



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

Facultad de Estudios Superiores Zaragoza



PROPUESTA DE MEJORAS DEL
SISTEMA DE DESINFECCIÓN DE
AGUA POTABLE EN CIUDAD
UNIVERSITARIA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:

GERMÁN CASTRO HERNÁNDEZ

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. MARÍA TERESA ORTA LEDESMA

ASESOR TÉCNICO DE TESIS:

DR. IGNACIO MONJE RAMÍREZ

México D.F 2011





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA
JEFATURA DE LA CARRERA DE INGENIERÍA
QUÍMICA

OFICIO: FESZ/JCIQ/025/10

ASUNTO: Asignación de Jurado

ALUMNO: CASTRO HERNÁNDEZ GERMÁN
P R E S E N T E

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

PRESIDENTE	I. Q. Mario Barroso Moreno
VOCAL	Dra. María Teresa Orta Ledesma
SECRETARIO	I. Q. María del Rocío Luja Hernández
SUPLENTE	M. en C. José Mariano Ramos Olmos
SUPLENTE	I. Q. Ana Lilia Maldonado Arellano

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
México D. F., a 10 de Septiembre de 2010

JEFA DE LA CARRERA

I. Q. ZULA GENNY SANDOVAL VILLANUEVA





Agradecimientos

Josué 1:9 Mira que te mando que te esfuerces y seas valiente; no temas ni desmayes, porque Jehová tu Dios estará contigo en dondequiera que vayas.

A mi Dios:

Padre Dios, gracias por tu amor y misericordia hacia mi vida. Gracias por permitirme conocerte a través de mi Señor Jesucristo. Ciertamente llegaron en el momento justo, ni un día antes, ni un día después.

Gracias por haberme esforzado durante toda mi vida a través de la escasez de todo material, con lo que me enseñaste a valorar la vida, familia, amigos, pero sobre todo a través de tu cruz me enseñaste a perdonar y amar a aquellos que me hicieron daño.

Gracias porque me diste descanso de todas mis cargas, en ti halle esperanza, paz y la tranquilidad que nunca pude hallar en una mujer. Gracias por enseñarme a ser valiente aun en la situación más difícil y complicada, a tu lado no tengo temor alguno, se que tu espíritu está en mi, es quien me guía y me lleva por sendas de justicia.

Gracias Señor por estar conmigo en todo momento, por entrenarme desde que amanece hasta que anochece, gracias por aceptarme como tu hijo, como tu amigo.

Gracias Señor por permitirme ser una de las muchas voces que claman en un mundo desértico para anunciar buenas de paz, para anunciar buenas nuevas.

Señor gracias por permitirme conocer a tu sierva, gracias por su vida tan hermosa dedicada a ti, mujer irreprochable que te ama, confía y sirve.

Señor Gracias por haberme dado a una madre valiente, humilde, esforzada y amorosa quien me amo desde su vientre y que me cuida aun siendo adulto preocupándose por mí. Gracias por haberme dado un padre que a pesar de todos sus errores, respeto, aprecio y quiero. Gracias por la vida de Marcela, a través de ella he visto tu misericordia hacia las vidas de los seres humanos, dale valor para desafiar la vida con la bebida que le has enviado.

Gracias por permitirme buenos amigos en la vida, a quienes extraño y por los cuales oro para que pronto puedan reunirse conmigo. Gracias Raúl, descansa en paz hermano.

Gracias por mis compañeros y jefes, en especial por la Dra. Orta a quien aprecio y admiro.



Gracias por cumplirme el sueño de estar en la UNAM, la universidad que tanto quiero y de la cual me siento tan orgulloso de haber pertenecido.

A Jazmín:

Gracias Jazmín por soportarme un año, gracias por tus oraciones incesantes y por preocuparte por mí, gracias por haber sido una excelente maestra que me fue mostrando que no hay amor más grande que el de Dios.

Perdóname por haberte hecho enojar, entristecer, y por ser la causa de tus lagrimas, juntos aprendimos mucho uno del otro.

A mi Madre:

Sabes lo mucho que te quiero, lo importante que has sido en mi vida, Dios a través de ti me enseñó la honradez, el trabajo y las buenas costumbres. A tu lado he sido muy feliz a pesar de todo, Dios no me pudo dar mejor madre que tú.

A mi Hermana:

Perdón por no haber sido un buen hermano, perdón por verte a veces no como una hermana si no como a una hija a la que se tiene que educar con dureza y sin contemplaciones. Gracias por ser mi apoyo en los momentos de dificultad, y por ser mi consejera en cuanto a regalos para las chicas. Le atinaste al regalo de Jazmín, a ella le encanta el morado.

A mi Padre:

Perdóname por ser tan apático contigo y por no haber tenido misericordia de ti, aun cuando tu trabajo era tan pesado, quiero que sepas que te quiero y que no te guardo rencor por el pasado, Dios te bendiga viejo.

A mis Amigos:

Aunque algunos no podrán estar en este momento tan importante de mi vida saben que siempre estarán en mis recuerdos, doy gracias a Dios por la vida de Francisco, Antonio, Fernando, Armando, Humberto, Edgar, Rolando, Alejandro, Cesar, Atenas, Isabel, Carmen, Verónica, Jessica, Ivette Josué, Iván y Karen. Gracias a todos ustedes por ser parte de mi vida académica de más de 20 años, saben lo mucho que los aprecio y quiero. "No me olvide de ti Raúl, gracias".



A mis Jefes y compañeros:

Doy gracias a Dios por permitirme estar con la Dra. María Teresa Orta Ledesma quien me dio la oportunidad de formar parte de un gran equipo de personas capaces pero sobre todo con un alto valor humano y compromiso con los estudiantes y futuros profesionistas. Gracias Dra. Orta, por darme la oportunidad de estar colaborando con usted, gracias por enseñarme a ser responsable y dedicado, nunca se lo he dicho, pero la aprecio mucho, la respeto y admiro, por ser una mujer que se ha ganado el lugar que tiene por su capacidad, constancia y dedicación.

Gracias a la Mtra. Isaura quien es una persona de buenos sentimientos, cálida y en la cual se puede confiar, gracias maestra por su paciencia y ayuda durante la realización de mi tesis.

Gracias al Dr. Monje., por ser más que un asesor, por ser un buen amigo que fue de gran ayuda para el término de este trabajo, gracias por su tiempo y por su disposición.

Gracias al Mtro. Mariano por sus observaciones, porque aun siendo suplente se tomo la molestia de revisar cuidadosamente este trabajo, por algo es perito profe.

Gracias a Dios por permitirme estar en la máxima casa de estudios de este país, siempre fue un sueño estar en la UNAM, con ello Dios muestra al mundo que solo él es capaz de levantar a hombres humildes, de la nada para su honra y gloria.

Doy gracias a Dios por mis compañeros: Tere, Fabiola Josele, Erick, Fernando, Gabriel, Ricardo, Marie, Rodolfo, Alberto y Beatriz.



Contenido

Índice de Figuras	8
Índice de Tablas.....	11
Resumen.....	13

Capítulo 1. Introducción

1.1 Introducción.....	15
1.2 Objetivo general.....	16
1.3 Objetivos particulares.....	16
1.4 Hipótesis.....	16
1.5 Justificación.....	17

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano.....	19
2.1.1 Agua subterránea.....	20
2.2 Suministro de agua potable en México.....	25
2.3 Desinfección de agua.....	26
2.3.1 Factor Ct (concentración - tiempo de contacto).....	26
2.3.2 Temperatura.....	28
2.3.3 Microorganismos indicadores de la calidad microbiológica del agua.....	28
2.4 Desinfección con agentes químicos.....	30
2.4.1 Cloración.....	31
2.4.2 Ozonación.....	37
2.4.3 Desinfección combinada.....	52



Capítulo 3. Descripción del Sistema de Abastecimiento, Desinfección y Distribución del Agua de Suministro en Ciudad Universitaria.

3.1 Abastecimiento.....	54
3.2 Red de distribución.....	56
3.3 Consumo.....	57
3.4 Desinfección de agua de pozos de abastecimiento.....	58
3.4.1 Almacenamiento.....	68
3.4.2 Control de calidad del agua.....	69

Capítulo 4. Metodología

4.1 Diagnóstico del sistema de desinfección.....	71
4.2 Control de calidad de agua en Ciudad Universitaria.....	73
4.3 Muestreo de agua subterránea en los pozos de abastecimiento.....	73
4.4 Desinfección con ozono e hipoclorito de sodio.....	74
4.5 Arreglo experimental del sistema de desinfección a escala laboratorio: ozono e hipoclorito de sodio.....	75
4.5.1 Sistema de oxidación con ozono.....	75
4.5.2 Desinfección con hipoclorito de sodio.....	75
4.6 Pruebas de demanda de ozono y desinfección para agua de pozos de abastecimiento...77	
4.6.1 Demanda de ozono.....	77
4.6.2 Desinfección con ozono.....	78
4.6.3 Balance de masa.....	78
4.7 Pruebas de demanda y desinfección de agua de pozos de abastecimiento con hipoclorito de sodio.....	79
4.7.1 Demanda de cloro.....	79
4.7.2 Desinfección con hipoclorito de sodio.....	80
4.8 Parámetros de control de calidad del agua.....	80
4.8.1 Determinación de parámetros fisicoquímicos.....	80



4.8.2 Determinación de parámetros microbiológicos (Coliformes totales y Coliformes fecales).....	81
4.9 Esquema general de procedimiento experimental.....	82
4.10 Estimación teórica de los costos de la desinfección con ozono e hipoclorito de sodio.....	83
Capítulo 5. Resultados	
5.1 Análisis del control de calidad del agua en Ciudad Universitaria.....	87
5.2 Diagnóstico del sistema de desinfección de agua de consumo en Ciudad Universitaria.....	93
5.3 Desinfección con ozono e hipoclorito de sodio.....	99
5.4 Estimación teórica de los costos de la desinfección con ozono e hipoclorito de sodio.....	105
Conclusiones.....	107
Recomendaciones.....	108
Bibliografía.....	109
Anexos.....	113
Glosario.....	123



Índice de Figuras

Figura 2.1 Disponibilidad de agua en el mundo.....	20
Figura 2.2 Tipos de acuíferos.....	21
Figura 2.3 Acuíferos de México.....	22
Figura 2.4 Acuíferos sobreexplotados en México.....	23
Figura 2.5 Extracción e importación de agua en la Ciudad de México.....	24
Figura 2.6 Usos del agua subterránea en México.....	24
Figura 2.7. Suministro y desinfección de agua para consumo humano a nivel nacional y en el Distrito Federal.....	25
Figura 2.8 Representación gráfica de la ley de Chick.....	26
Figura 2.9 Comportamiento de las especies químicas del ácido hipocloroso respecto a variaciones de pH.....	33
Figura 2.10 Relación demanda-residual de cloro.....	34
Figura 2.11 Reacciones del ozono en agua.....	38
Figura 2.12 Producción de ozono por corona de descarga.....	41
Figura 2.13 Sistema de ozonación.....	42
Figura 2.14 Compresor de aspas.....	43
Figura 2.15 Generador de ozono de la gama OZVa.....	44
Figura 2.16 Generador de ozono de la gama OMVa.....	44
Figura 2.17 Contactador convencional de burbuja fina.....	46
Figura 2.18 Contactador Mazzei.....	46
Figura 2.19 Difusor poroso de burbuja fina.....	47
Figura 2. 20 Destructor de ozono térmico.....	48
Figura 2. 21 Destructor de ozono catalítico.....	49
Figura 2. 22 Destructor de ozono por adsorción en carbón activado.....	49
Figura 2.23 Estimación de costos del generador de ozono.....	51
Figura 3.1 Mapa de Ciudad Universitaria, UNAM.....	54
Figura 3.2 Extracción de agua de pozos de abastecimiento durante el 2007.....	55



Figura 3.3 Extracción de agua de pozos de abastecimiento durante el 2008.....	55
Figura 3.4 Válvulas del tanque bajo.....	58
Figura 3.5 Bombas del tanque bajo.....	58
Figura 3.6 Diagrama de conexiones entre tanques de almacenamiento y pozos 1 y 2.....	59
Figura 3.7 Pozo Facultad de Química.....	60
Figura 3.8 Tanque de hipoclorito de sodio.....	60
Figura 3.9 Diagrama de flujo del sistema de desinfección del pozo de la Facultad de Química.....	61
Figura 3.10 y 3.11 Tanque alto.....	63
Figura 3.12 Pozo Multifamiliar.....	63
Figura 3.13 Tanques de gas cloro de 907 Kg con malla ciclónica de protección.....	64
Figura 3.14 Sistema de desinfección de agua del pozo Multifamiliar.....	65
Figura 3.15 Pozo Vivero Alto.....	66
Figura 3.16 Tanques de almacenamiento.....	66
Figura 3.17 Conexiones entre los tanques de almacenamiento en el pozo Vivero Alto.....	66
Figura 3.18 Tanques de gas cloro usados en la desinfección del agua del pozo 3.....	67
Figura 3.19 Localización de la Dirección General de Servicios Médicos (DGSM).....	69
Figura 4.1 Arreglo experimental del sistema de desinfección con ozono e hipoclorito de sodio.....	76
Figura 4.2 Sistema de oxidación con ozono en modo continuo.....	77
Figura 4.3 Medidor de ozono en fase gas (API M465H).....	78
Figura 4.4 HACH POCKET-Diseñado para la medición colorimétrica a una longitud de onda 528nm.....	79
Figura 4.5 Celda para cloro residual.....	79
Figura 4.6 Medios de cultivo selectivos para la determinación de Coliformes totales (lado izquierdo) y Coliformes fecales (lado derecho).....	81
Figura 4.7 Esquema general de desinfección combinada con ozono e hipoclorito de sodio.....	82



Figura 5.1 Determinación de cloro residual en grifos de dependencias de Ciudad Universitaria durante el año 2007	88
Figura 5.2 Determinación de cloro residual en grifos de dependencias de Ciudad Universitaria durante el año 2008	89
Figura 5.3 Determinación de cloro residual en grifos de dependencias de Ciudad Universitaria durante el año 2009	90
Figura 5.4 Determinación de Coliformes totales en grifos de dependencias de Ciudad Universitaria durante el 2007.....	91
Figura 5.5 Determinación de Coliformes totales en grifos de dependencias de Ciudad Universitaria durante el 2008.....	91
Figura 5.6 Determinación de Coliformes totales en grifos de dependencias de Ciudad Universitaria durante el 2009.....	92
Figura 5.7 Diagrama de flujo de proceso de la desinfección con gas cloro del pozo Multifamiliar.....	96
Figura 5.8 Variación del pH después de la desinfección de agua de pozos de abastecimiento	101
Figura 5.9 Variación de la turbiedad después de la desinfección de agua de pozos de abastecimiento	102
Figura 5.10 Variación de los sólidos disueltos totales después de la desinfección de agua de pozos de abastecimiento.....	102
Figura 5.11 Variación de las Coliformes totales antes de la desinfección.....	104
Figura 5.12 Variación de las Coliformes totales después de la desinfección.....	104
Figura A.1 Espectrofotómetro HACH para medir la absorbancia.....	113
Figura A2.1 Departamento de Salud Ambiental (DGSM).....	114
Figura A2.2 Equipo de campo para medición de Cloro residual libre con el método de la ortotolidina	115
Figura A2.3 Mechero de alcohol y alcohol isopropílico utilizados en la toma de muestras en grifos para la determinación de Coliformes Totales.....	115
Figura A2.4 Dictámenes de resultados de cloro residual y Coliformes totales.....	116
Figura A3.1 Secuencia operativa para HAZOP.....	121



