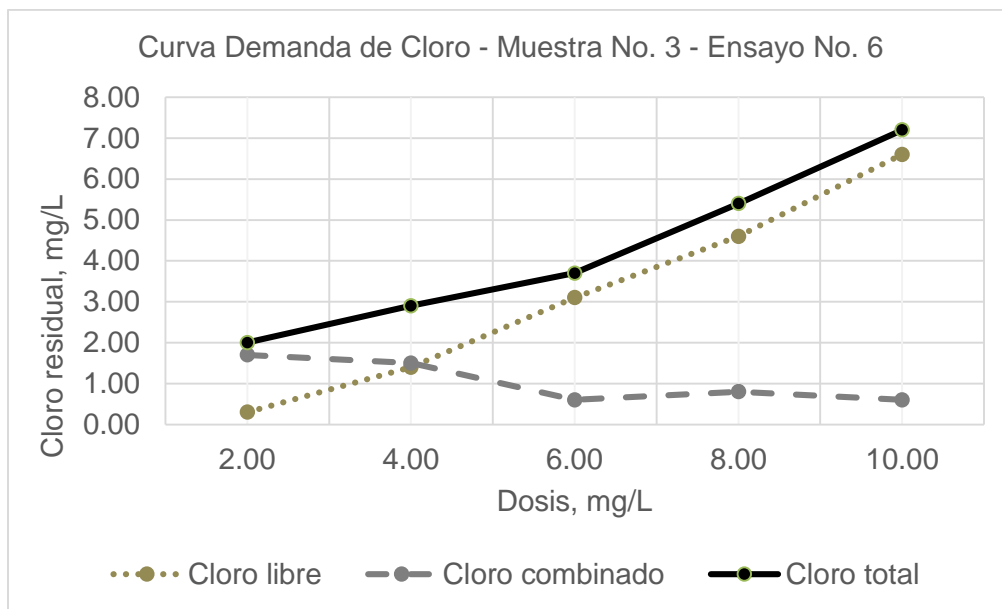


Figura 23. Curva demanda de cloro Muestra No. 3 – Ensayo No. 6

6.2.4 Muestra integrada No. 4 (tomada el 08 de junio de 2019)

Caracterización microbiológica del agua cruda (pH 6.08)

Coliformes totales 50 UFC/100mL

Escherichia. coli 0 UFC/100mL

En la Tabla 32, se recopilieron los dos ensayos de demanda de cloro para la muestra No. 4 con la eliminación de coliformes totales. Además, se muestran los resultados para el punto de quiebre de las curvas de demanda de cloro de las Figuras 24 y 25.

Tabla 32. Parámetros microbiológicos y fisicoquímico de la muestra No. 4

Dosis	Cloro Residual Libre	Cloro Residual Combinado	Coliformes Totales		HOCl	OCl ⁻
	mg/L Cl ₂	mg/L Cl ₂	UFC/100mL	% Eliminación	mg/L	mg/L
1.00	0.20	0.70	2.0	96	0.19	0.01
2.00	0.30	1.80	0.0	100	0.29	0.01
3.00	0.70	2.00	3.0	94	0.68	0.02
4.00	2.70	0.40	1.0	98	2.61	0.09
5.00	2.40	0.90	3.0	94	2.32	0.08
6.00	3.30	0.70	1.0	98	3.19	0.11
7.00	4.10	0.50	2.0	96	3.96	0.14
8.00	5.10	0.50	1.0	98	4.93	0.17
9.00	5.60	0.60	3.0	94	5.41	0.19
10.00	6.80	0.70	1.0	98	6.57	0.23

Fuente. Autor

Para éste ensayo, el conteo de coliformes totales en agua cruda fue de 50 UFC/100mL. La poca presencia de coliformes totales y la no presencia de *E. coli* puede atribuirse al mantenimiento de la piscina realizado dos (2) días antes de la toma de muestra. En éste mantenimiento, se desocupó la piscina y se lavaron paredes y piso con detergente. Por otro lado, las dosis de cloro entre 5.0 y 6.0mg/L que corresponden al punto de quiebre, para las cuales se observa un porcentaje de eliminación de coliformes totales entre 94% y 98%.

De acuerdo a los datos presentados en la Tabla 32 se puede indicar en la muestra No. 4 que el punto de quiebre de la curva de demanda de cloro del ensayo No. 7 (Figura 24) corresponde a la dosis 5.0mg/L de cloro para la cual se calcula una concentración de HOCl de 2.32mg/L y de OCl⁻ en 0.08mg/L.

Se observa que para un pH del agua de la piscina termal de 6.08, el porcentaje de HOCl y OCl⁻ en la muestra clorada fue de 96.7% y 3.3%, respectivamente.