Índice de Tablas

Tabla 2.1 Características de los principales microorganismos patogénicos.....	28
Tabla 2.2 Microorganismo indicadores de la calidad del agua.....	29
Tabla 2.3 Desinfectantes primarios empleados en potabilización de agua.....	30
Tabla 2.4 Características físicas del cloro.....	31
Tabla 2.5 Características generales del cloro y sus derivados.....	32
Tabla 2.6 Equipos más usados en la cloración de agua.....	35
Tabla 2.7 Costos relativos de los distintos sistemas de cloración.....	36
Tabla 2.8 Características de los compresores utilizados para la alimentación de aire.....	43
Tabla 2.9 Clasificación de los generadores de ozono por corona de descarga.....	44
Tabla 2.10 Tipos de contactores de ozono.....	45
Tabla 2.11 Tipo de difusor por aplicación.....	47
Tabla 2.12 Combinación Interactiva de desinfectantes para agua cruda.....	52
Tabla 3.1 Diámetros y longitudes de tubería de la red de distribución de agua.....	56
Tabla 3.2 Material de la tubería en la red de distribución de agua potable.....	57
Tabla 3.3 Consumo de agua en los sectores de Ciudad Universitaria.....	57
Tabla 3.4 Costos de mantenimiento del sistema de desinfección pozo Facultad de Química.....	62
Tabla 3.5 Costos de mantenimiento del sistema de desinfección pozo Multifamiliar.....	65
Tabla 3.6 Costos de mantenimiento del sistema de desinfección pozo Vivero Alto.....	68
Tabla 3.7 Tanques de almacenamiento de pozos de abastecimiento de agua potable.....	68
Tabla 3.8 Tiempos de retención hidráulica de los tanques de almacenamiento de agua potable en Ciudad Universitaria, UNAM.....	68
Tabla 4.1 Calendario de muestro de agua cruda de pozos de abastecimiento.....	73
Tabla 4.2 Equipos utilizados para la medición de los parámetros F.Q.....	80
Tabla 4.3 Porcentajes estimados para determinar el costo de capital total.....	83
Tabla 4.4 Porcentajes estimados para determinar el costo de operación para pequeños sistemas....	84



Tabla 5.1 Cumplimiento en la norma en contenido de Cloro residual libre y Coliformes totales en muestras de agua en dependencias de Ciudad Universitaria 2007 – 2009.....	87
Tabla 5.2 Caracterización de agua de pozos de abastecimiento.....	94
Tabla 5.3 Palabras guía de la fuente de abastecimiento.....	97
Tabla 5.4 Palabras guía de la línea tanque – regulador dosificador.....	98
Tabla 5.5 Resultado de la determinación experimental de la demanda de ozono de pozos de abastecimiento.....	99
Tabla 5.6 Resultados de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos antes de la desinfección.....	100
Tabla 5.7 Resultados de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos después de la desinfección.....	100
Tabla A2.1 Lista de dependencias de Ciudad Universitaria.....	116
Tabla A3.1 Palabras-guía fundamentales con su correspondiente significado.....	120



Resumen

El Campus Central de la UNAM cuenta con sistemas de cloración (Cl_2 y NaOCl) instalados en línea a pie de pozo para desinfectar el agua de la red de suministro. Con la finalidad de garantizar la inocuidad del vital líquido y de preservar la salud de la población abastecida, el presente trabajo de tesis tuvo como objetivo evaluar y proponer alternativas de mejora al sistema de desinfección.

En una primera etapa se realizó un diagnóstico de las condiciones de operación y del estado que guardan las instalaciones y los equipos de cloración, apoyándose en el método HAZOP, para identificar posibles puntos vulnerables del sistema desinfección, tomando en consideración como principales líneas de proceso, la fuente de abastecimiento y el sistema cloración. Adicionalmente se hizo un análisis de los registros de control de calidad del agua durante los años 2007, 2008 y 2009 que realiza el Departamento de Salud Ambiental (DSA).

El diagnóstico indica, que se debe poner especial atención, a la fuente de abastecimiento y a la dosificación segura y controlada de gas cloro. Por otra parte cerca del 20 % de las dependencias enlistadas por el DSA reciben agua que no cumple con los límites permisibles de cloro residual establecidos en la NOM-127-SSA1-1994 modificada en el 2000.

Como alternativas al sistema de desinfección se evaluó el uso del ozono en combinación con hipoclorito de sodio como una medida de garantizar la calidad microbiológica del agua. Una dosis aplicada de 2.3 mg/L de ozono (fase gas) y 0.5mg/L de hipoclorito de sodio fueron suficientes para: cubrir la demanda de los oxidantes, conservar los residuales de 0.3mg/L de ozono y 0.5 mg/L de hipoclorito de sodio, además de llevar a cabo la desinfección mejorando las condiciones organolépticas del agua.

El costo teórico del metro cubico desinfectado con ozono e hipoclorito de sodio para los 3 pozos de abastecimiento de Ciudad Universitaria fue de \$1.55 pesos/m³. Es una buena alternativa ya que mejorar la calidad del agua, y, con las condiciones de seguridad, mantenimiento y buenas prácticas de operación no representa problema alguno.



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN



1.1 Introducción

El abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras (NOM-127-SSA1-1994, modificada en el 2000).

La razón fundamental de la desinfección del agua es disminuir el riesgo de infección de las enfermedades transmitidas por el agua mediante la destrucción o inactivación de los diversos organismos patógenos que están o pueden estar presentes en la fuente de agua que las personas utilizan para satisfacer sus necesidades básicas Witt, VM; Reiff, FM (1993).

Ciudad Universitaria cuenta con 3 pozos profundos para el abastecimiento de agua potable, la desinfección se lleva a cabo con gas cloro (Multifamiliar y Vivero Alto) e hipoclorito de sodio (Facultad de Química), la capacidad total de almacenamiento es de 12000m³ y una red de distribución de 56km.

El control de la calidad del agua abastecida en el campus la lleva a cabo el Departamento de Salud Ambiental. Durante el 2010 el Instituto de Ecología de la UNAM detectó la presencia de microorganismos resistentes al cloro en los pozos de abastecimiento esto aunado a las condiciones actuales de los sistemas de desinfección hacen necesario el valorar alternativas que garanticen la calidad del agua.

Un sistema combinado de oxidantes implica aprovechar el efecto de dos o más desinfectantes, pues se sabe que uno puede fallar, por ejemplo contra protozoarios y organismos resistentes. Luis, AD (2001). El ozono tiene la capacidad de lograr niveles más altos de desinfección en comparación con el cloro o la luz ultravioleta, es generado in situ, y por lo tanto, son menores los problemas de seguridad relacionados con su manejo y envío. El hipoclorito de sodio por su efecto residual contribuye al control del recrecimiento microbiano.

Con el sistema experimental se obtuvieron las dosis necesarias de ozono e hipoclorito de sodio para llevar a cabo la desinfección, esto puede servir como base para la implementación de un sistema con la combinación de dichos desinfectantes.



1.2 Objetivo general

Evaluar y proponer alternativas para mejorar la desinfección de agua de suministro distribuida en Ciudad Universitaria.

1.3 Objetivos particulares

1. Realizar un diagnóstico a los sistemas de desinfección instalados en la red de abastecimiento de agua potable para valorar las condiciones actuales de operación.
2. Recabar y analizar los registros históricos de información relacionados con la calidad del agua de la red de abastecimiento de los 2007, 2008 y 2009.
3. Con base en la información recabada (objetivos 1 y 2) y apoyándose en la metodología HAZOP o AFO (Análisis Funcional de Operación), identificar los posibles puntos vulnerables del sistema de desinfección, considerando como principales líneas de proceso la fuente de abastecimiento y los sistemas cloración.
4. Evaluar experimentalmente a escala laboratorio los requerimientos para llevar a cabo la desinfección mediante la combinación O_3 -NaOCl, con base en estándares internacionales de tratamiento ($0.3 \text{ mgO}_3/\text{L}$ y 4 min de tiempo de contacto) y concentraciones de Cloro residual libre (0.5 mg/L), necesarias para preservar la calidad del agua de acuerdo a la NOM-127-SSA1-1994, modificada en el 2000.
5. Evaluar la calidad del agua obtenida, bajo las condiciones de desinfección establecidas, mediante el análisis de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos indicados en la NOM-127-SSA1-1994 (pH, turbiedad, SDT, Coliformes fecales y totales).
6. Realizar una estimación teórica de los costos de la desinfección con O_3 -NaOCl.

Hipótesis

El diagnóstico de los sistemas de desinfección así como el análisis y procesamiento de la información recabada acerca de la calidad del agua de suministro de Ciudad Universitaria, permitirá identificar posibles puntos vulnerables en la operación y proponer mejoras al sistema y alternativas de tratamiento.



1.4 Justificación

La escasez de agua provocada por la demanda creciente que va de la mano con el aumento de la población en el mundo y en México, ha causado que en los últimos años se haya tomado especial atención en cuanto al uso y reuso de la misma; para abatir esta problemática la UNAM implementó: *el programa de manejo, uso y reuso del agua* con la participación de la comunidad universitaria que tiene como nombre PUMAGUA; éste tiene 4 áreas ó ejes rectores: Balance Hidráulico, Calidad del Agua, Sistema de Información Geográfica y Comunicación y Participación. La presente tesis forma parte de los estudios del área de calidad de agua, entre sus objetivos destaca el proponer mejoras al sistema de desinfección del agua abastecida en el campus.

La fuga de gas cloro en el pozo del Vivero Alto durante Febrero del 2009 y la presencia de microorganismos resistentes a este desinfectante en el pozo Multifamiliar durante el 2010, hacen necesario el realizar dentro del diagnóstico una valoración del sistema de desinfección.

Al carecer del equipo de seguridad para el personal que labora en las instalaciones, así como de detectores de fugas, alarmas o planes de seguridad en caso de contingencias; asociado al poco conocimiento por parte de los operadores sobre el mantenimiento correctivo y preventivo de los equipos, es recomendable que se lleven a cabo las medidas correctivas necesarias para la operación segura de los sistemas de desinfección con cloro instalados en los pozos. Por otro lado en el caso de que se confirme la presencia de microorganismos resistentes a este desinfectante, bien se puede valorar el experimentar con otros esquemas y alternativas en cuanto a desinfectantes que mejoren la calidad del agua para un consumo seguro; en este sentido la combinación de oxidantes como el ozono e hipoclorito de sodio pueden contribuir de manera importante.



CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO



2.1 Fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano

Las fuentes de agua para abastecimiento son subterráneas y superficiales. La distribución del agua en el planeta indica que del volumen total de agua dulce, estimado en unos 38 millones de kilómetros cúbicos, poco más del 75% está concentrado en casquetes polares y glaciares; el 21% está almacenado en el subsuelo, y el 4% restante corresponde a los cuerpos de agua superficial (lagos y ríos). El agua dulce almacenada en el subsuelo es muy superior a la existente en las corrientes superficiales, pero sólo es aprovechable en parte, debido a limitaciones físicas y económicas que existen para su extracción. Gran parte del agua dulce aprovechable transita y se almacena en los primeros 1,000 m de profundidad a partir de la superficie del terreno, donde se alojan los acuíferos de mayor permeabilidad, de renovación más activa, económicamente accesibles y con agua de buena calidad.

Conviene destacar, además, algunos atributos que el agua subterránea presenta por naturaleza y que le confieren ciertas ventajas sobre el agua superficial, como son:

Menor exposición a la contaminación. Es bien sabido que la gran mayoría de las corrientes y masas de agua superficial se están contaminando rápidamente en mayor o menor grado. La calidad del agua subterránea, en cambio, está relativamente salvaguardada porque la zona no saturada funciona como un sistema de tratamiento natural, que atenúa, retarda o retiene los contaminantes, mediante varios fenómenos físico-químicos y biológicos.

Disponibilidad menos afectada por las variaciones climáticas. De manera natural, la disponibilidad de agua superficial depende especialmente de los niveles de precipitación pluvial, al grado de que en años secos (sin lluvias) consecutivos, puede ser prácticamente nula. En este sentido, las fuentes subterráneas resultan, en general, menos afectadas, gracias a que los acuíferos son vasos reguladores que contienen una reserva almacenada, acumulada durante siglos, y de mayor magnitud que la recarga natural.

Amplia distribución espacial. El agua superficial es un recurso de presencia espacial concentrada en las corrientes; por tanto, su aprovechamiento en gran escala requiere de obras de almacenamiento y conducción. En cambio, en agua del subsuelo se tiene una distribución más amplia, lo que permite que se encuentre disponible en el sitio donde va a ser utilizada la mayor parte de las veces, o en sus inmediaciones; ésta se encuentra almacenada en forma natural.

Temperatura del agua constante. El agua superficial, al estar expuesta a los cambios atmosféricos, varía continuamente en su temperatura. En países fríos, donde el agua llega a congelarse durante los períodos invernales, esto constituye un serio problema. La temperatura del agua subterránea, por otro lado, es casi constante, debido a que el subsuelo funciona como un regulador térmico, CONAGUA (2008). *Dado que el tema de este trabajo de tesis está directamente relacionado con las fuentes de origen subterráneo, a continuación se hace una breve descripción del estado en que se encuentran.*

2.1.1 Agua subterránea

La disponibilidad promedio anual en el mundo es de aproximadamente 1386 millones de km^3 , de los cuales sólo el 2.5% es agua dulce, pero el 69.6% del agua dulce se encuentra en forma de glaciares y nieve, 30% es agua subterránea y 0.4% está disponible en lagos, ríos y depósitos subterráneos poco profundos. Sin embargo, la mayor parte de esta reserva se encuentra lejos de las zonas pobladas dificultando su utilización.

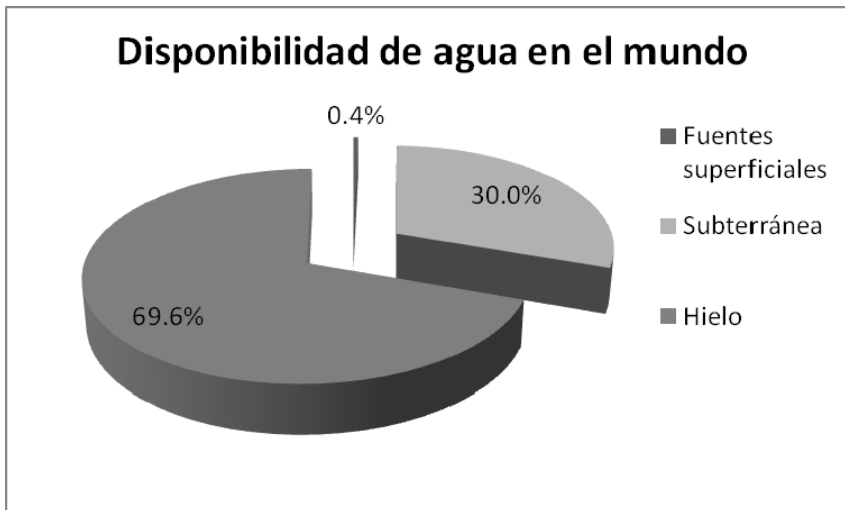


Figura 2.1 Disponibilidad de agua en el mundo (Fuente: CONAGUA 2008)

La evaluación de las fuentes de agua subterránea ha sido una tarea que ha adquirido gran importancia en las últimas décadas en nuestro país, como consecuencia del incremento de la demanda por el recurso. Así, tanto las personas involucradas directamente con el sector hidráulico como aquellas relacionadas de manera indirecta, han prestado mayor interés en los conceptos hidrogeológicos que forman la base el estudio de las aguas subterráneas. El agua subterránea es parte de la precipitación que se filtra a través del suelo hacia los estratos porosos y en ocasiones los llega a saturar. Se mueve lentamente hacia los niveles bajos, generalmente en ángulos inclinados (debido a la gravedad) y, eventualmente, llegan a los manantiales, los arroyos, lagos y océanos. Un par de factores importantes son los responsables de la existencia del agua subterránea: la gravedad, que mueve al agua hacia el centro de la Tierra, y el tipo de rocas, que de acuerdo con su porosidad, almacenan en menor o mayor grado agua.

Acuífero

La mayor parte de los espacios porosos de las rocas bajo el nivel freático están llenos de agua. Pero las rocas tienen una porosidad diferente y características permeables diferentes, lo que significa que el agua no se mueve de igual manera en todo tipo de rocas. Cuando la roca almacenadora de agua permite que la misma fluya hacia los pozos y en los arroyos, recibe el nombre de “acuífero”.

De acuerdo con las condiciones de presión a que se encuentra sometida el agua en el subsuelo, los acuíferos se clasifican en: libres, confinados y semiconfinados (Figura 2.2). El agua almacenada en un acuífero está en contacto directo con la atmósfera a través de los poros y fisuras de la roca, el acuífero se denomina **acuífero libre**. Cuando está aislado de la atmósfera por unidades geológicas impermeables se les denomina **acuífero confinado**, siempre saturado de agua y en todos sus puntos el agua se encuentra a una presión mayor que la atmosférica Martínez, PE (2006).

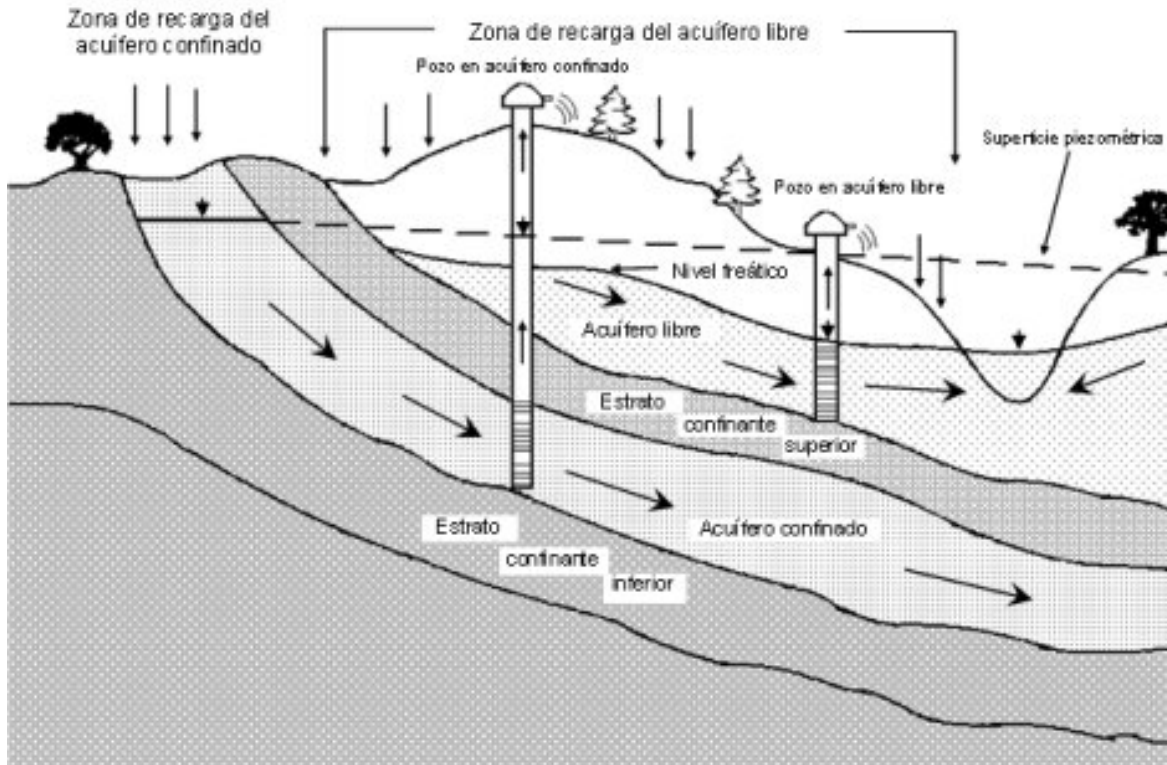


Figura 2.2 Tipos de acuíferos (Fuente: Gutiérrez, OC 2006)

Calidad del agua subterránea

Las sustancias o contaminantes que modifican la calidad del agua de los acuíferos se dividen en: las presentes en la naturaleza y en aquellas producidas por las actividades del hombre (antropogénicas). Dentro de las primeras se encuentran por ejemplo el arsénico, flúor y elementos radiactivos, entre otros Nielsen, D (1991); mientras que en las segundas incluyen bacterias, virus, nitratos, e hidrocarburos (solventes, plaguicidas, etc.) y materiales pesados (Cd, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn). Las fuentes de contaminación se pueden originar en la superficie del terreno, por ejemplo, la agricultura; en el subsuelo por arriba del nivel freático, por ejemplo, basureros a cielo abierto; y en el subsuelo por debajo del nivel freático, como es el caso de pozos abandonados. Los acuíferos costeros pueden contaminarse por intrusión salina y las fosas sépticas son, quizá, las fuentes de aguas residuales que más contribuyen a la contaminación del agua subterránea.



Sobreexplotación de acuíferos

Existen evidencias de que un número significativo de los acuíferos que cubren el territorio nacional están siendo sobreexplotados o se encuentran muy cercanos a sus niveles máximos de extracción. Las fuentes de agua subterránea del país son vitales para garantizar el abastecimiento a la población urbana, pues gran parte de las ciudades y localidades dependen de ellas. Igualmente importantes son para la agricultura, industria, comercio y servicios. El agua subterránea en el país se encuentra dividida en 653 acuíferos de los cuales sólo 282 tienen disponibilidad para el uso del recurso. Del total de agua utilizada, de acuerdo con los volúmenes concesionados, cerca del 37%, es decir 28.9 miles de millones de m³ anuales, son extraídos de los mantos subterráneos.

El 31 de Diciembre del 2008, la CONAGUA reportó con sobreexplotación 101 acuíferos a partir de los cuales se obtenía el 58% del total del agua extraída de origen subterráneo a nivel nacional (Figura 2.3).

Región Hidrológico-Administrativa		Número de acuíferos				
		Total	Sobreexplotado	Con intrusión marina	Bajo el fenómeno de salinización de suelos y aguas subterráneas salobres	Recarga media (mill.m ³)
I	Península de Baja California	87	7	9	4	1 249
II	Noroeste	63	13	5	0	3 130
III	Pacífico Norte	24	2	0	0	3 263
IV	Balsas	46	2	0	0	4 601
V	Pacífico Sur	35	0	0	0	1 994
VI	Río Bravo	100	15	0	4	5 167
VII	Cuencas Centrales del Norte	68	24	0	8	2 274
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	127	32	1	0	7 686
IX	Golfo Norte	40	2	0	0	1 274
X	Golfo Centro	22	0	2	0	3 849
XI	Frontera Sur	23	0	0	0	18 015
XII	Península de Yucatán	4	0	0	1	25 316
XIII	Aguas del Valle de México	14	4	0	0	1 834
Total		653	101	17	17	79 651

FUENTE: CONAGUA. Subdirección General Técnica.

Figura 2.3 Acuíferos de México (Fuente: CONAGUA 2010)

La sobreexplotación en las zonas aledañas al mar, ha provocado que se tengan acuíferos con intrusión salina (Figura 2.4), es decir lugares en donde el abatimiento del nivel del agua subterránea se encuentra por debajo del nivel del mar, alterando el balance dinámico del agua de mar con el agua dulce. En total existen 16 acuíferos con este problema en la república CONAGUA (2010).

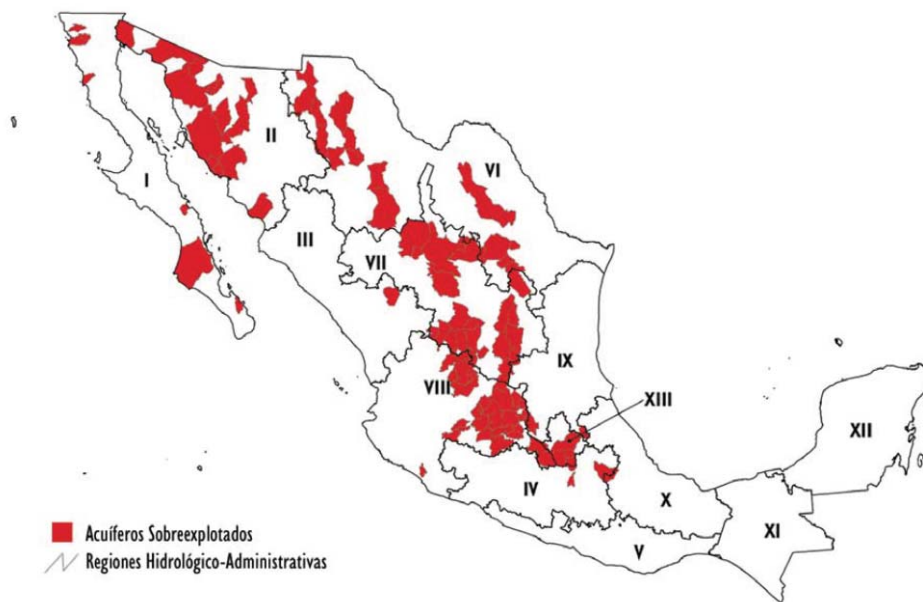


Figura 2.4 Acuíferos sobreexplotados en México (CONAGUA 2010)

En términos generales, los niveles de extracción y finalmente las condiciones de sobreexplotación que llegan a prevalecer en algunos acuíferos, están directamente relacionadas con la demanda de agua de parte de la población así como por el sector productivo. Un caso particular es el de la ciudad de México, cuyos recursos hídricos provienen de la cuenca de México y las cuencas de Lerma y Cutzamala, siendo su principal fuente de abastecimiento el agua subterránea del acuífero del Valle de México. Donde a lo largo de un siglo el crecimiento poblacional marcó el ritmo de crecimiento de los niveles de extracción e importación del agua de abastecimiento (Figura 2.5). Se consideró en su momento que de manera natural el sistema de agua subterránea de la cuenca de México tenía la capacidad para abastecer de agua a una población de aproximadamente 8 millones de habitantes, población que fue rebasada a mediados de los sesenta Mazarí, Mariza; Mazarí, Marcos (2007).

Las extracciones de aguas subterráneas superiores a las recargas naturales también se asocian a comportamientos sociales negligentes, prácticas de explotación depredadoras de los recursos naturales y procesos productivos ineficaces. En las ciudades y pueblos de México es común observar la exigencia de nuevos pozos para el abastecimiento de agua potable, antes que discutir la puesta en práctica de métodos ahorradores del agua existente o el mejoramiento y eliminación de fugas y desperdicios en las redes de distribución.

En el campo, son excepción los métodos y prácticas productivas que reconocen al agua como un recurso escaso y por lo tanto, del que se debe obtener el máximo beneficio por unidad de volumen.

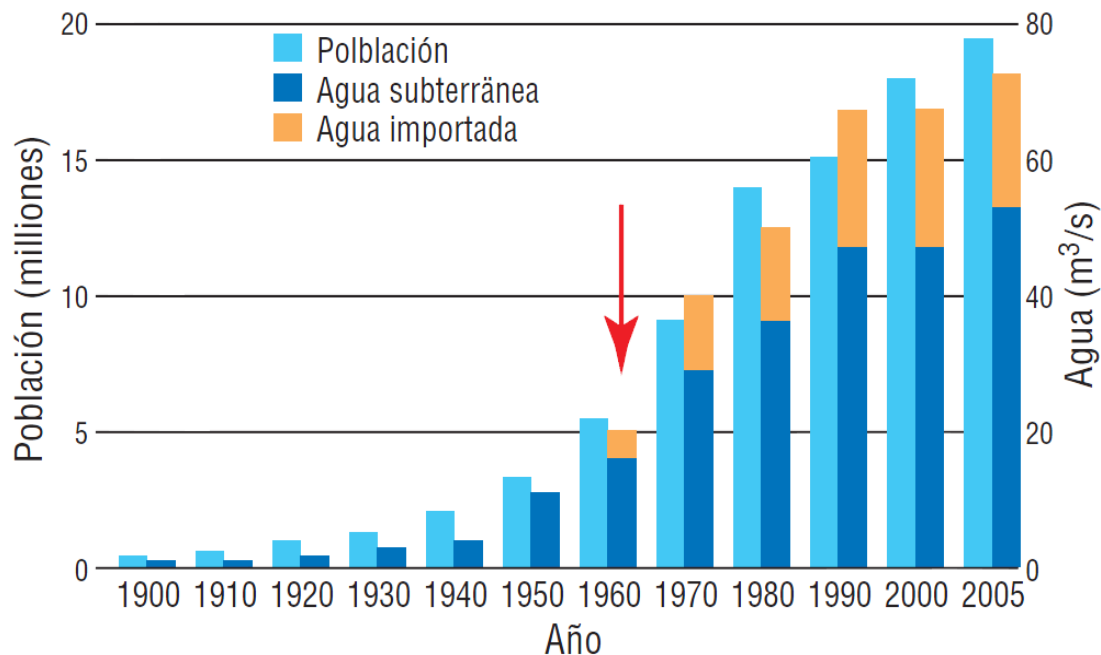


Figura 2.5 Extracción e importación de agua en la Ciudad de México (Fuente: Mazarí M; Mazarí M 2007)

La Figura 2.6 muestra que el 69% del consumo de agua subterránea en México es para uso agrícola, y solo el 24% es destinado para el uso público; el 7% restante se lo dividen la industria y las termoeléctricas. **NOTA ACOMODAR ORDEN DE TABLAS**

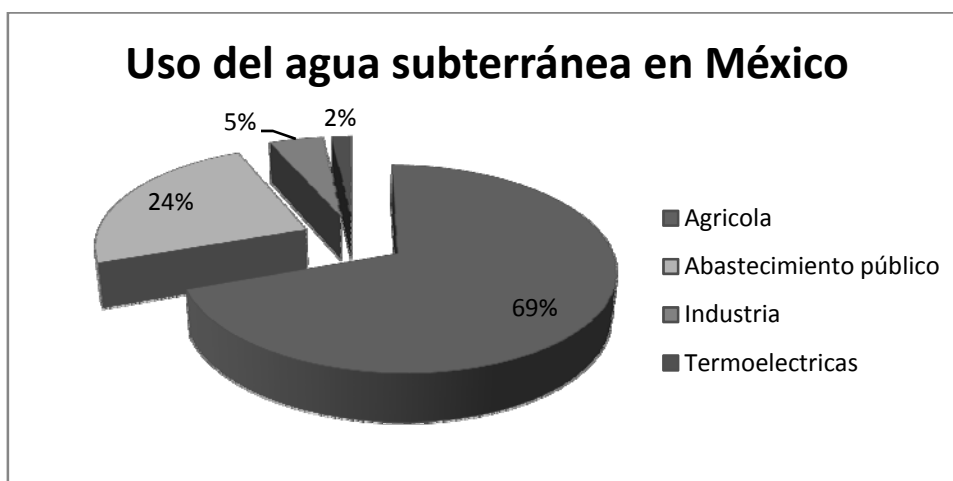


Figura 2.6 Usos del agua subterránea en México (Fuente: CONAGUA 2008)



2.2 Suministro de agua potable en México

Un agua potable ó un *Agua para uso y consumo humano* es aquella que no contiene contaminantes objetables, ya sean químicos o agentes infecciosos, que puedan causar efectos nocivos a la salud (NOM-127-SSA1-1994, modificada en el 2000).

Según reportes de la CONAGUA (2008), en el 2000, el suministro de agua potable a nivel nacional fue de 306 m³/s, registrando incrementos graduales en los cinco años posteriores como se puede observar en la Figura 2.7; al término del 2006 alcanzó los 325 m³/s. Es de resaltar que tan sólo en el D.F y Zona Conurbada (D.F. y Estado de México), el suministro alcanzó los 72 m³/s, 23% del total a nivel nacional en el periodo 2000-2006.

Otro aspecto a destacar es el nivel de cobertura de desinfección del vital líquido. Al respecto, más del 90% del agua suministrada en las entidades federativas del país era desinfectada. Y de acuerdo con la CONAGUA (2008), en el D.F y Zona Conurbada, la cobertura es del 100%.