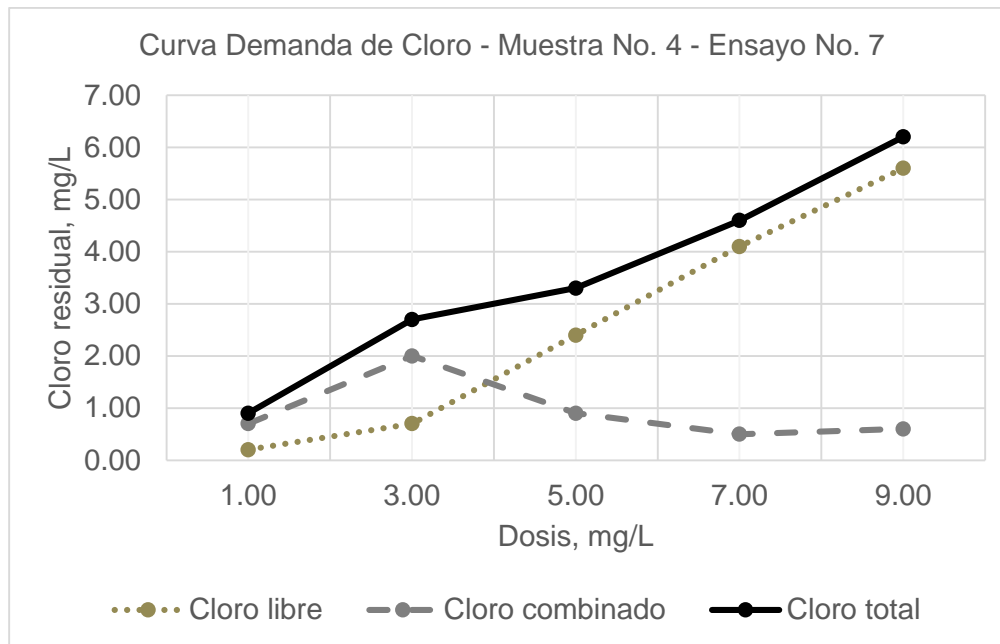


Figura 24. Curva demanda de cloro Muestra No. 4 – Ensayo No. 7

De acuerdo a los datos presentados en la Tabla 32 se puede indicar en la muestra No. 4 que el punto de quiebre de la curva de demanda de cloro del ensayo No. 8 (Figura 25) corresponde a la dosis 6.0mg/L de cloro para la cual se calcula una concentración de HOCl de 3.19mg/L y de OCl⁻ en 0.11mg/L.

Se observa que para un pH del agua de la piscina termal de 6.08, el porcentaje de HOCl y OCl⁻ en la muestra clorada fue de 96.7% y 3.3%, respectivamente.

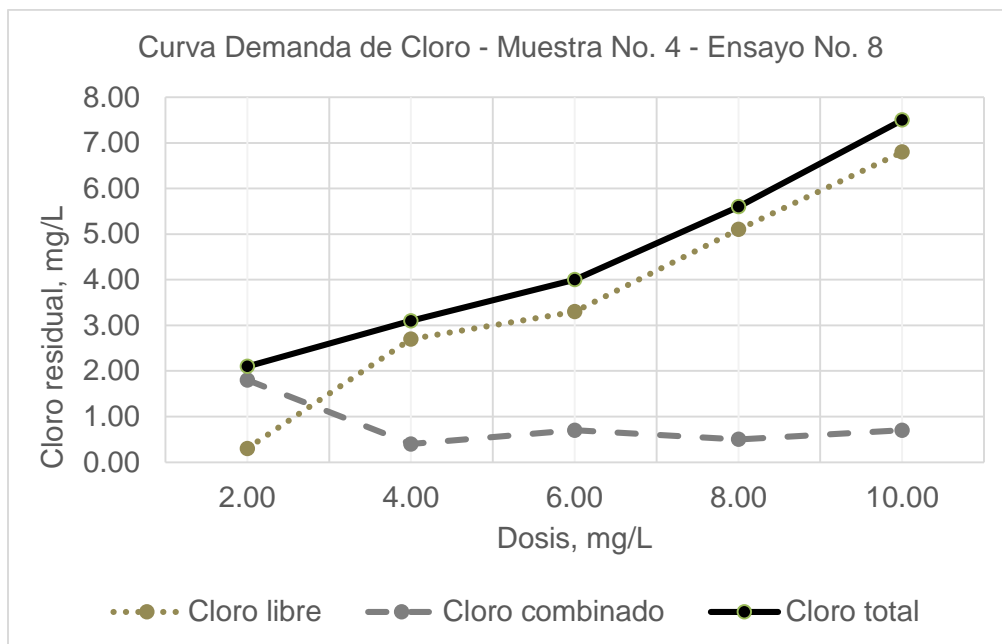


Figura 25. Curva demanda de cloro Muestra No. 4 – Ensayo No. 8

6.2.5 Muestra integrada No. 5 (tomada el 23 de junio de 2019)

Caracterización microbiológica del agua cruda (pH 6.85)

Coliformes totales 410 UFC/100mL

Escherichia. coli 40 UFC/100mL

En la Tabla 33, se recopilaron los dos ensayos de demanda de cloro para la muestra No. 5 con la eliminación de coliformes totales y *Escherichia coli*. Además, se muestran los resultados para el punto de quiebre de las curvas de demanda de cloro de las Figuras 26 y 27.

Tabla 33. Parámetros microbiológicos y fisicoquímico de la muestra No. 5

Dosis	Cloro Residual Libre	Cloro Residual Combinado	Coliformes Totales		<i>Escherichia coli</i>		HOCl	OCl ⁻
	mg/L Cl ₂	mg/L Cl ₂	UFC/100mL	% Eliminación	UFC/100mL	% Eliminación		
1.00	0.20	0.80	8.0	98	0.0	100	0.17	0.03
2.00	0.30	1.50	4.0	99	0.0	100	0.25	0.05
3.00	0.30	2.50	4.0	99	0.0	100	0.25	0.05
4.00	0.60	2.60	2.0	99.5	1.0	97.5	0.50	0.10
5.00	0.90	2.10	3.0	99.3	0.0	100	0.75	0.15
6.00	1.70	1.10	3.0	99.3	0.0	100	1.41	0.29
7.00	2.40	0.80	1.0	99.8	0.0	100	1.99	0.41
8.00	3.30	0.60	3.0	99.3	0.0	100	2.74	0.56
9.00	3.90	0.70	1.0	99.8	0.0	100	3.24	0.66
10.00	4.70	0.70	1.0	99.8	0.0	100	3.90	0.80

Fuente. Autor

Para éste ensayo el conteo de coliformes totales en agua cruda fue de 410 UFC/100mL y de *Escherichia coli* de 40 UFC/100mL. Así mismo, en las dosis de cloro entre 6.0 y 7.0mg/L que corresponden al punto de quiebre, vemos un porcentaje de eliminación de coliformes totales entre 99.3% y 99.8%. Igualmente, el porcentaje de eliminación de *Escherichia coli* para las dosis del punto de quiebre fueron del 100%.

De acuerdo a los datos presentados en la Tabla 33 se puede indicar en la muestra No. 5 que el punto de quiebre de la curva de demanda de cloro del ensayo No. 9 (Figura 26) corresponde a la dosis 7.0mg/L de cloro para la cual se calcula una concentración de HOCl de 1.99mg/L y de OCl⁻ en 0.41mg/L.

Se observa que para un pH del agua de la piscina termal de 6.85, el porcentaje de HOCl y OCl⁻ en la muestra clorada fue de 79.1% y 20.9%, respectivamente.

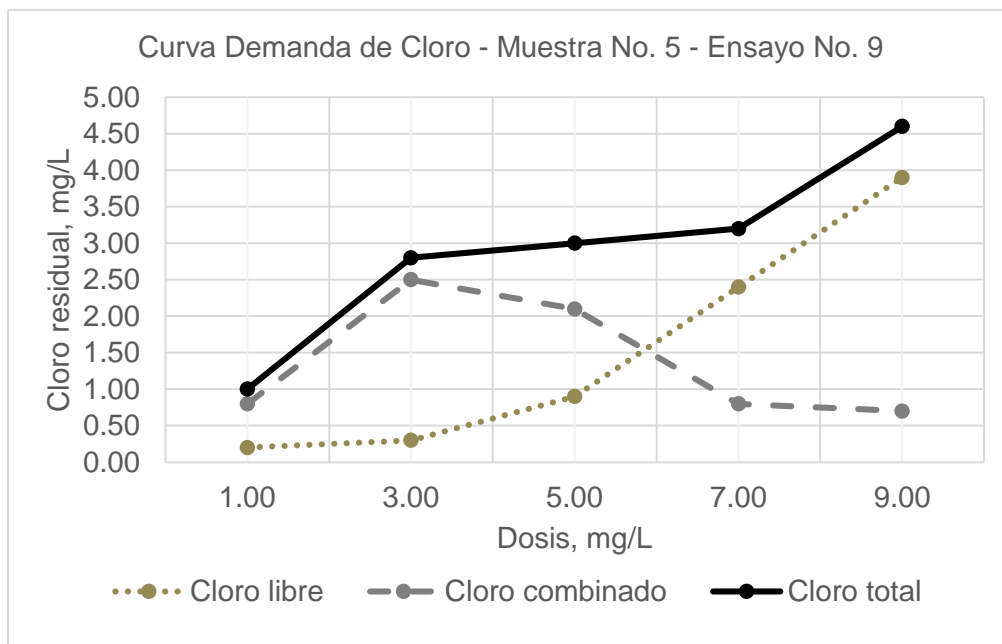


Figura 26. Curva demanda de cloro Muestra No. 5 – Ensayo No. 9

De acuerdo a los datos presentados en la Tabla 33 se puede indicar en la muestra No. 5 que el punto de quiebre de la curva de demanda de cloro del ensayo No. 10 (Figura 27) corresponde a la dosis 6.0mg/L de cloro para la cual se calcula una concentración de HOCl de 1.41mg/L y de OCl⁻ en 0.29mg/L.

Se observa que para un pH del agua de la piscina termal de 6.85, el porcentaje de HOCl y OCl⁻ en la muestra clorada fue de 82.9% y 17.1%, respectivamente.

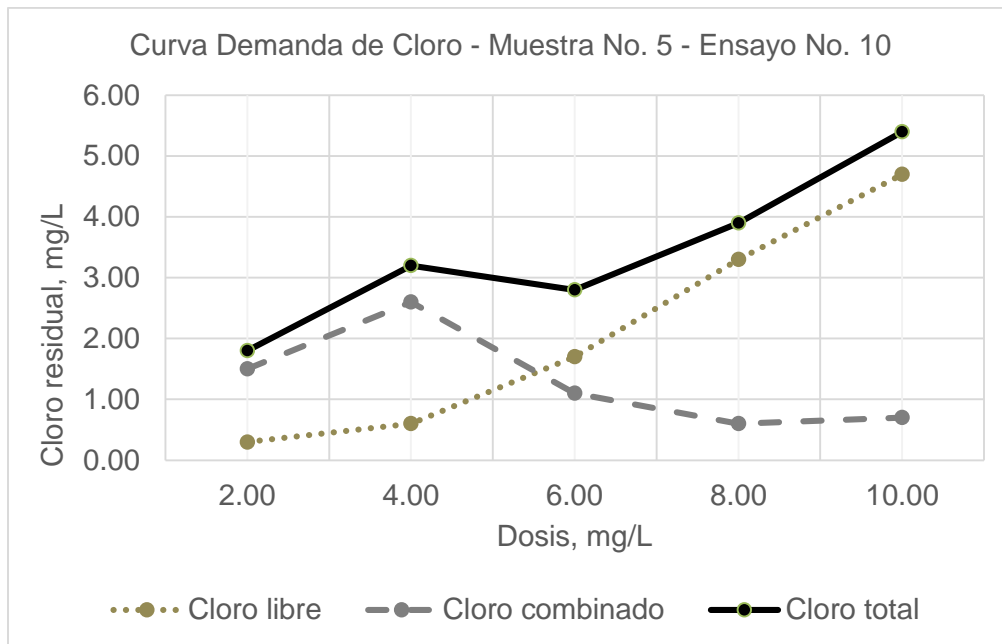


Figura 27. Curva demanda de cloro Muestra No. 5 – Ensayo No. 10

6.2.6 Análisis normativo con los parámetros microbiológicos del agua clorada

A continuación, se presenta la comparación de las concentraciones máximas y mínimas de coliformes totales y *E. coli* de las muestras de agua tratada mediante cloración para los puntos de quiebre, y la relación con los parámetros microbiológicos de las normas consultadas (Ver Tabla 34).