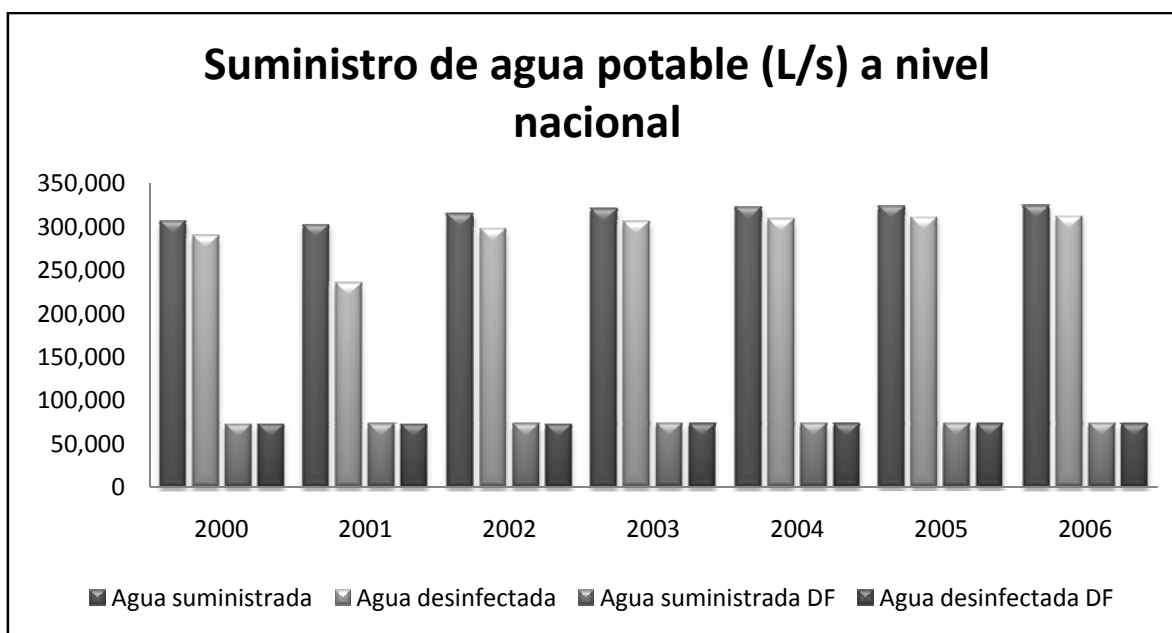


Figura 2.7. Suministro y desinfección de agua para consumo humano a nivel nacional y en el Distrito Federal. (Fuente: Gráfico construido con los datos proporcionados por la CONAGUA 2008).



2.3 Desinfección de agua

La desinfección depende en gran medida de las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del agua a desinfectar, de su origen y de su calidad en términos generales, así como del agente desinfectante que se utilice para dicho fin. Otros factores secundarios están relacionados con la infraestructura de que se disponga, el caudal a tratar Andrew, R (2001). La desinfección es una etapa de tratamiento que tiene por objetivo la “destrucción” y/o inactivación de organismos patógenos por medio de la aplicación de productos químicos o procesos físicos. La tendencia internacional actual, sobre esta etapa de tratamiento, está centrada en el efecto colateral de contaminantes orgánicos que se forman como subproductos del propio proceso de desinfección. Tal es el caso del control que se tiene sobre los subproductos que se forman durante el uso del cloro y desinfectantes alternativos derivados de dicho compuesto.

Consideraciones generales de la desinfección

- ✓ Concentración - tiempo de contacto (CT)
- ✓ Tipo y dosis del agente químico
- ✓ Número de microorganismos
- ✓ Naturaleza del agua
- ✓ Temperatura

2.3.1 Factor Ct (Concentración - tiempo de contacto)

Ct es el parámetro de diseño y por lo tanto la variable más importante en el proceso de desinfección. Es el producto de la concentración (mg/L) del desinfectante por el tiempo (min) en que se debe exponer el agua al desinfectante. Por lo tanto se mide en mg min /L. Se deriva de la ley de Chick. Al aumentar ya sea la concentración o el tiempo de contacto, la efectividad en el proceso de inactivación de los microorganismos será mayor. Chick y Watson propusieron que el proceso de desinfección se puede representar así:

$$\frac{dN}{dt} = -kCN \dots\dots\dots 2.1$$

Donde,

- N: número de microorganismos vivos en el tiempo “t”
- t : tiempo de contacto (min)
- k: constante de inactivación (es función del desinfectante, temperatura, pH)
- C: concentración de desinfectante (mg/L)

Nota: Se asume que la concentración es constate.

Integrando se llega a: $\frac{N}{N_0} = e^{-kCt}$ 2.2

N_0 es el número de microorganismos vivos al tiempo cero ($t = 0$). Esta ecuación establece que la relación de microorganismos vivos decrece al aumentar Ct , ya que k es constante. Según este modelo, el tiempo para inactivar un determinado tipo de microorganismos es directamente proporcional al logaritmo de la relación de organismos remanentes (vivos) sobre organismos iniciales.

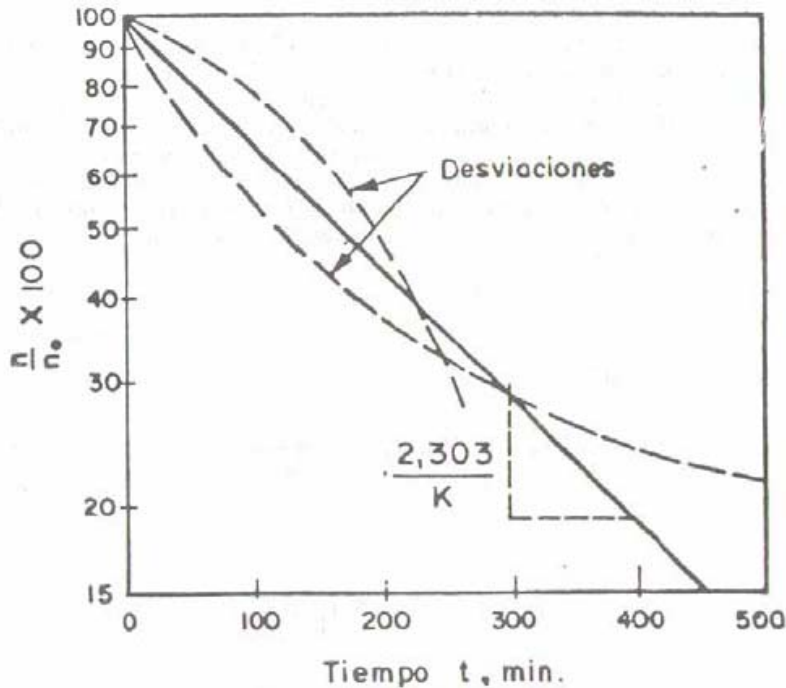


Figura 2.8 Representación gráfica de la ley de Chick (Arboleda, VJ 2000)

En la práctica, la inactivación de los microorganismos presenta desviaciones a la ley de Chick (matemáticamente no siempre se comporta como una reacción de primer orden), como lo muestra la Figura 2.8. Arboleda Valencia J (2000).

La tasa de destrucción ($\log N/N_0$) puede aumentar o disminuir con el tiempo debido a:

- ✓ Presencia de sustancias interferentes que impiden mantener un residual adecuado del desinfectante.
- ✓ Errores experimentales
- ✓ Diferente susceptibilidad de los organismos
- ✓ Problemas de mezclado del desinfectante con el agua
- ✓ Existencia de colonias de bacterias de tamaños variados que establecen una concentración no uniforme de los organismos en el agua.



La dosis infecciosa es la cantidad de agente que debe ser consumida para dar lugar a las manifestaciones clínicas de intoxicación alimentaria. La dosis infecciosa depende del agente y de otras variables de la persona que lo ingiere, como la edad y estado de salud. En el caso de la *Salmonella*, en humanos saludables, es necesaria una inoculación relativamente grande, entre 10 a 100 millones de organismos para provocar los síntomas, al ser estas bacterias muy sensibles al ácido. Sin embargo, un pH estomacal artificialmente elevado reduce enormemente el número de organismos necesario para provocar síntomas (de 10 a 100 órdenes de magnitud). La detección y cuantificación de todo el espectro posible de microorganismos patógenos en agua es laboriosa y demanda tiempo, costos elevados y no siempre se obtienen resultados positivos que confirmen su presencia. Este hecho lleva a cuestionar cual o cuales microorganismos sería el ideal como indicador de la calidad microbiológica del agua (ver tabla 2.2). La elección es difícil, pues un microorganismo indicador de acuerdo a Feachem Cairncross, S; Feachem, RG (1997), debe presentar las siguientes características:

- ✓ Ser exclusivamente de origen humano (No ser parte de cualquiera de las bacterias que se utilizan actualmente como indicadoras)
- ✓ Ser incapaz de crecer en ambiente externo al intestino o presentar ritmo de inactivación inferior a los patógenos de origen fecal
- ✓ Ser detectado y cuantificado fácilmente

Tabla 2.2 Microorganismo indicadores de la calidad del agua (Fuente: Modificado de Luis, AD. 2001)

Organismo indicador	Indicador de contaminación	Buen Indicador	No Indica	Determinación
Coliformes fecales	Contaminación de origen fecal y no fecal	Bacterias entéricas, algunos virus y microorganismos menos resistentes que ese grupo	Bacterias esporuladas, virus, helmintos y todos los microorganismos más resistentes	Varias técnicas de fermentación pueden ser utilizadas, presentando resultados en 24 horas ^C
Coliformes totales	Contaminación de origen fecal, son buenos indicadores para aguas balnearias.	Bacterias entéricas, algunos virus y microorganismos menos resistentes que ese grupo	Bacterias esporuladas, virus, helmintos y todos los microorganismos más resistentes	Varias técnicas de fermentación pueden ser utilizadas, presentando resultados en 24 horas ^C
<i>E. Coli</i>	La contaminación reciente de origen exclusivamente fecal	Bacterias entéricas de origen humano, virus y microorganismos menos resistentes	Bacterias esporuladas, virus, helmintos y todos los microorganismos más resistentes	El método de collilert ^C , es simple y rápido, ofrece resultados en 24 horas.
<i>Clostridium perfringens</i>	Indicador optimo de contaminación fecal que fue utilizada en la desinfección donde la contaminación es remota.	Protozoarios	Helmintos y todos los microorganismos más resistentes	Utiliza la técnica de tubos múltiples en la determinación del número más probable (NMP) de <i>clostridium perfringens</i> . ^C

c: Como se describe en Standard Methods 1998

d: (UFC/100mL) significa unidades formadoras de colonias en placa por cada 100mL de muestra.



2.4 Desinfección con agentes químicos

El agua debe ser caracterizada apropiadamente antes de aplicar cualquier agente desinfectante. Esto debido a que la presencia de diversos compuestos o materia orgánica pueden afectar la eficiencia de desinfección. El desinfectante químico más utilizado en la desinfección de agua potable es el cloro líquido o gas (Cl_2), que ha sido empleado como desinfectante en la mayoría de las plantas que trata agua superficial o subterránea, tanto como pre-desinfectante o como pos-desinfectante (manteniendo un residual en la red). Otros desinfectantes químicos son considerados alternativos destacando el hipoclorito de sodio o de calcio, ozono, dióxido de cloro.

Tabla 2.3 Desinfectantes primarios empleados en potabilización de agua (Fuente: USEPA 1999)

Organismos	Con tratamiento convencional	Sin tratamiento
Grupo Coliformes	Cloro e hipocloritos Cloraminas Dióxido de Cloro Ozono UV Desinfección Interactiva	Cloro e hipocloritos Dióxido de Cloro Desinfección Interactiva
Quistes de Giardia	Cloro e hipocloritos Cloraminas Dióxido de Cloro Desinfección Interactiva	Cloro e hipocloritos Dióxido de Cloro Desinfección Interactiva
Virus	Cloro e hipocloritos Cloraminas Dióxido de Cloro UV Ozono Desinfección Interactiva	Cloro e hipocloritos Dióxido de Cloro UV Desinfección Interactiva
<i>Cryptosporidium</i>	Dióxido de Cloro Ozono Desinfección Interactiva	Dióxido de Cloro Desinfección Interactiva

Todos los agentes químicos utilizados para la desinfección tienen la función principal de controlar enfermedades de vinculación hídrica e inactivar organismos patógenos para obtener agua potable. Los desinfectantes químicos han permitido una mejor calidad de vida y reducir la mortalidad infantil por enfermedades entéricas, con una eficacia sin precedentes en la historia de la humanidad, por otro lado investigaciones recientes han demostrado que muchos de estos agentes por ser oxidantes fuertes, pueden generar algunos subproductos de desinfección que a pesar de la pequeña concentración, pueden ser dañinos a los usuarios de aguas tratadas y al medio ambiente. La generación de diferentes tipos y concentraciones de subproductos de desinfección depende, principalmente de: tipo de desinfectante, calidad del agua, secuencia del tratamiento, tiempo de contacto, alcalinidad, pH, temperatura, fuerza iónica y catalizadores naturales.



2.4.1 Cloración

El cloro molecular Cl_2 fue descubierto por el químico sueco Karl Wilhem Scheele. A temperaturas y presiones ordinarias es un gas amarillento verdoso, que produce inflamación de las membranas mucosas al inhalarlo, y es muy tóxico. El cloro elemental reacciona con la mayoría de los elementos y compuestos, principalmente los orgánicos. Es explosivo al contacto con algunos compuestos y elementos químicos. Puede almacenarse con seguridad en cilindros de acero, pero en presencia de humedad es altamente corrosivo para los metales.

Propiedades fisicoquímicas

Es un poderoso oxidante, que reacciona con la mayoría de los elementos y compuestos, principalmente con materiales orgánicos. Los atributos más importantes del cloro son su potencia y persistencia germicida de amplio espectro en los sistemas de distribución de agua. Los compuestos basados en cloro son los desinfectantes que presentan mejores propiedades residuales. Dicha protección residual es muy importante ya que previene un nuevo crecimiento microbiano y la recontaminación del agua una vez que ha salido de la planta de tratamiento Gray, NF (1996).

En presencia de humedad, ya sea líquido o gaseoso, es sumamente corrosivo pues reacciona con el agua para formar ácidos hipocloroso y clorhídrico. Por ello se produce el cloro seco, que no contiene más de 150 ppm de humedad; sin embargo se recomienda incluso que ésta sea menor de 50 ppm para evitar problemas de corrosión.

Tabla 2.4 Características físicas del cloro (Fuente: Gray, NF 1996)

Peso específico con respecto al aire	2.49
Su peso específico con respecto a la fase líquida	1.57 g/cm ³
Solubilidad en agua a 20 °C y 1 atm	7.3 mg/L
Temperatura crítica	143.5 °C
Densidad crítica	573 g/ml

Desinfección

El cloro causa dos tipos de daño en las células. Por un lado afecta la integridad de la membrana y ocluye su permeabilidad, y por otro, altera funciones celulares. Por ello la reacción de los microorganismos ante el cloro está determinada por la resistencia de sus membranas así como por la relativa afinidad química de este compuesto con las sustancias vitales del organismo. Para el primer caso, por ejemplo, las bacterias del grupo Coliformes y las del género *Salmonella* son poco resistentes ya que efectúan su respiración en la superficie de la célula, por ello su membrana es muy permeable y poco resistente. En cambio otros microorganismos cuando encuentran condiciones adversas se enquistan y resisten al cloro. Ello ocurre con las amebas cuyos quistes son 100 veces más difíciles de inactivar que *Escherichia coli*.



Por su parte los virus entéricos, como el Echovirus, Cocksakiavirus y Polivirus, también son muy resistentes debido a que poseen una capa de proteínas que los recubre. También es importante considerar que cuando las bacterias como los estafilococos, forman grupos, aquellas que se encuentren en el interior estarán protegidas. Por ello, para que el cloro, y en general cualquier desinfectante actúe, los microorganismos deben estar distribuidos uniforme y libremente en el agua, lo cual se logra por la ausencia de partículas y la agitación del agua Orta, MT; et al (2000)

El método de desinfección con cloro y sus derivados se deberá implementar en tres pasos sucesivos, cada uno de los cuales variará, en mayor o menor grado, según el producto que se va a utilizar:

- Paso 1: Evaluación de la cantidad de cloro que se va a dosificar en la red
- Paso 2: Preparación de las soluciones de los productos no gaseosos
- Paso 3: Calibración del dosificador.

Las variedades comerciales del cloro se obtienen por métodos diferentes y de ellos dependen la concentración de cloro activo, su presentación y estabilidad.

En la tabla 2.5 se muestra la lista de las principales propiedades de cada una de las especies de nuestro interés. Vale en este punto aclarar el concepto de “cloro activo”. “Cloro activo” significa el porcentaje en peso de cloro molecular que aporta un determinado compuesto en cualquier estado; lo que quiere decir que si una solución tiene 10% de cloro activo, ello se debe a que se han burbujado 10 gramos de cloro gas en 100 ml de agua y que el gas se ha absorbido totalmente y sin pérdida en ella.

La solución tiene entonces 10 g de cloro en 100 g de agua (ya que 100 ml son prácticamente 100 gramos) y de allí el “10%”. La palabra “activo” significa que ese cloro está listo para entrar en acción; está pronto y “esperando” para atacar la materia orgánica o cualquier otra sustancia que sea oxidable por él. Christman, K (1998).