Tabla 34. Comparación microbiológica del agua clorada con la normatividad

PARAMETRO	UND	Agua Clorada. Valores Máximos					Decreto No. 55/1997 España	Real Decreto 742/2013 España	Decreto 209/2002 Chile	OMS 2006	Decreto Supremo 015-2015 Perú	Decreto 35309-S Costa Rica
		Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Muestra No. 4	Muestra No. 5						
<i>Escherichia coli</i>	UFC/100mL	0	0	0	0	0	0	0	0	< 1.0	0	0
Coliformes totales	UFC/100mL	0	6	3	3	3	0	0	< 20	0	< 1000 NMP/100mL	N.A.
PARAMETRO	UND	Agua Clorada. Valores Mínimos					Decreto No. 55/1997 España	Real Decreto 742/2013 España	Decreto 209/2002 Chile	OMS 2006	Decreto Supremo 015-2015 Perú	Decreto 35309-S Costa Rica
		Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3	Muestra No. 4	Muestra No. 5						
<i>Escherichia coli</i>	UFC/100mL	0	0	0	0	0	0	0	0	< 1.0	0	0
Coliformes totales	UFC/100mL	0	0	0	1	1	0	0	< 20	0	< 1000 NMP/100mL	N.A.

De la Tabla 34 podemos observar que cumple el parámetro de *Escherichia coli* en todas las normas consultadas. Sin embargo, para coliformes totales el valor máximo de la Tabla 34 cumple únicamente el Decreto 209/2002 de Chile. De otro lado, vemos que el valor mínimo de coliformes totales en las muestras No. 1, 2 y 3 cumple las normas consultadas.

6.3 Análisis entre la dosis de cloro y los resultados del tratamiento

A continuación, se muestra el análisis comparativo entre las dosis de cloro aplicadas en las cinco (5) muestras versus el número de colonias encontradas en el agua cruda y agua tratada.

En la Figura 28, se observa que la muestra No. 1 solo presentó coliformes totales con una concentración de 50 UFC/100mL en agua cruda, y un máximo de 1 UFC/100mL después del tratamiento con cloro. Para las dosis del punto de quiebre, no hubo conteo de coliformes totales.

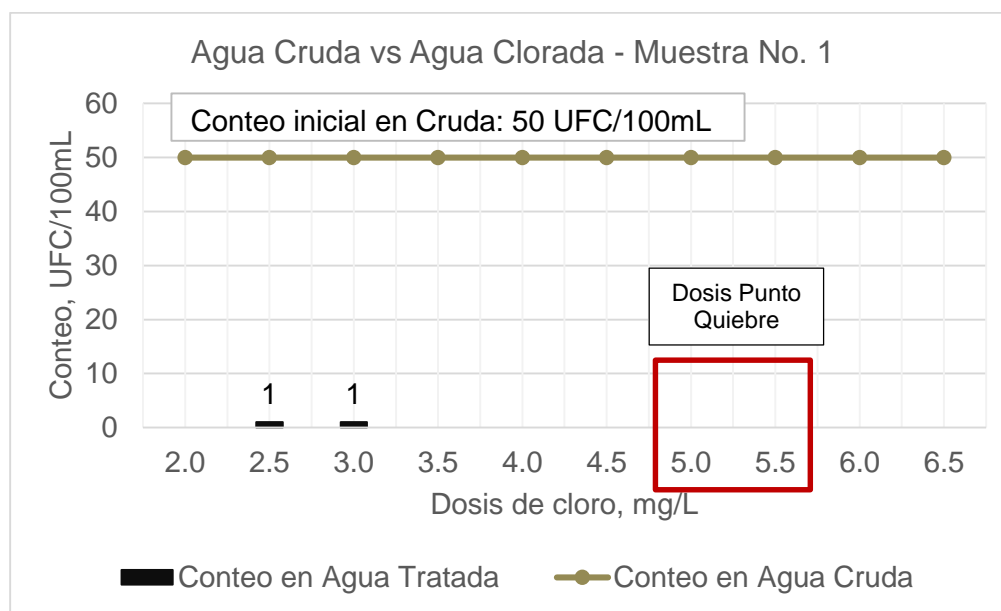


Figura 28. Agua cruda vs agua clorada en muestra No. 1

En la Figura 29, se observa que la muestra No. 2 solo presentó coliformes totales con una concentración de 280 UFC/100mL en agua cruda, y un máximo de 10 UFC/100mL después del tratamiento con cloro. Para las dosis del punto de quiebre, se tuvo en el primer ensayo un valor de 6 UFC/100mL y para el segundo ensayo un valor de 0 UFC/100mL.

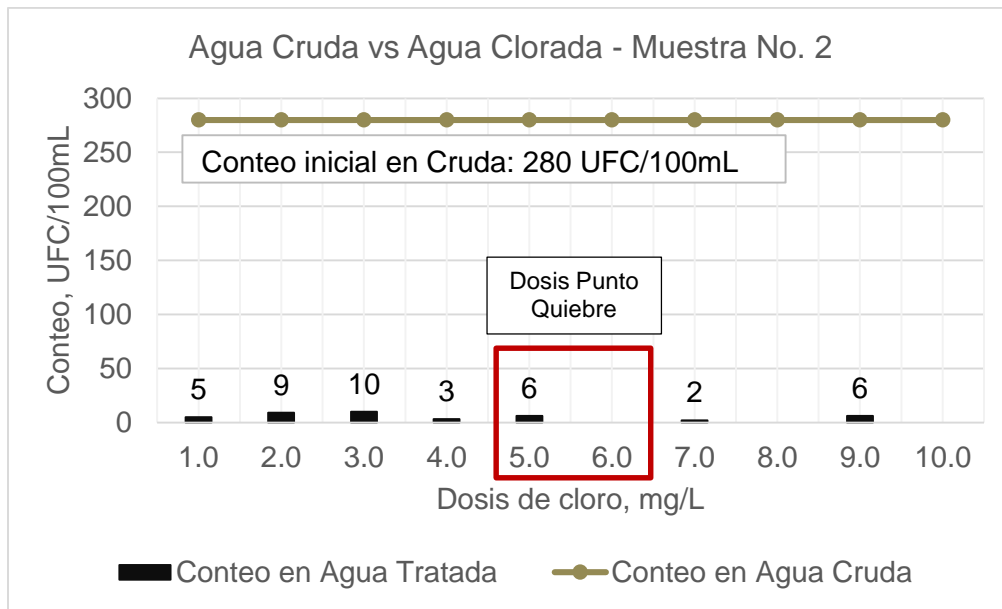


Figura 29. Agua cruda vs agua clorada en muestra No. 2

En la Figura 30, la muestra No. 3 solo presentó coliformes totales con 340 UFC/100mL en agua cruda, presentando un máximo de 4 UFC/100mL después del tratamiento con cloro. Para las dosis del punto de quiebre, se tuvo en el primer ensayo un valor de 0 UFC/100mL y para el segundo ensayo un valor de 3 UFC/100mL.

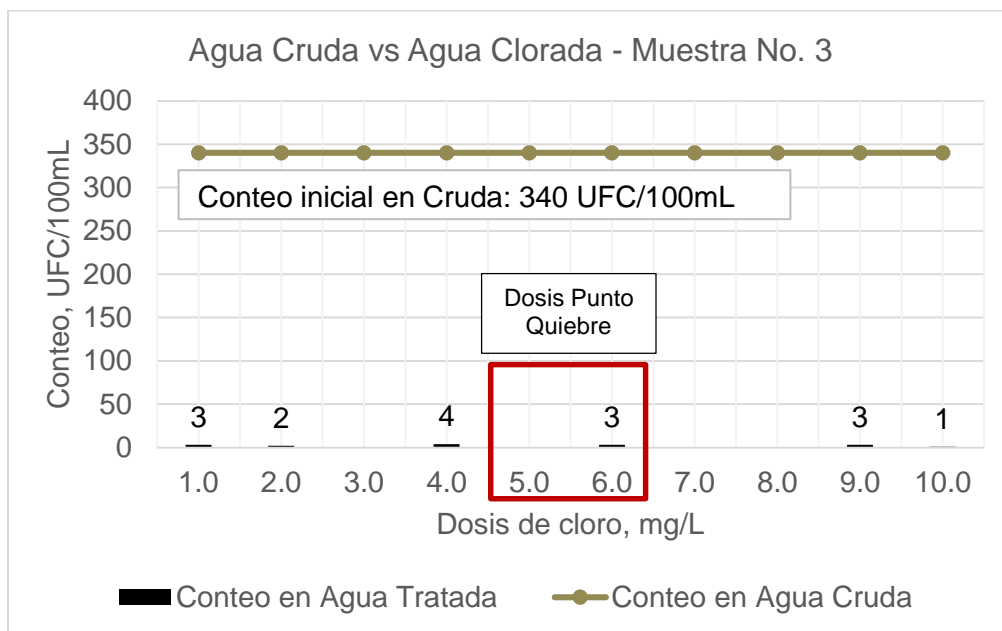


Figura 30. Agua cruda vs agua clorada en muestra No. 3

En la Figura 31, la muestra No. 4 solo presentó coliformes totales con 50 UFC/100mL en agua cruda y un máximo de 3 UFC/100mL después del tratamiento con cloro. Para las dosis del punto de quiebre, se tuvo en el primer ensayo un valor de 3 UFC/100mL y para el segundo ensayo un valor de 1 UFC/100mL.

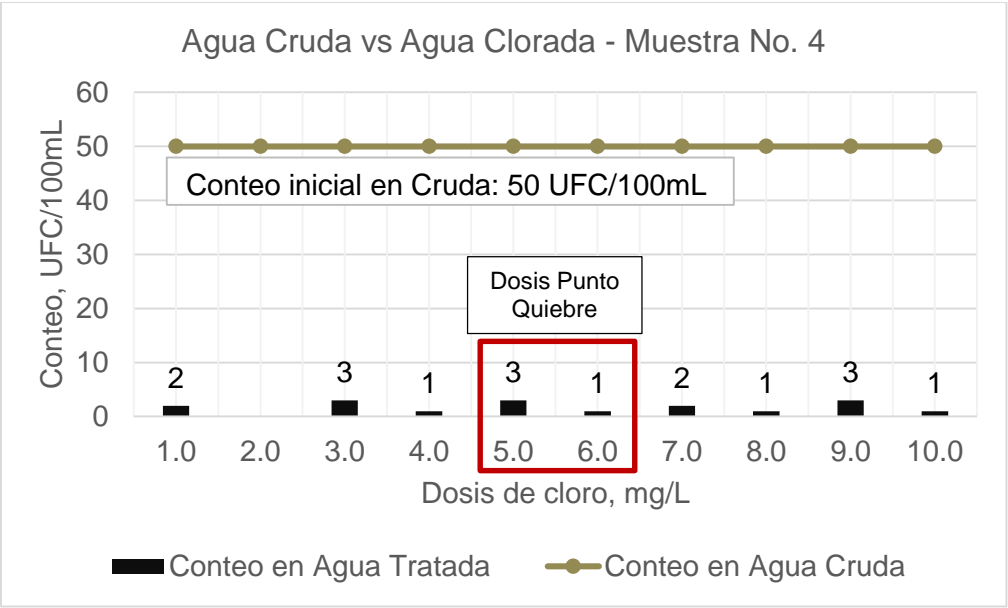


Figura 31. Agua cruda vs agua clorada en muestra No. 4

En la Figura 32, se muestran los resultados para coliformes totales con 410 UFC/100mL en agua cruda, con un máximo de 8 UFC/100mL después del tratamiento con cloro. Para las dosis del punto de quiebre, se tuvo en el primer ensayo un valor de 1 UFC/100mL y para el segundo ensayo un valor de 3 UFC/100mL.