Tabla 2.5 Características generales del cloro y sus derivados (Fuente: Adaptada de Deininger, R; Skadsen, J; Sanford, L; Myers, A 1998)

Nombre	Características	% Cloro activo	Estabilidad en el tiempo	Seguridad	Envase usual
Cloro gas	Cloro licuado Cloro gaseoso	99.5%	Muy buena	Gas altamente tóxico	Cilindros de 40 a 70 Kg. Recipientes de 1 a 5 Tn
Hipoclorito de sodio	Solución líquida amarillenta	1 a 15%	Baja perdida	Corrosivo	Diversos tamaños de plástico y vidrio.

En la desinfección por cloración puede emplearse cloro gas (Cl_2), hipoclorito de sodio (NaOCl) o hipoclorito de calcio ($\text{Ca}(\text{OCl})_2$), los cuales son aplicados mediante el burbujeo del cloro gaseoso o mediante dosificadores en forma de disolución. El cloro en cualquiera de sus formas, se hidroliza al entrar en contacto con el agua, y forma ácido hipocloroso (HOCl) de la siguiente forma:

En el caso del cloro gaseoso, la reacción en agua es: $\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}^+ + \text{Cl}^- + \text{HOCl}$

Para el hipoclorito de sodio: $\text{NaOCl} + \text{H}_2\text{O} = \text{Na}^+ + \text{OH}^- + \text{HOCl}$

Durante el proceso químico de desinfección se pueden producir compuestos tales como cloraminas, dicloraminas y tricloraminas en presencia de amoníaco en el agua. Las cloraminas sirven igualmente como desinfectantes aunque reaccionan de manera más lenta. También se forman el ácido clorhídrico (HCl) y los hidróxidos de calcio y sodio, los cuales no participan en el proceso de desinfección. La especie desinfectante es el ácido hipocloroso (HOCl), el cual se disocia en iones hidronios (H^+) e hipoclorito (OCl^-) y adquiere sus propiedades oxidantes: $\text{HOCl} = \text{H}^+ + \text{OCl}^-$ Ambas fracciones de la especie son microbicidas y actúan inhibiendo la actividad enzimática de las bacterias y virus, produciendo su inactivación.

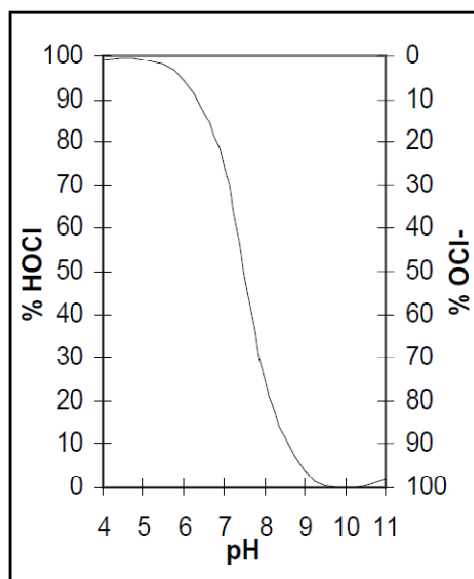


Figura 2.9 Comportamiento de las especies químicas del ácido hipocloroso respecto a variaciones de pH.

Tanto el ácido hipocloroso (HOCl) como el ión hipoclorito (OCl^-) están presentes hasta cierto punto cuando el pH varía entre 6 y 9 (el rango usual para el agua natural). Cuando el valor de pH del agua clorada es 7.5, el 50% de la concentración de cloro presente será ácido hipocloroso no disociado y el otro 50% será ión hipoclorito. Los diferentes porcentajes de HOCl y OCl^- a diferentes valores de pH pueden verse en la Figura 2.9.

En realidad, la eficiencia de HOCl es por lo menos 80 veces mayor que la del OCl⁻. Por esta razón, cuando se monitorea el cloro del agua, es aconsejable medir el pH, ya que esto dará una idea del potencial real bactericida de los desinfectantes presentes. En tal sentido, es importante mencionar que la OMS recomienda para una desinfección adecuada un pH < 8. La turbiedad es otro factor de peso en la desinfección, ya que una excesiva turbiedad reducirá la efectividad por absorción del cloro y, por otro lado, protegerá a las bacterias y virus de su efecto oxidante. Por tal, la OMS recomienda una turbiedad menor de 5 UTN, siendo lo ideal menos de 1 UTN.

Demanda y dosis de cloro

La cantidad de cloro que se va a dosificar equivale a la demanda total de cloro (la cual está estrechamente ligada a la calidad química y microbiológica del agua), a la que debe adicionarse la cantidad de cloro residual esperada en el extremo de la red. Por tanto, antes de llevar a cabo el proceso de desinfección es conveniente realizar ensayos de consumo o demanda inmediata de cloro. Este ensayo se denomina “ensayo de demanda de cloro” Christman, K. (1998)

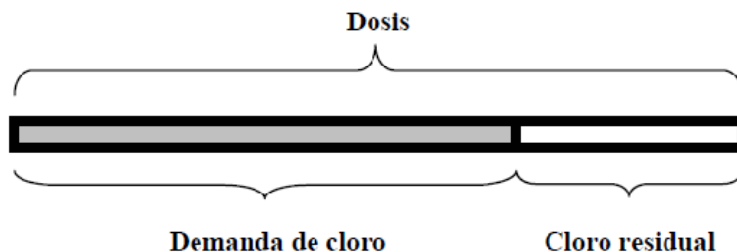


Figura 2.10 Relación Demanda-residual de cloro

Dosificadores

La selección del dosificador o alimentador de cloro depende de tres factores: de las características del producto clorado, la dosis a alcanzar de cloro en el agua y del caudal del agua a desinfectar.

Existen varias maneras de alimentar una solución y los dosificadores se pueden clasificar según su fuerza de impulsión. Así, hay los que trabajan bajo presión atmosférica y los que trabajan bajo presión positiva o negativa. La medición regular de la cantidad de cloro residual permite controlar el funcionamiento del equipo y la ausencia de contaminación en la red de distribución. Por ello, esta medición resulta imprescindible.

Existen varios métodos para medir el cloro residual en el agua, dos de los más sencillos son el método del dietil-para-fenilendiamina (DPD) y de la ortotolidina.



Tabla 2.6 Equipos más usados en la cloración de agua (Fuente: Adaptado de Reiff F, Witt V 1995)

Producto	Equipo dosificador	Ventajas	Desventajas	Rango de servicio
Cloro gas	A presión (directo) Al vacío (venturi o eyector)	Tecnología generalizada en todo el mundo. Producto químico barato. En caso del clorador a presión no se requiere energía eléctrica	Instalación costosa en pueblos pequeños. Necesita equipo auxiliar. El personal necesita capacitación. Si no es operado adecuadamente puede ser peligroso debido a que el gas es venenoso. No es recomendado para sistemas que tratan caudales menores a 500 m ³ /día. En el caso del clorador al vacío requiere de energía eléctrica.	5000 habitantes a grandes ciudades
Solución Na OCl	Bomba de diafragma (positiva)	Sumamente confiable. Sencillo de operar. Uno de los pocos sistemas para trabajar bajo presión. Puede introducir la solución directamente en tuberías de agua presurizada hasta 6kg/cm ² .	El personal debe capacitarse en su operación y mantenimiento. Costo inmediato ha elevado para un sistema rural. Requiere energía eléctrica. A veces hay corrosión en el rotor de la bomba debido al cloro.	2,000 a 300,000
	Dosificador por succión (negativa)	Muy sencillo. La solución más barata para una alimentación en tuberías presurizadas	Requiere vigilancia y mantenimiento para evitar obstrucciones en dispositivo venturi.	

Subproductos de la desinfección con cloro

En un sistema de abastecimiento de agua, la cloración se realiza normalmente al final del tratamiento, después de la etapa de filtración. A ello a veces se le denomina post-cloración.

En ciertos casos se realiza una cloración previa a cualquier otro tratamiento, a la cual se denomina pre-cloración. Esta se lleva a cabo con el propósito de controlar las algas que puedan obstruir los filtros y eliminar el gusto y el olor del agua. En este caso y cuando el agua sin tratar lleva algunos materiales orgánicos llamados “precursores” (materia orgánica, ácidos húmicos, etc.), se pueden generar los subproductos de la desinfección (SPD).

Los constituyentes más característicos de los SPD de la cloración son los trihalometanos (THM). OPS/ILSI (1996)



Costos del Tratamiento

Los costos de los equipos varían según la cantidad y tipo de producto químico que se va a usar, el tipo de control (de requerirse alguno) y las necesidades de instalación.

Tabla 2.7 Costos relativos de los distintos sistemas de cloración (Fuente: Adaptado de Reiff, F; Witt, V 995)

Clasificación	Dosificador	Descripción del equipo	Costos de capital en dólares americanos
Cloro gas	Al vacío	-Dosificador de cloro al vacío, instalado en cilindro, con inyector-difusor	900 – 1200
		-Dosificador automático instalado en la pared	4000
		-Dosificador automático instalado en gabinete	6000
		-Detector de gas instalado en la pared	2000
		-Cilindro de cloro gas	350-400
		-Bomba reforzadora y tuberías	250
Cloro en solución NaOCl	Bomba de diafragma positiva	-Bomba de diafragma con controles eléctricos, tanque de plástico para la solución y tuberías -Hipoclorito de sodio por kilogramo de cloro disponible	700 – 1000
	Dosificadora por succión (negativa)	-Tanque de solución, tuberías y venturi - Hipoclorito de sodio por kilogramo de cloro disponible	200 – 350



2.4.2 Ozonación

El ozono es un fuerte desinfectante con un alto potencial de oxidación. Es producido a partir de aire u oxígeno en fase gas, que contiene típicamente de 1 a 15 % en peso de (o incluso más) de O_3 ; de 12 a 150 g/m^3 (12-150 ppm). El ozono debe ser transferido de la fase de gas a la fase líquida a fin de que pueda reaccionar con diferentes compuestos o microorganismos. Para ello, se utilizan varios dispositivos: columnas de burbujeo, tubo en U profundo, Venturi (Mazzei) entre otros Roustan, M (2007).

La ozonación se considera la tecnología de mayor eficiencia para inactivar todo tipo de patógenos, excluyendo los huevos de helminto. Es uno de los oxidantes más fuertes usado como desinfectante, oxidante y como ayuda en el proceso de coagulación. A nivel mundial, la mayoría de las instalaciones con ozonación son utilizadas para la potabilización de agua. De acuerdo con Rice, G (1999) en Estados Unidos existían del orden de 250 plantas potabilizadoras con sistema de ozonación. Böhme (1999) reportó la existencia de 604 en Alemania, y en Bélgica era considerado como un proceso indispensable, por lo que estaba siendo incluida en todas las instalaciones existentes Kruithof, JC; Masschelein, WJ (1999). En Europa el uso de ozono para la desinfección de agua envasada es la aplicación más conocida y usada industrialmente en la actualidad, Diario Oficial de la Unión Europea (2003). Como desinfectante el ozono se puede aplicar al inicio (desinfección primaria) o al final del tren de tratamiento (desinfección secundaria). En el primer caso sirve para oxidar la materia orgánica precursora de la formación de subproductos orgánicos clorados que ocurre cuando se desinfecta con cloro al final del tratamiento.

El ozono tiene la capacidad de lograr niveles más altos de desinfección en comparación con el cloro o la luz ultravioleta; sin embargo, los costos de inversión así como los gastos de mantenimiento no son competitivos, por lo que, es utilizado con poca frecuencia, principalmente en casos especiales en los cuales otras alternativas no son efectivas. En México el ozono se ha comenzado a aplicar como oxidante en plantas pequeñas de potabilización con problemas de altos niveles de contaminación (orgánica y de color).

En el agua el ozono puede reaccionar de dos maneras (Figura 2.11), como ozono molecular (reacción directa) o vía radical libre, los cuales son más reactivos que el ozono molecular (vía indirecta). En la forma indirecta, los radicales que el ozono genera en el agua son varios. El principal es el radical hidroxilo OH, que es muy reactivo por tener un electrón desapareado. Especialmente en sistemas acuosos, ambos tipos de reacción ocurren simultáneamente. El número de reacciones indirectas que ocurren sobre las reacciones directas depende de varios factores: tipo de impurezas o contaminante presentes, el pH, la temperatura, la presencia de inhibidores de la formación de radicales libres y de la fuerza iónica del medio acuoso. La cinética de reacción del ozono es compleja debido a la forma en que este reacciona con los diferentes compuestos que están presentes en el agua, por la especiación del ozono y sus productos de descomposición, así como por la interacción de éstos con los microorganismos.

El tipo y la cinética de descomposición del ozono tienen consecuencias sobre el mecanismo de desinfección. Si la descomposición del ozono es lenta, los compuestos químicos (y microorganismos) se someterán al ataque directo del ozono; estas reacciones son selectivas y lentas. Por otra parte, si la descomposición del ozono es rápida, la cual se produce cuando la alcalinidad es baja, y / o la concentración de compuestos orgánicos es alta, entonces se producirá oxidación por medio del radical OH, que es muy reactivo y poco selectivo. Los estudios con *E. coli* y *Giardia muris* sugieren que estos organismos sufren una mayor inactivación cuando el ozono se mantiene en forma estable en medio acuoso, a diferencia de cuando se descompone rápidamente (Gehra, R; et al 2003).

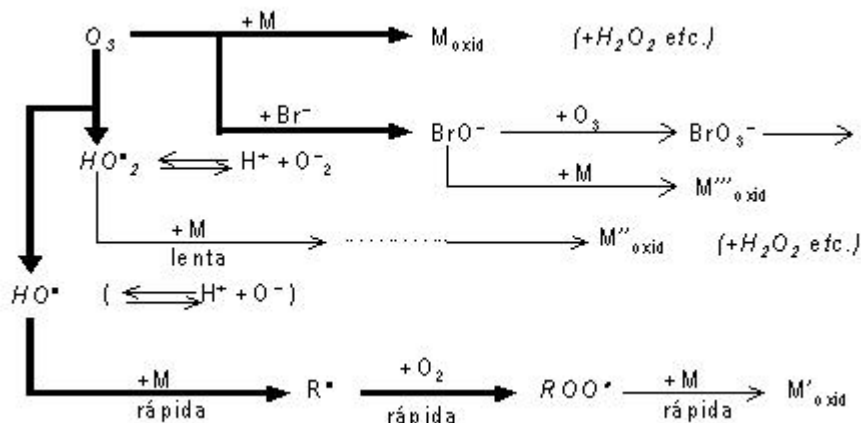


Figura 2.11 Reacciones del ozono en agua

Propiedades del ozono

A presiones y temperaturas ambiente, el ozono se produce como un gas inestable, ligeramente más pesado que el aire, y con un olor desagradable característico, detectable fácilmente por las características olfativas humanas. Es un poderoso agente de oxidación y desinfección. Debido a sus cualidades oxidantes, puede degradar muchos materiales (por ejemplo, goma natural y muchos plásticos) si no se aplica con cuidados de ingeniería. De igual manera, debido a su naturaleza oxidante, no debe ser respirado por humanos, aunque, a diferencia de los gases de cloro, el ozono no es un veneno sistémico, ni causa cáncer en humanos o animales. El ozono es sólo parcialmente soluble en agua. Concentraciones de hasta 2-5 mg/L de ozono en agua pueden alcanzarse confiablemente, y se han reportado concentraciones de 10-15 mg/L. En agua muy pura (destilada tres veces), el ozono tiene una vida media relativamente corta en el agua, generalmente menor a los 30 min a 20°C, Deininger, R; et al (1998). En aguas que contienen impurezas oxidables, como las que ingresan a las plantas de tratamiento, la vida media del ozono puede durar sólo unos pocos segundos – debido a la demanda de oxidante de tales impurezas. De manera general, los tiempos de reacción del ozono en el agua son rápidos, comparado a los niveles de reacción en la fase gaseosa. Sin embargo, conforme el contenido húmedo (humedad relativa) del gas incrementa, los tiempos de reacción con el ozono incrementan rápidamente.