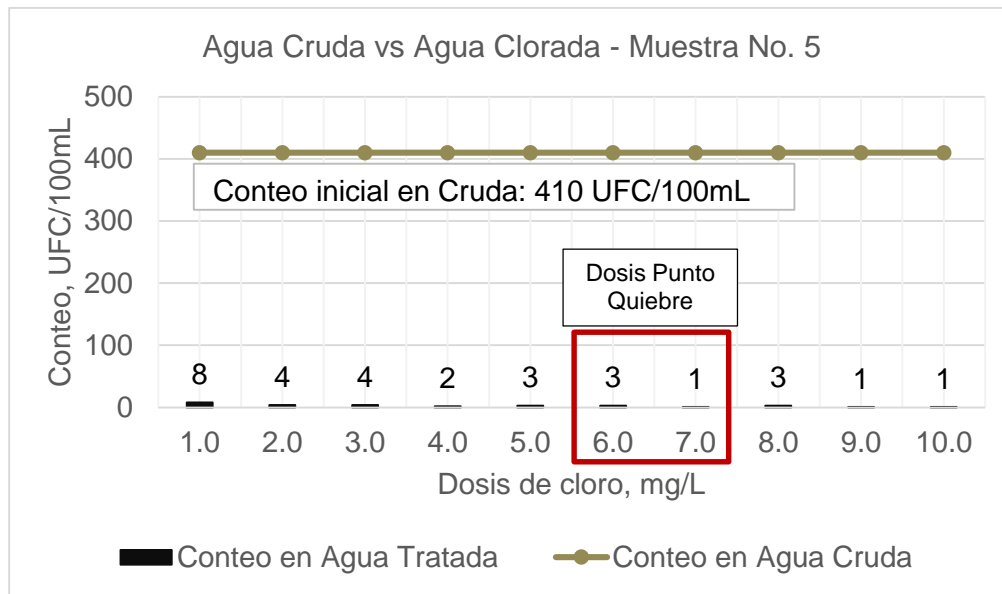


Figura 32. Agua cruda vs agua clorada en muestra No. 5

En la Figura 33, el agua cruda de la muestra No. 5 fue la única que presentó *Escherichia coli* con un conteo de 40 UFC/100mL. El tratamiento con cloro fue muy efectivo en la eliminación del *E. coli*, obteniendo en una sola de las dosis de cloro aplicadas un conteo posterior de 1 UFC/100mL y ausencia de *E. coli* para las dosis del punto de quiebre.

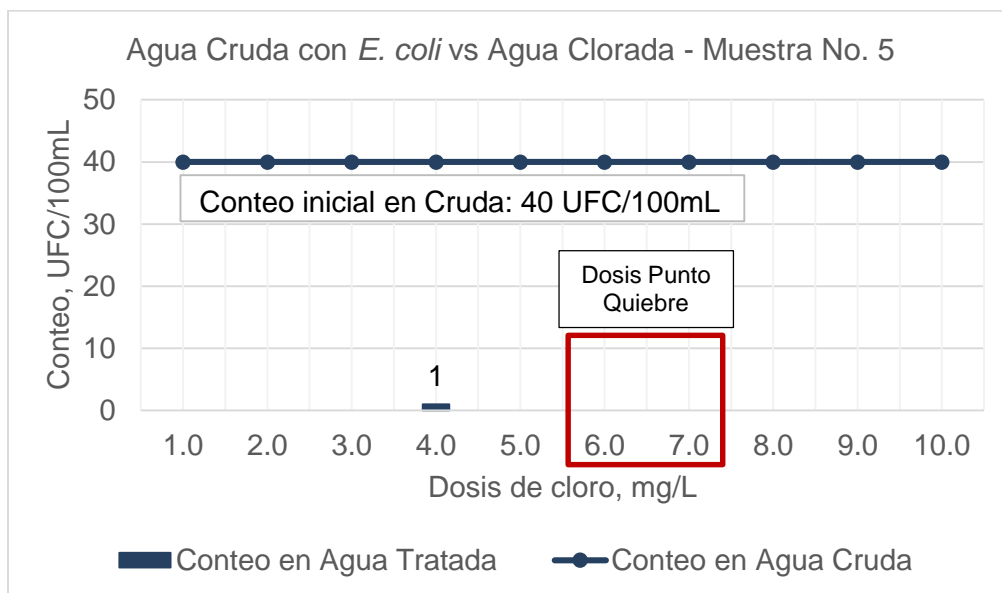


Figura 33. Agua cruda con *E. coli* vs agua clorada en muestra No. 5

CAPITULO 7. CONCLUSIONES

- En general los parámetros fisicoquímicos del agua de la piscina termal como turbiedad, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, pH y temperatura estuvieron dentro de los límites de las normas consultadas.
- La alta concentración de oxígeno disuelto en la piscina termal se puede atribuir a la forma de suministro de agua a la piscina mediante cuatro chorros en caída libre, permitiendo la transferencia de oxígeno de la atmósfera al estanque.
- El 100% de las muestras de agua tomadas en la piscina termal presentaron coliformes totales, con un valor mínimo de 50 UFC/100mL y un valor máximo de 410 UFC/100mL.
- En el 80% de las muestras de la piscina termal no hubo presencia de *Escherichia coli*; ésta solo se detectó en la última muestra de agua, con una concentración de 40 UFC/100mL.
- Se presume que la contaminación del agua con *Escherichia coli* fue debido al aumento en el número de bañistas el día anterior y en el momento de la toma de muestra.
- La caracterización microbiológica del agua cruda en la piscina termal, superó los límites permitidos por el Decreto No. 55/1997 de España, el Real Decreto 742/2013 de España, el Decreto 209/2002 de Chile, la Organización Mundial de la Salud, el Decreto Supremo 015-2015 de Perú y el Decreto 35309-S de Costa Rica.
- Al contar con un mayor número de bañistas en la piscina termal, los parámetros como nitrógeno amoniacal y conductividad eléctrica aumentaron sus concentraciones, mientras que para oxígeno disuelto su concentración disminuyó.
- Dada la ausencia de normatividad referente a calidad de agua en piscinas termales en nuestro país, se destaca que es necesario establecer los valores máximos aceptables para los diferentes parámetros microbiológicos y fisicoquímicos, con el fin de que los diversos sectores tengan como referencia y puedan demostrar comparativamente el cumplimiento normativo, evitando así, posibles riesgos a la salud humana.
- Una alternativa para la desinfección de piscinas termales mediante cloración podría ser a través de un equipo dosificador con solución de hipoclorito de calcio. Éste equipo estaría conectado a la red que suministra el agua caliente a la piscina para que se produzca la desinfección dentro de ella, eliminando así, los organismos patógenos.

- Al ser el agua cruda de la piscina termal con un pH < 7.0 la reacción del cloro en el agua obtendrá predominantemente ácido hipocloroso HOCl, el cual es 80 a 100 veces más efectivo que el ion hipoclorito OCl⁻.
- Se pudo correlacionar que para cuando el pH del agua cruda es alto el porcentaje de HOCl en las dosis del punto de quiebre eran bajos; mientras que para cuando el pH del agua cruda era bajo el porcentaje de HOCl en las dosis del punto de quiebre eran altos.
- Los puntos de quiebre determinados en los ensayos de demanda de cloro están en un rango entre 5.0 y 7.0mg/L de cloro, con una efectividad promedio de remoción de coliformes totales de 98.8%.
- La única muestra que presentó *Escherichia coli* fue en la No. 5, donde la cloración tuvo una eficiencia de remoción del 100% en las dosis del punto de quiebre.
- La caracterización microbiológica del agua clorada en la piscina termal cumplió la exigencia de ausencia de *Escherichia coli* establecida en todas las normas consultadas. Sin embargo, la presencia de coliformes totales en el agua clorada con un conteo máximo de 6 UFC/100mL, cumple únicamente con la normativa chilena (Decreto 209/2002).
- Se recomienda estudiar en el agua tratada, los compuestos derivados que se pueden generar por la cloración, como son ácidos acéticos halogenados y trihalometanos.
- Así mismo, se debe analizar el cambio del pH luego de tratar con cloro, validando que se encuentre dentro de los rangos aceptados por la normatividad.

REFERENCIAS

- Alfaro V., C., Aguirre C., A., Bernal C., N., & Gokcen, G. (2003). *Inventario de Fuentes Termales del Departamento de Cundinamarca*. Bogotá: Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear INGEOMINAS.
- American Water Works Association. (2005). *Basic Chemistry for Water and Wastewater Operators*. United States of America: American Water Works Association.
- Avendaño Sánchez, A. (2016). *Calidad Microbiológica de un Agua Termal*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Bešić, A., Obradović, Z., Dautbegović, A., & Obradović, A. (2017). The effect of temperature and chlorine residual on the presence of *Legionella* spp . in water systems of public and tourist facilities. *Journal of Health Sciences*, 50-58.
- Blanco, J. (2012). Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica. *Elsevier Doyma*, 30(2), 84 - 89. doi:10.1016/J.eimc.2011.09.008
- Burbano O., N., Pasquel S., E., & Becerra P., S. (2013). *Aguas Termominerales en el Ecuador*. Quito: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología INAMHI. Obtenido de <https://issuu.com/inamhi/docs/termalismo>
- Cancillería de Sanidad y Servicios Sociales. (2001). *Orden de 5 de noviembre de 1996 por la que se regula la autorización sanitaria de los establecimientos balnearios de la Comunidad Autónoma de Galicia*. Galicia: Cancillería de Sanidad y Servicios Sociales. Recuperado el 12 de 09 de 2019
- Chivatá López, N. (2017). *Determinación de Presencia de Pseudomonas Aeruginosa y Medidas de Control en Aguas Termales*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Condori Mendoza, C., & Guillen Merino, E. (2018). *Contaminación de las Aguas Termales de la Piscina con Coliformes Fecales y Totales en el Barrio San Cristobal*,

Huancavelica. Huancavelica, Perú: Universidad Nacional de Huancavelica. Recuperado el 2016

Consejería de Sanidad. (2007). *Orden de 29-01-2007, de la Consejería de Sanidad, de los requisitos técnico-sanitarios de los centros y servicios de hidrología y de hidroterapia*. España: Consejería de Sanidad. Recuperado el 13 de 09 de 2019, de <https://cs.jccm.es/LegisPublic/AbrirFicheroNorma.jsp?numeroFichero=407>

Consejería de Sanidad y Política Social. (1997). *Decreto No. 55/1997, de 11 de julio, sobre condiciones sanitarias de balnearios, baños termales y establecimientos de Talasoterapia y de aplicaciones de Peloides*. Murcia, España: Consejería de Sanidad y Política Social. Obtenido de <http://www.exfiles.murciasalud.es/recursos/ficheros/45436-Borm1997-N172-P8677-Marginal10482.pdf>

Corral Lledó, M. d., LLanos, M. A., & López Geta, J. A. (2006). Análisis Sobre la Normativa de las Aguas Minero-Medicinales. Posibles Tratamientos. *Revista de la Salud Ambiental*, 6(1-2), 69 - 72.

Faleiro Naves, P. L. (2010). *Formación de biopelículas por Escherichia coli y su correlación con factores de virulencia: Prevención y actividad de antimicrobianos frente a organismos planctónicos y asociados a biopelículas*. Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid. Obtenido de <https://eprints.ucm.es/9780/1/T31422.pdf>

González González, M. I., García Melían, M., & Mariné Alonso, M. d. (2014). Importancia Sanitaria de Pseudomonas aeruginosa en agua de hemodiálisis y su desinfección. *40(2)*, 201 - 214. Recuperado el 11 de 09 de 2019, de <http://scielo.sld.cu/pdf/rcsp/v40n2/spu05214.pdf>

Gualpa Uvidia, S. M. (2016). *Estudio microbiológico de las Aguas Termales del Balneario Cununyacu Ubicado en las Faldas Noroccidentales del Cerro Ilaló de la Parroquia Tumbaco Perteneciente ala Provincia de Pichincha*. Riobamba, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Guía de buenas prácticas termales. (2007). *Sindicato Nacional de Médicos de las Estaciones Termales, Marinas y Climáticas de Francia, Vol. 2*(ISSN: 1887-0813), 95 - 150.