Ventajas del uso de ozono

- ✓ El Ozono es más eficaz que el cloro en la destrucción de los virus y las bacterias.
- ✓ El proceso de ozonización utiliza un tiempo de contacto corto (tiempo aproximado de 10 a 30 minutos).
- ✓ No hay residuos nocivos que necesitan ser eliminados después de la ozonización, porque el ozono se descompone rápidamente.
- ✓ Después de ozonización, no hay recrecimiento de microorganismos, con excepción de los protegidos por las partículas en las aguas residuales.
- ✓ El ozono es generado in situ, y por lo tanto, son menores los problemas de seguridad relacionados con su manejo y envío.

Desventajas del uso de ozono

- ✓ Las dosis bajas no pueden inactivar de manera efectiva algunos virus, esporas y quistes.
- ✓ La ozonización es una tecnología más compleja que el cloro o la desinfección UV, que requieren equipos complejos y eficientes.
- ✓ El ozono es muy reactivo y corrosivo, por lo tanto requiere materiales resistentes a la corrosión tales como el acero inoxidable.
- ✓ La ozonización no es económica para aguas residuales con altos niveles de sólidos suspendidos (SS), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), de la demanda química de oxígeno (DQO), o Carbón Orgánico Total (COT).
- ✓ El ozono es extremadamente irritante y posiblemente los gases tóxicos, por lo que debe de ser destruido para evitar la exposición de los trabajadores.
- ✓ El costo del tratamiento puede ser relativamente alto en el capital de inversión.

Usos del ozono

Después de 162 años de su descubrimiento y 94 años después de su primer uso comercial como tratamiento para el agua potable en Niza, Francia, el ozono tiene un número amplio de aplicaciones, generalmente catalogadas como se observa a continuación Rice, RG (2002)

- ✓ Potabilización de agua para consumo humano
- ✓ Tratamiento de aguas residuales
- ✓ Tratamiento de albercas
- ✓ Tratamiento de agua de torres de enfriamiento
- ✓ Desinfección de bebidas y aguas embotelladas
- ✓ Procesamiento de comida y productos agrícolas
- ✓ Control de olores
- ✓ Tratamiento de lixiviados de basureros municipales
- ✓ Tratamiento de aceites usados
- ✓ Tratamientos basados en la “Oxidación Avanzada del Ozono”
- ✓ Tratamiento de aire en interiores



Producción de ozono

El ozono puede ser producido por tres métodos:

- ✓ Fotoquímico
- ✓ Electrolisis del ácido sulfúrico
- ✓ Corona de descarga.

Generación por radiación UV (Fotoquímico).

La generación fotoquímica del ozono ocurre naturalmente en la troposfera de la tierra, debido a la radiación UV del sol, que se incorpora a la atmósfera de la tierra. Las moléculas de oxígeno se descomponen en átomos de oxígeno, y la combinación subsiguiente de un átomo de oxígeno con una molécula de oxígeno produce una molécula de ozono, de la misma manera que en la generación del ozono por descarga de corona. Los fabricantes de lámparas ultravioletas emplean esta generación natural de ozono, pero en escala mucho más pequeña. El ozono generado por radiación UV es producido en concentraciones pequeñas (menos de 0,2% por el peso), en output bajo, y en gastos de electricidad más grandes que por descarga de corona. DuRon, B (1982) demuestra que la cantidad máxima de ozono que se puede generar por KWH de energía aplicada usando una lámpara de mercurio de baja presión optimizada para una radiación de 185-185-nm es de 1.94 g/h. A pesar de lo poco efectiva que es la generación y las bajas concentraciones de ozono que se obtienen por radiación UV, algunos usos del ozono pueden ser rentables. No obstante, este método de generación sigue siendo económicamente práctico sólo para usos en pequeña escala.

Generación por electrólisis de agua.

Las dos ventajas principales de este método son el hecho de que no se requiere de un gas de alimentación y se pueden generar concentraciones mayores de ozono (hasta 50%). En este caso se han desarrollado ciertos electrólitos acuosos de fluoración, a través de los cuales las moléculas de agua se pueden oxidar electroquímicamente a ozono a temperaturas cercanas al ambiente. Los avances en la selección del material del ánodo también han contribuido a la posibilidad de la electrólisis a temperaturas ambiente. En estudios iniciales, la eficiencia actual en la generación de ozono había sido observada sólo a temperaturas muy bajas en el electrolito (o superficie del ánodo); la operación a tales temperaturas (-20 a -60 C), además de requerir la refrigeración, no permite la reducción del oxígeno como proceso catódico durante la electrólisis. La cinética de la reducción del oxígeno del aire llega a ser muy pobre conforme disminuye la temperatura. La evolución del hidrógeno había sido considerada como el único proceso catódico disponible, aunque teóricamente se requieren 1,23 V adicionales del potencial de la célula. En su etapa de desarrollo actual, esta tecnología ha encontrado uso comercial sólo en escala reducida, sobre todo cuando se requiere agua ultrapura (en la electrónica, y quizás en la industria farmacéutica).

La generación de ozono por electrólisis es menos eficiente que por descarga de corona. Por otra parte, la limpieza del producto ozono / oxígeno (libre de los óxidos del nitrógeno) y las altas concentraciones (de hasta 50%) continúa animando los progresos comerciales. Por otro lado, las mezclas de ozono / oxígeno, libres de óxidos de nitrógeno, y a concentraciones de 12-16% de ozono se pueden producir por descarga de corona hoy en día, en escalas de toneladas por día, usando oxígeno de alta pureza como gas de alimentación. Rice, RG (1996).

Generación por corona de descarga.

Los elementos principales de generación por corona de descarga son:

- ✓ Una fuente de poder que proporciona la energía necesaria, aplica un voltaje alto (6,000-20,000 V) a dos electrodos y este voltaje produce un arco. En el arco, parte del O_2 se transforma en O_3 .
- ✓ Un material dieléctrico para evitar los cortocircuitos.
- ✓ Un mecanismo para disipar el calor que se genera, el cual es un subproducto de la reacción exotérmica que produce el ozono.

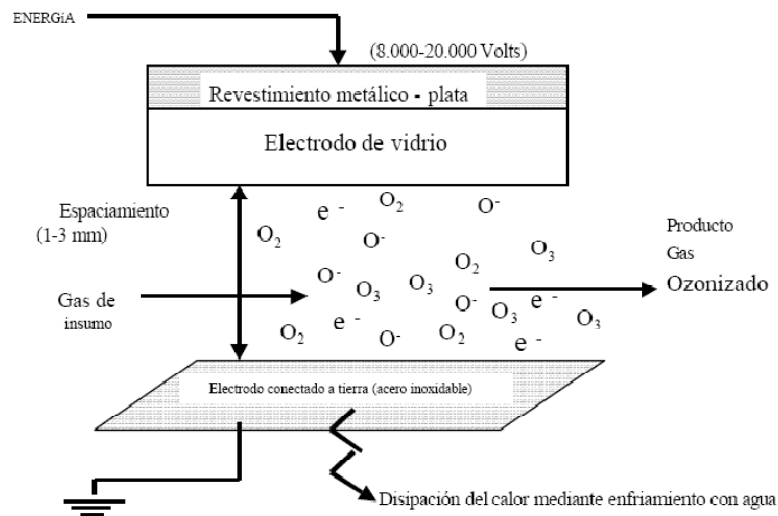


Figura 2.12 Producción de ozono por corona de descarga.

El diseño del sistema de generación de ozono debe prevenir la descomposición del ozono después de la generación, transfiriendo el calor asociado al proceso a un líquido de enfriamiento (generalmente agua). El sistema eléctrico del generador debe controlar el intervalo de energía requerido para cada celda sin exponer al mismo sistema y el ambiente circundante a voltajes excesivos. El generador de ozono se debe diseñar para resistir los efectos corrosivos del ozono. La fuente de poder debe permitir la regulación exacta de energía, limitar la pérdida de electricidad, y funcionar dentro de niveles predeterminados de energía.

A través de los años, se han desarrollado y comercializado distintos generadores de ozono por corona de descarga los cuales se pueden clasificar por su capacidad de producción: pequeños (de hasta 1 g/h), mediano y grande (de 908 kg/día a partir de oxígeno altamente puro). También se pueden clasificar por la geometría de la corona de descarga: aquellos de tubo concéntrico y de placa plana. Estos diseños de generadores también se clasifican por el intervalo de frecuencia a los cuales trabajan.

- ✓ Frecuencia baja 50-60 Hz
- ✓ Frecuencia media > 60 Hz hasta 1,000 Hz
- ✓ Frecuencia alta > 1,000 Hz, hasta cerca de 2,000 Hz

Las frecuencias de funcionamiento tienen características específicas y requisitos especiales que se deben revisar y evaluar por el ingeniero de diseño de procesos que considere el uso de ozono. Estos diseños de generador de ozono difieren en cuanto a configuración, geometría de la corona de descarga, frecuencia a la que funciona, fuente de poder, sistemas de enfriamiento y usos típicos. El ozono generado por descarga de corona es económicamente práctico para aplicaciones de escalas pequeña, mediana y grande.

Sistema de desinfección con ozono

Un diagrama del proceso de ozonación se muestra en la Figura 3.5. EPA (1999). Los componentes básicos de un sistema de desinfección con ozono incluyen: La preparación del gas de alimentación, el generador de ozono, la cámara de contacto (contactor o reactor) gas-líquido y la unidad de destrucción de ozono.

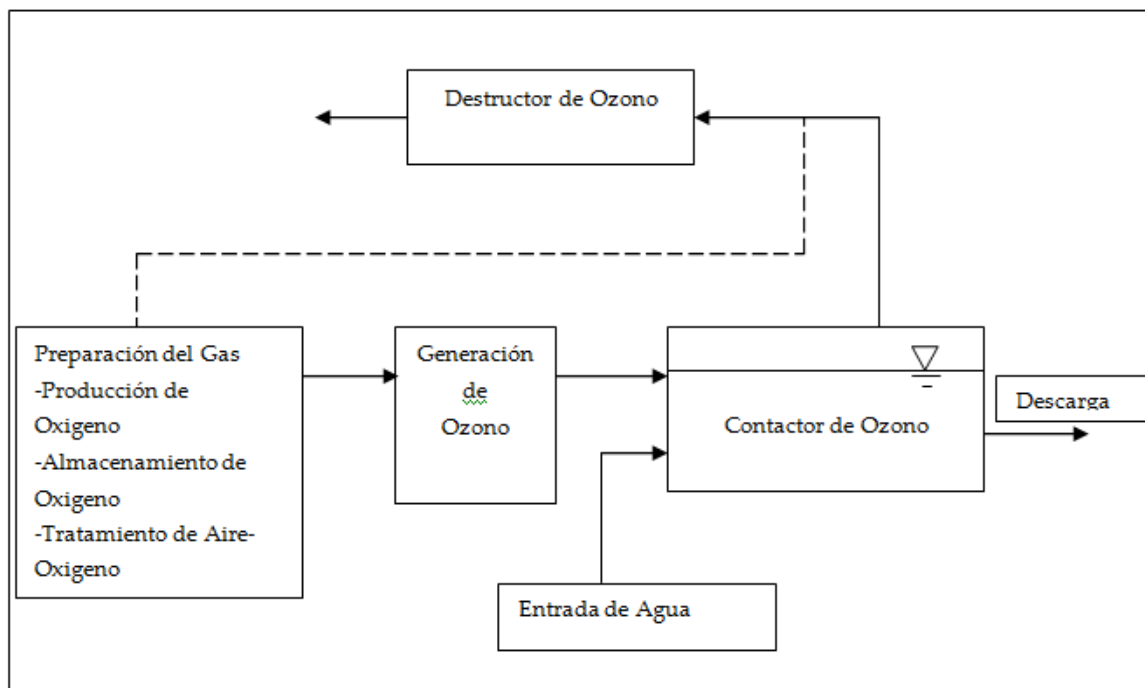


Figura 2.13 Sistema de Ozonación

Preparación del gas de alimentación.

Este paso es fundamental pues afecta el rendimiento de producción. Durante la descarga eléctrica, el N_2 del aire se oxida y forma N_2O_5 el cual si hay agua en el ambiente se hidroliza y forma ácido nítrico (HNO_3) resultando corrosivo para el sistema. La calidad y la concentración del ozono producido dependen directamente del secado del aire de alimentación Vázquez, RP (1996). En la tabla 2.8 se presentan los tipos de compresores utilizados para la alimentación del gas de alimentación.

Tabla 2.8 Características de los compresores utilizados para la alimentación de aire (Langlais, B; et al 1991)

Tipo de Compresor	Intervalo de capacidad (L/s)	Presión de descarga (kg/cm^2)
Anillos líquidos	47-297	0.3 – 2.5
Aspas	0-53	7.0 – 10.2
Rotatorio	47-236	0.6 – 0.8
Centrifuga	472-583	0.6 – 1.0
Cilindro rotatorio	472-611	1.4 – 3.2

La cantidad de ozono producido en kg/h depende del gasto de aire alimentado y su calidad (Seco y libre de impurezas). Estos parámetros son de mayor importancia que la variación del voltaje o amperaje. En especial la pureza del aire importa, pues la presencia de hidrocarburos a concentraciones mayores a 1% en volumen inhibe la formación del ozono.

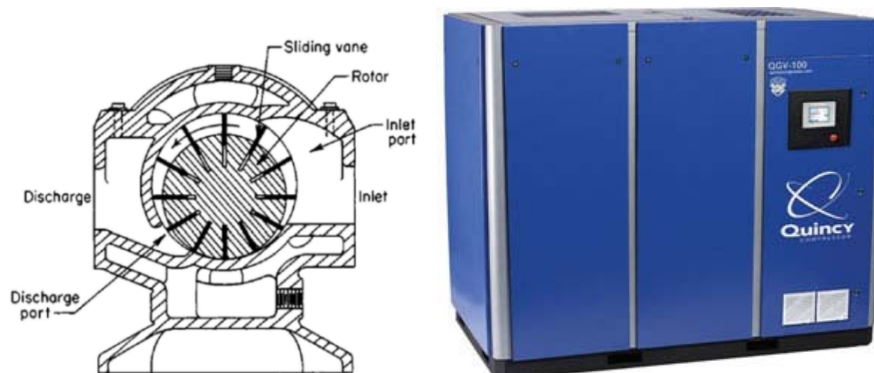


Figura 2.14 Compresor de aspas

Generadores de ozono

El sistema eléctrico varía de un fabricante a otro. En cuanto al sistema de enfriamiento es recomendable que la temperatura del agua de entrada se encuentre entre 15 y 20 °C. Los generadores corona operan con aire que pasa por un compresor, filtros y secadores. La presión de alimentación no debe variar en $\pm 0.14 \text{ Kg/cm}^2$ para una presión normal de 0.7 Kg/cm^2 .

El consumo y la capacidad de los generadores de ozono son directamente proporcionales al voltaje y a la frecuencia. Las fuentes de energía eléctrica de baja frecuencia (50 a 60 Hz) y alta tensión (> 20,000 voltios) son las más comunes. En la tabla 2.9 se clasifican los generadores de acuerdo al voltaje que manejan. Generalmente en las plantas de tratamiento de agua se usan frecuencias bajas (50-60 Hz) o medias (700-800 Hz). Los voltajes que se aplican dependen de las especificaciones del fabricante. Como ejemplo, un generador que opere a 60 Hz requerirá de 27 kV.

Tabla 2. 9 Clasificación de los generadores de ozono por corona de descarga (Bryant, EA; et al 1992).

Tipo de Generador	Frecuencia (Hz)	Voltaje (kV)	Producción de Ozono (g/h)
Baja frecuencia	50-60	10-20	*5-90 *5-30
Frecuencia media	700-800	8-14	*70-245
Alta frecuencia	2000-3000	8-10	*80-720

A continuación se presentan en las Figuras 2.15 y 2.16 generadores de baja frecuencia.



Figura 2.15 Generador de Ozono de la gama OZVa (Fuente: Prominent México)



Figura 2.16 Generador de Ozono de la gama OMVa (Fuente: Prominent México)



Cámaras de contacto y difusores

El ozono producido debe ser transferido de la fase gas a la líquida para llevar a cabo el tratamiento del agua. Esta transferencia de masa es la principal limitante del proceso y se requiere transportar una cantidad máxima en el menor tiempo posible para minimizar la obra civil y reducir los costos. Para llevarla a cabo se emplea una unidad denominada cámara de contacto que varía en términos del diseño, las condiciones de operación y el punto de introducción del ozono. En algunos casos, el generador de ozono es el que determina el tipo de la cámara de contacto. La concentración requerida de ozono determina el tamaño y la geometría del sistema de contacto Langlais, B; et al (1991).