Hernández Romero, J. A. (2018). *Calidad Sanitaria de un Agua Termal*. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

ICONTEC, I. C. (1995). *NTC-ISO 5667-2*. Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).

Inventario Nacional de Manifestaciones Hidrotermales. (17 de 09 de 2019). Obtenido de <http://hidrotermales.sgc.gov.co/invtermales/>

Jurado Herrera, R. J., & Astudillo Ramírez, M. J. (2008). *Análisis técnico comparativo entre los tratamientos convencionales y tratamientos electroquímicos, en el mantenimiento del agua de piscina de uso doméstico residencial y/o público comercial*. Guayaquil, Ecuador: Universidad de Guayaquil.

Lim, E., Koo, O., kim, M.-J., & kim, J.-S. (09 de July de 2019). Bio-enzymes for Inhibition and Elimination of Escherichia coli O157:H7 Biofilm and their Synergistic Effect with Sodium Hypochlorite. *Scientific Reports*, 1 - 10. Recuperado el 11 de Sept de 2019, de <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46363-w>

Metcalf and Eddy. (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery* (5 ed.). New York, United States of America: Mc Graw Hill Education.

Milagro Montero, M. (2012). *Pseudomonas aeruginosa multiresistente: aspectos epidemiológicos, clínicos y terapéuticos*. Barcelona: Universidad Autónoma de Barcelona.

Ministerio de Ambiente. (2015). *Decreto Supremo No. 015-2015-MINAM*. Perú: Ministerio de Ambiente. Obtenido de <http://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-015-2015-minam/>

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Decreto 1076 de 2015*. Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Recuperado el 30 de 09 de 2019
- Ministerio de Salud. (2002). *Reglamento de Piscinas de Uso Público. Decreto 209, 05 de julio de 2002*. Chile: Ministerio de Salud. Obtenido de https://ciperchile.cl/pdfs/01-2013/sanalfonsodelmar/DTO-209_08-NOV-2003.pdf
- Ministerio de Salud. (2009). *Decreto No. 35309-S del 30 de marzo*. Costa Rica: Ministerio de Salud. Obtenido de <http://www.labmicrotec.com/wp-content/uploads/2016/02/Reglamento-Piscinas-1.pdf>
- Ministerio de Salud Pública. (2002). *NC 93-09:85 y NC 93-28:88. Localizador de información en salud*. Cuba: Ministerio de Salud Pública. Obtenido de <http://files.sld.cu/sida/files/2012/01/prog-cont-sanit-agua.pdf>
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2015). *Decreto No. 0554 de 2015. Piscinas de uso colectivo abiertas al público en general*. Colombia: Ministerio de Salud y Protección Social.
- Ministerio de Sanidad, S. S. (2013). *Real Decreto 742 de 2013, del 27 de septiembre*. España: Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad.
- Ortega Holguín, M. E., & Tinoco Mejía, Y. A. (2017). *Estudio de la Calidad Físicoquímica y Bacteriológica del Agua en Parques Acuáticos*. Guayaquil, Ecuador: Universidad de Guayaquil.
- Ortega Maján, M. T. (2016). *Efectos de la balneoterapia con aguas minero-medicinales sobre la salud*. Zaragoza: Universidad de Zaragoza. Obtenido de <https://zaguan.unizar.es/record/48114/files/TESIS-2016-074.pdf>
- P. Nataro, J., & B. Kaper, J. (1998). *Diarrheagenic Escherichia coli* (Vol. 11). Baltimore, Maryland: American Society for Microbiology.

- Pécastaings, S., Dubourg, K., & Roques, C. (2009). Évaluation de L'efficacité de Techniques de Désinfection Utilisées en Milieu Thermal sur un Réseau D'eau Minérale Naturelle Pilote. (146: 19-29).
- Programa de Transformación Productiva. (4 de Diciembre de 2014). *Colombia aprende de España sobre termalismo para aumentar turismo*. Recuperado el 19 de Abril de 2018, de <https://www.ptp.com.co/contenido/contenido.aspx?catID=1&conID=1108>
- Ramirez Flores, L. A. (2016). *Contaminación Bacteriológica por Coliformes Totales, Coliformes Fecales, Escherichia coli y Salmonella sp. en Aguas Termales de Alcance Turístico de la Región San Martín*. Tarapoto, San Martín, Perú: Universidad Nacional de San Martín.
- RAS, R. T. (2010). *Titulo C. Sistemas de Potabilización*. Bogotá: Ministerio de Vivienda.
- Ríos Tobón, S., Gutiérrez Builes, L., & Agudelo Cadavid, R. (15 de 02 de 2017). Patógenos e Indicadores Microbiológicos de Calidad del Agua para Consumo Humano. *Facultad Nacional de Salud Pública, Vol. 35, 236 - 247*. doi:10.17533/udea.rfnsp.v35n2a08
- Romero Rojas, J. A. (2013). *Calidad del Agua* (3 ed.). Bogotá, Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Romero Rojas, J. A. (2016). *Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y principios de diseño* (3 ed.). Bogotá, Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Servicio Geológico Mexicano. (22 de Marzo de 2017). *SGM Servicio Geológico Mexicano*. Obtenido de <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Tectonica-de-placas.html>
- SMWW. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. United States of America: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.

Williams, M. M., & Braun-Howland, E. B. (2003). Growth of *Escherichia coli* in Model Distribution System Biofilms Exposed to Hypochlorous Acid or Monochloramine. *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 69(9), 5463 - 5271. doi:10.1128/AEM.69.9.5463-5271.2003

World Health Organization. (2006). *Guidelines for safe recreational water environments. Volume 2: Swimming Pools and Similar Environments*. Obtenido de https://www.who.int/water_sanitation_health/bathing/srwe2full.pdf