Una parte clave es el contactor (difusor), el cual es función del objetivo del tratamiento como se señala en la tabla 2.10. Los más usados son los difusores porosos de burbuja fina, debido a que no requiere energía adicional ya que se aprovecha la que se genera al comprimir al aire.

Tabla 2.10 Tipos de contactores de ozono (Fuente: Adaptado de Roustan, M 2007)

Tipo de contactor	Características
Contactor convencional con difusor de burbuja fina	Dispersión de burbujas de 2 a 3 mm por placa porosa Diferentes modalidades de deflector, simple o doble Número de cámaras de 2 a 6 Altura del agua de 4 a 7 m Tiempo de residencia de 6 a 20 minutos Rango de volumen de 80 a 500 m ³ Eficiencia de transferencia de masa del 75 al 92%
Contactor de Turbina (Tipo Kerag)	Utiliza un propulsor giratorio con base perforada El ozono se introduce por el fondo Cámaras de contacto múltiples (hasta 4)
Inyectores GDT	Efecto Venturi en el dispositivo de inyección Generación de una emulsión fina Recipiente de reacción Separador de desgasificación
Tubo profundo en U	Tubos verticales concéntricos Altura de 20 a 30 m Diámetro del tubo exterior de 1 a 4 m Tiempo de residencia de 2 a 6 minutos Eficiencia del 95%

En las Figura 2.17 se muestra una cámara de contacto convencional con dos cámaras para aumentar la transferencia de masa, en la Figura 2.18 aparece un sistema de la empresa Mazzei que consta de un dispositivo de inyección con efecto venturi. Aunque existen gran variedad de cámaras de contacto solo se incluyeron aquellas que se utilizan para tratar agua para consumo humano.

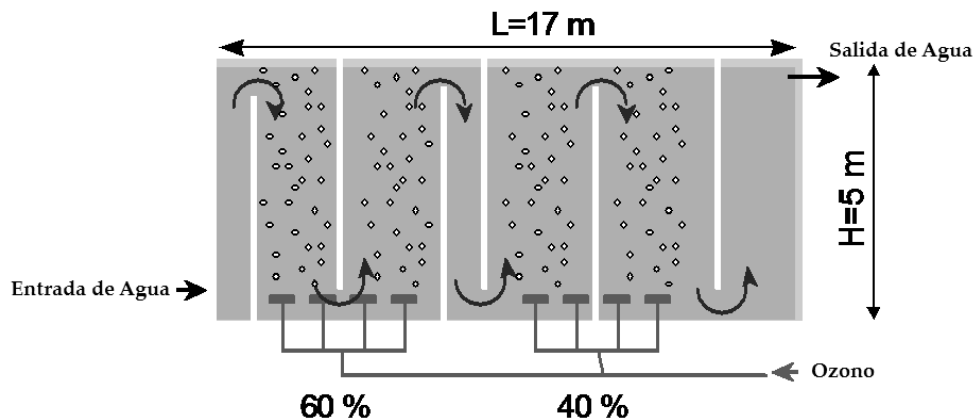


Figura 2.17 Contactor convencional de burbuja fina

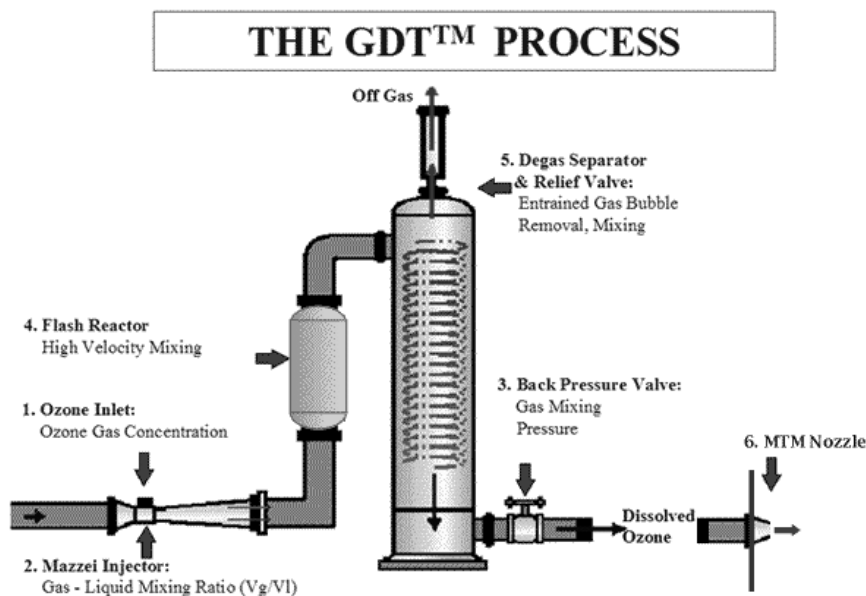


Figura 2.18 Contactor Mazzei

En la Figura 2.19 se muestra un empaque para conexión sanitaria tipo triclamp con maya difusora. Proporciona un sistema de aireación a sistema de abastecimiento de agua de alta pureza, se puede utilizar para difundir gases como el sulfuro de hidrógeno y el dióxido de azufre o para introducir ozono y oxidantes para destruir bacterias y químicos orgánicos.

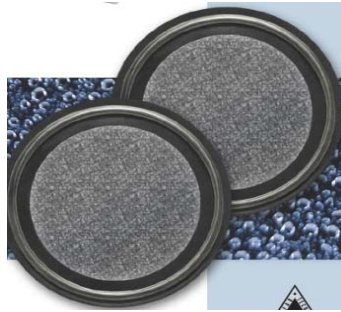


Figura 2.19 Difusor poroso de burbuja fina

Por otra parte en la tabla 2.11 se incluye un listado de los difusores.

Tabla 2.11 Tipo de difusor por aplicación (Fuente: Adaptado de: Orta, MT; et al 2000)

Tipo de difusor	Aplicación
De burbuja fina multi etapas, o estático de burbuja	Desinfección primaria y secundaria
Poroso de burbuja fina	Eliminación de hierro y manganeso
Tipo Inyector o de burbuja fina	Eliminación de color
De burbuja fina multi etapas	Eliminación de olor y sabor
Tipo Kerag	Eliminación de algas
Cualquiera	Remoción de partículas

Destrucción del gas residual

Debido a que la eficiencia de transferencia del ozono es menor al 100% y que este no puede ser descargado directamente a la atmósfera por ser contaminante, es necesario destruirlo (Orta, MT 2000). Por ejemplo con un 90% de transferencia, el 3% sale del contactor con una concentración de 3mg/L de O_3 . El ozono se destruye rápidamente a altas temperaturas (Mayores a 350°C) o con un catalizador por encima de los 100°C para evitar la acumulación de humedad. La unidad de destrucción del ozono se diseña para reducir la concentración a 0.1mg/L de O_3 que es el límite actual de la OSHA establecido para los trabajadores en un periodo de 8 horas EPA (1999).

Existen 3 formas de eliminar el Ozono Geering, F (1995)

- ✓ Térmica
- ✓ Catalítica
- ✓ Adsorción en carbón activo

Térmica.

Ocurre en un intercambiador eléctrico de calor. Es el más fácil y seguro de operar. Consiste en incrementar la temperatura entre 300 y 350 °C durante 5 segundos. A temperatura ambiente la vida media del ozono varía de 20 a 100 horas en aire seco, mientras que a 250°C es de solo 0.04 a 0.4 segundos.



Figura 2. 20 Destructor de ozono térmico

Catalítica.

Es el método más reciente y común en Estados Unidos, emplea catalizadores de Paladio, manganeso u óxidos de Níquel colocados sobre un soporte. Por ejemplo, el del Paladio se fija en gránulos de aluminio. Los catalizadores reversibles pueden ser reactivados cada 5 años con óxidos de nitrógeno, compuestos de cloro o sulfitos. La generación se hace calentando a la temperatura recomendada por el fabricante, generalmente de 500°C de 6 a 7 horas. Un problema que existe son los catalizadores gastados ya que representan un problema ambiental.

Adsorción sobre carbón activado.

Este método es poco usado en plantas grandes por motivos de seguridad y por el intenso mantenimiento que requiere. Hoy en día no es recomendable ni para pequeñas plantas. El ozono reacciona con el carbón activado seco generando una cantidad considerable de calor que destruye el ozono y se consume lentamente. Esta combustión resulta en la formación de partículas finas de carbón que son explosivas, por lo que el método es peligroso y difícil de monitorear (Orta Ledesma M. T. Junio 2000).



Figura 2. 21 Destructor de ozono catalítico



Figura 2. 22 Destructor de ozono por adsorción en carbón activado (Fuente: Prominent España)



Operación y Mantenimiento

La generación de ozono utiliza una cantidad significativa de energía eléctrica. Por lo tanto, la atención debe ser constante para garantizar el rendimiento de la desinfección. No debe haber fugas en las conexiones que rodean al generador de ozono. El operador deberá vigilar regularmente las subunidades para garantizar que no se calienten. El operador deberá comprobar si hay fugas de forma rutinaria, ya que una fuga por muy pequeña que sea puede causar inaceptables concentraciones de ozono en el ambiente.

El equipo de monitoreo de ozono deberá ser probado y calibrado según lo recomendado por el fabricante. Así como el oxígeno, el ozono es poco soluble y se descompone más rápidamente en el agua que en el aire. Este factor, junto con la reactividad del ozono, requiere que el Contactor de ozono estar bien cubierto y que el ozono que se difunde en las aguas tenga la mayor eficacia posible.

El ozono en estado gaseoso, es explosivo, una vez que llega a una concentración de 240 g/m³. Como la mayoría de los sistemas de ozonización no exceden de un ozono gaseoso de concentración de 50 a 200 g/m³, esto generalmente no es un problema. Sin embargo, el ozono en estado gaseoso, sigue siendo peligroso para una cantidad significativa de tiempo por lo tanto, se debe extremar precaución en el funcionamiento de los sistemas de gas de ozono.

Es importante que las tuberías de la descarga del gas en el generador de ozono, del Contactor, y las del destructor sean purgadas antes de arrancar el sistema o subsistema. El operador debe ser consciente de todos los procedimientos operativos de emergencia necesarios, si se produce un problema EPA (1999).

Todos los equipos de seguridad deben estar disponibles para los operadores en caso de una emergencia. Los parámetros de control incluyen:

- ✓ Gas de alimentación con un punto de rocío de -60 °C (-76°F), o inferior, debe ser entregado a la generador de ozono. Si el suministro de gas está húmedo, la reacción de ozono y la humedad producirá un condensado muy corrosivo en la interior del ozonizador. La salida del generador podría reducirse por la formación de óxidos de nitrógeno (como el ácido nítrico).
- ✓ Mantener el flujo requerido del líquido de refrigeración en el generador (aire, agua u otro líquido).
- ✓ Lubricar el compresor o ventilador de acuerdo a las especificaciones del fabricante. Asegúrese de que todas las juntas de los compresores estén en buenas condiciones.
- ✓ Operar el generador de ozono dentro de sus parámetros de diseño. Revise regularmente y limpie el ozonizador.
- ✓ Controle el flujo de gas ozono y su distribución en el sistema para garantizar que entre en contacto el volumen necesario y suficiente en las aguas residuales
- ✓ Mantener los niveles de ozono por debajo de los límites de las normas ambientales de seguridad aplicables.

Costos de la Desinfección con Ozono

El desarrollo estimado del costo de: capital y de operación son componentes claves para el diseño de un sistema de ozonación. La estimación de los costos de capital muestra dificultad debido a que son muchos los factores que intervienen, tales como la instrumentación y automatización, costos de la construcción del lugar, la cantidad de tubería de acero inoxidable (distancia entre el equipo), y otros factores. Estas tablas de 13 años de antigüedad han sido la base para la estimación de los costos del capital para un sistema de ozonación.

Sin embargo a pesar de la inflación producida a través de los años, los costos de capital de un sistema de ozonación han bajado y las tablas aun se consideran una buena aplicación. Los costos estimados de operación son generalmente mejores que los costos estimados del capital, porque el precio de la energía (\$/Kwh) y el oxígeno líquido (\$/lb O₂) pueden ser obtenidos en sitios específicos de cada aplicación, en general la energía usada en un sistema de ozono puede ser estimada considerando que el consumo de energía del generador tienen una contribución menor a la demanda eléctrica (del 5 al 10%).

Los costos estimados para un sistema de ozono pueden ser obtenidos con la Figura 2.23 la cual puede ser usada de dos formas. Una es utilizar el formulario (ver referencia) para hacer el desarrollo de los costos estimados de manera independiente, que considere los factores del lugar donde se colocaran los equipos, la ingeniería de diseño, construcción, inspección y otros costos.

La segunda forma es usar el formulario junto con la Figura descrita en el siguiente apartado, para obtener una orden de magnitud de los costos estimados Kerwin, LR (2005), utilizada para estimar los costos en el capítulo 4.

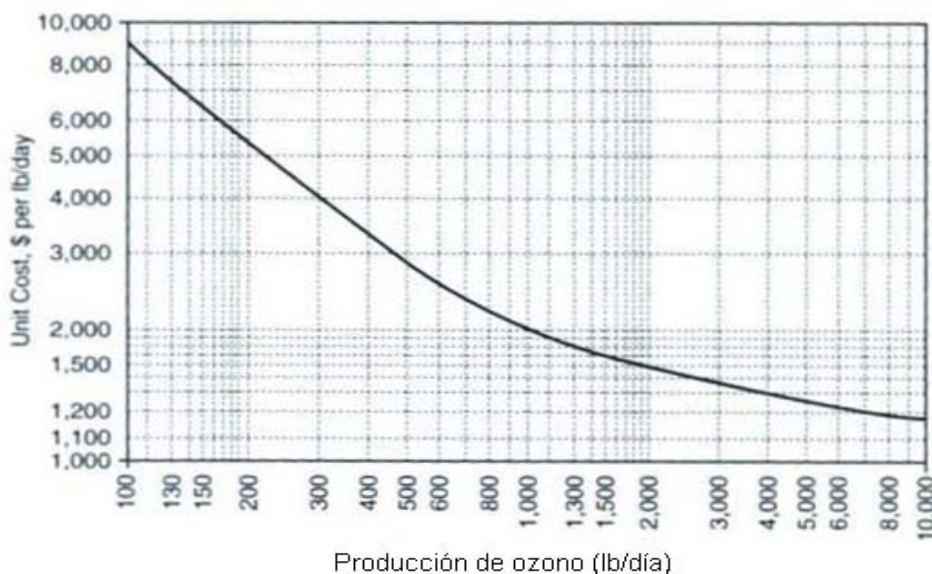


Figura 2.23 Estimación de costos del generador de ozono (Fuente: Kerwin, LR 2005)



2.4.3 Desinfección Combinada

Este concepto implica aprovechar el efecto sinérgico de dos o más desinfectantes, pues se sabe que uno puede fallar, por ejemplo contra protozoarios y organismos resistentes. Como se mencionó anteriormente, ciertos desinfectantes (por ejemplo ozono, peróxido o dióxido de cloro en ciertas situaciones), a pesar de ser eficientes, no conservan un residual por largo tiempo o tienen bajo CT. Por tanto una desinfección secundaria para estabilizar la población microbiana en el sistema de distribución, solo puede ser alcanzada por una combinación de desinfectantes (Luis, AD 2001)

Tabla 2.12 Combinación de desinfectantes para agua cruda (Fuente: Adaptado de Luis, AD 2001)

Combinación Primario / Secundario	Aplicación	Comentarios
Cloro / Cloraminas	Aguas crudas de medio potencial de formación de trihalometanos	Cloro para desinfección Cloraminas para controlar formaciones de subproductos
Dióxido de cloro / Dióxido de cloro	Alta producción de subproductos. Filtración para eliminar <i>Cryptosporidium</i> . Baja demanda de ClO ₂	Requiere dosis bajas de ClO ₂ para limitar la formación de cloritos y cloratos
Dióxido de cloro / Cloraminas	Aguas crudas con alta formación de trihalometanos. Filtración para eliminar <i>Cryptosporidium</i> .	Dosis mínima de ClO ₂ para cloritos y cloratos. Cloraminas para el residual.
Ozono / Cloro	Formación moderada de subproductos en aguas de bajo potencial de formación de trihalometanos	Desinfección con alta eficiencia. Baja formación de trihalometanos y cloro residual.
Ozono / Cloraminas	Formación moderada de subproductos en aguas de alto potencial de formación de trihalometanos	Desinfección con alta eficiencia. Baja formación de trihalometanos y cloro combinado.



CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO, DESINFECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE AGUA DE SUMINISTRO EN CIUDAD UNIVERSITARIA.

3.1 Abastecimiento

El agua de abastecimiento en Ciudad Universitaria es de origen subterráneo y se obtiene a partir de tres pozos de extracción (Figura 3.1), con diferente capacidad de operación, mismos que se identifican de acuerdo a su ubicación dentro del Campus: pozo de Facultad de Química (31 L/s; pozo 1), pozo Multifamiliar (89 L/s; pozo 2) y pozo Vivero Alto (45 L/s; pozo 3).

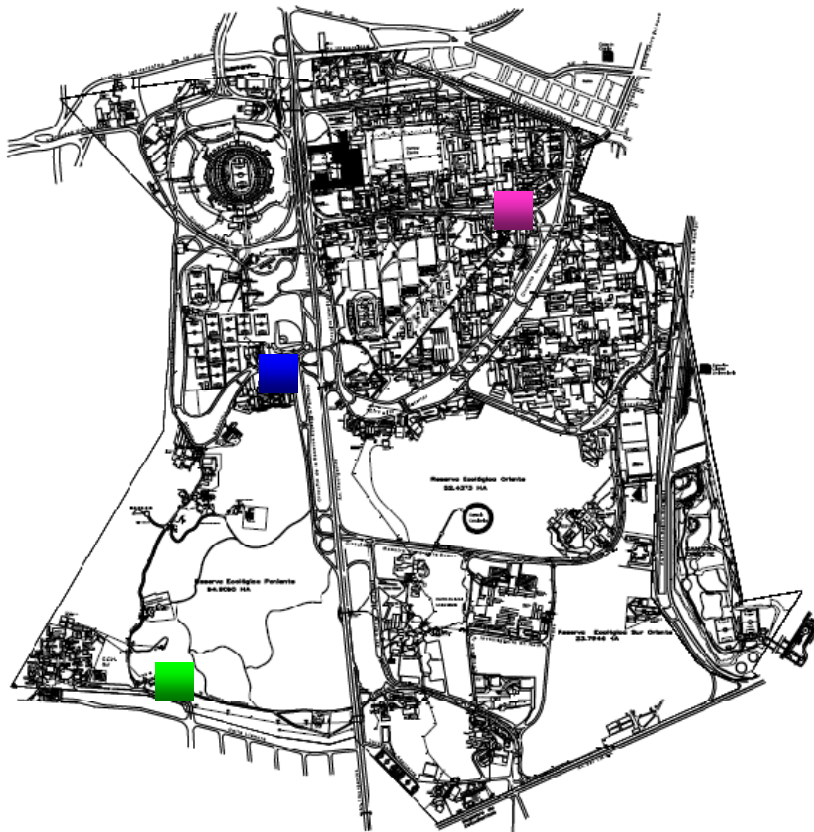
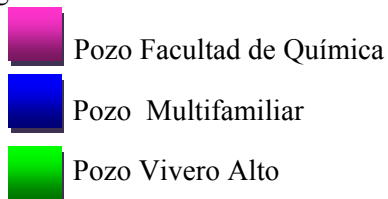


Figura 3.1 Plano de Ciudad Universitaria, UNAM (Fuente: PUMAGUA 2008)



Los volúmenes de extracción registrados durante 2007 y 2008 se resumen en las Figuras 3.2 a 3.3. Se observa que existen diferencias marcadas, entre los pozos y los meses del año, con respecto a los volúmenes de agua que se extraen. Esto se atribuye entre otras causas a la capacidad de operación de los pozos y a la demanda de agua que se tienen durante el año. También es notable que la mayor cantidad del líquido se obtiene del pozo Multifamiliar (pozo 2), del orden de 1.5 Mm³ en el 2007 y de 2.0 Mm³ para el 2008.

La demanda de agua es mayor en los meses de enero a mayo, posteriormente disminuye en el periodo de lluvia, junio y julio, y después vuelve incrementarse a partir del mes de agosto. Haciendo un balance global, de 2007 a 2008, el volumen de extracción total de agua registró un incremento al pasar de 2.50 Mm³/año a 2.93 Mm³/año.

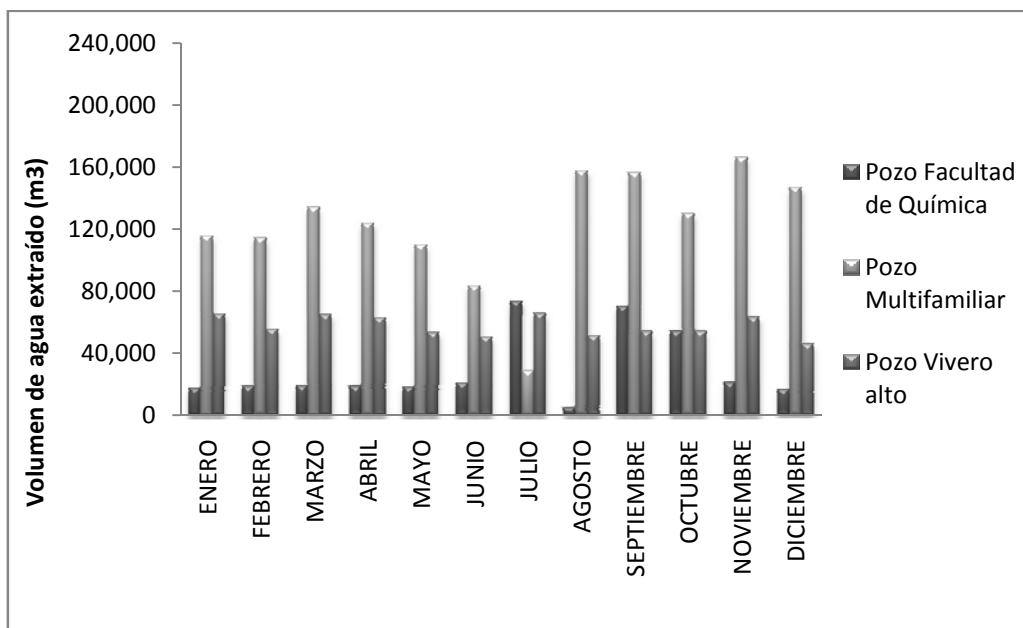


Figura 3.2 Extracción de agua de pozos de abastecimiento durante el 2007 (Fuente: Gráfica construida a partir de datos históricos publicados en PUMAGUA 2008).

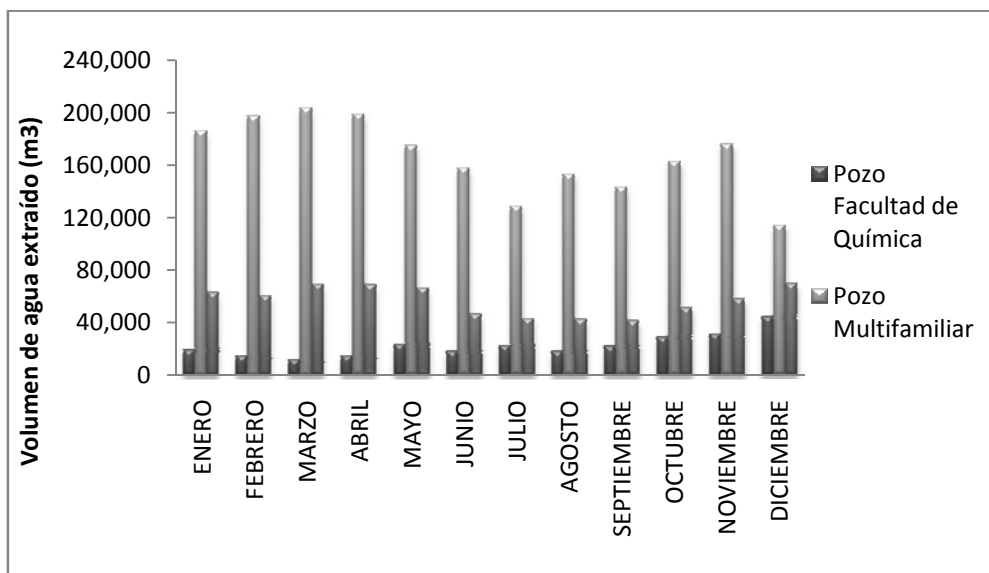


Figura 3.3 Extracción de agua de pozos de abastecimiento durante el 2008 Fuente: Gráfica construida a partir de datos históricos publicados en PUMAGUA 2008)



3.2 Red de distribución

En la tabla 3.1 se muestran la longitud y el diámetro de la tubería que componen la red de distribución del agua que se extrae de los pozos y se envía a los tanques de almacenamiento, y que posteriormente llega a cada punto de consumo. Estos datos fueron proporcionados por el grupo de Balance Hidráulico del proyecto PUMAGUA quienes se apoyaron con personal de la Dirección General de Obras y Conservación (DGOyC) de la Universidad para hacer los levantamientos y revisión de los registros que se tienen sobre la instalación de dichas tuberías. Es importante conocer los diámetros y las longitudes de la tubería para calcular la velocidad, y el tiempo de llegada del agua a cualquier punto de la red, para que de esta manera se dosifique la cantidad de cloro que pueda conservar un residual durante este tiempo.

Tabla 3.1 Diámetros y longitudes de tubería de la red de distribución de agua (Fuente: PUMAGUA 2008)

Diámetro [in]	Diámetro [mm]	Longitud (m)
20	5,080	332.70
12	3,048	5,461.60
10	2,540	4,313.30
8	2,032	12,560.50
6	1,524	7,093.70
4	1,016	11,871.30
3	762	4,411.20
2 1/2	635	400.30
2	508	4,935.60
1 1/2	381	556.20
1	254	1,667.30
	Total	53,603.70



La tabla 3.2 muestra los materiales de la tubería que componen la red de distribución. La finalidad de saber de qué material están fabricadas las distintas tuberías, es para evitar corrosión o degradación de éstas por el efecto del cloro u ozono.

Tabla 3.2 Material de la tubería en la red de distribución de agua potable (Fuente: PUMAGUA 2008)

Material	Longitud (m)
Acero	25,642.90
Asbesto	11,785.30
Fierro Fundido	9,622.70
PVC	6,552.80
PEAD	Sin Dato
Total	53,603.70

3.3 Consumo

El consumo de agua en cada uno de los sectores de la red se determina con la ayuda de medidores de flujo instalados en los edificios el cual se reporta en litros por día (Tabla 3.3). Estos datos son importantes ya que permiten conocer la demanda de agua y ayudan a identificar posibles problemas de fuga o desperdicios del líquido.

Tabla 3.3 Consumo de agua en los sectores de Ciudad Universitaria (Fuente: PUMAGUA 2008)

Sector	Consumo (L/día)
Campus Central	1,578,806
Campus Secundario	569,594
Investigación Científica	448552
Estadio Olímpico	28,440
Psicología	119,420
Multifamiliar de maestros	2,640
Espacio Escultórico	298,096
Investigación Humanística	88,240
Universum	36,680
Tv UNAM	43,172
Vivero Alto	48,800

3.4 Desinfección de agua de pozos de abastecimiento.

El agua que se extrae se desinfecta a pie de pozo mediante la inyección en línea de cloro gas (pozos 2 y 3) e hipoclorito de sodio (pozo 1), y posteriormente se bombea hacia tanques de almacenamiento de donde es enviada a los diferentes puntos de consumo mediante una red de distribución de aproximadamente 56 km. Se cuenta con seis tanques de almacenamiento, uno de 2000 m³ para el pozo 1, otro de 6000 m³ para el pozo 2 y cuatro tanques más con capacidad de 1500 m³ cada uno para el pozo 3, éstos últimos se encuentran interconectados. Cabe mencionar que Ciudad Universitaria no depende del agua de suministro del Gobierno del Distrito Federal, ya que cuenta con la concesión de la extracción de agua de 3 pozos profundos localizados dentro de su territorio. Es por ello que se encarga de desinfectar el agua que se extrae y distribuye dentro del Campus Universitario. A continuación se describen cada uno de los sistemas de desinfección instalados en los pozos de agua de abastecimiento.

Pozo Facultad de Química

El pozo 1 está ubicado en la Facultad de Química y opera con un gasto de 31 L/s. Tiene una profundidad de 132 m, un nivel estático de 66.93m y un nivel dinámico de 80.03m. El pozo cuenta con bomba sumergible de 85Hp, se tiene instalado a pie de pozo un clorador Wallace & Tiernan, un dosificador Marca LM1 y un arrancador de 440 Volts marca Siemens.

El agua que se extrae es enviada a un tanque de almacenamiento (Tanque Bajo) ubicado frente al multifamiliar de maestros, donde se almacena y se distribuye de dos formas: directamente a la red de distribución y/o enviándola a un segundo tanque de almacenamiento (Tanque Alto) el cual es abastecido con el pozo 2.



Figura 3.4 Válvulas del Tanque bajo



Figura 3.5 Bombas del Tanque bajo

El pozo opera de forma intermitente en un horario de 8:00 am a 12:00 pm registrando un tiempo promedio de operación de 4 hrs las cuales son suficientes para reponer y mantener el nivel agua de agua en el tanque de almacenamiento. Es decir, se llena tanque a su máxima capacidad y cuando éste baja a cierto nivel, es pozo entra nuevamente en operación para reponer el volumen consumido a fin de garantizar el suministro de agua. Esta información fue proporcionada por los operadores de los pozos durante las visitas de campo. De acuerdo con esta información, el volumen de agua abastecido por este pozo sería de de 446.4 m³/día.

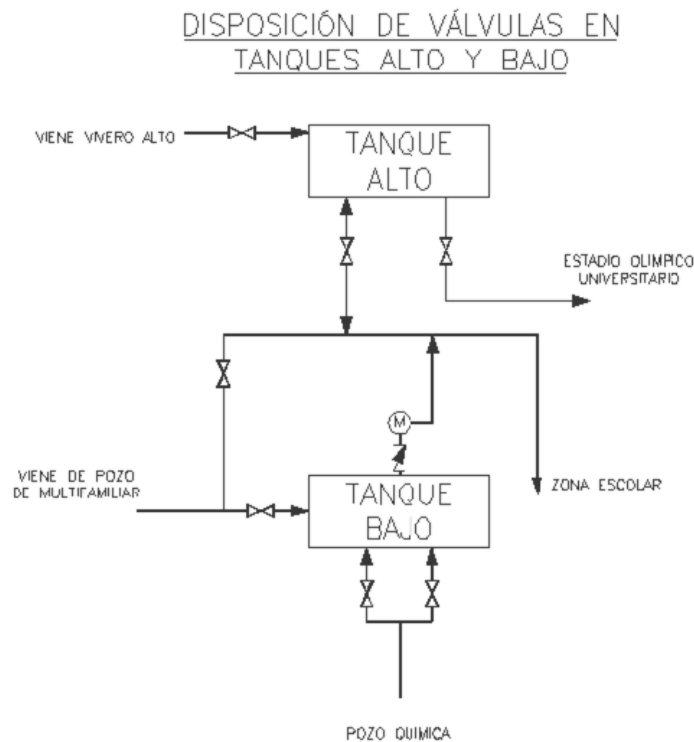


Figura 3.6 Diagrama de conexiones entre tanques de almacenamiento y pozos 1 y 2

La desinfección del agua extraída de este pozo se basa en la aplicación de hipoclorito de sodio al 13% en peso, la cantidad agregada durante un día de operación es de 10 L, esta se inyecta al mismo tiempo que arranca el pozo (Figura 3.7). Estos datos sirvieron para hacer el cálculo de la cantidad en mg/L que se dosifica durante el día, toda esta información fue recabada con los operadores de los pozos. El hipoclorito es comprado en contenedores de 200 L a un precio actual (año 2009) de 1724 pesos y se dosifica desde un tanque de 100 L (Figura 3.8).



Figura 3.7 Pozo Facultad de Química



Figura 3.8 Tanque de Hipoclorito de Sodio

Cálculo de la dosificación de NaOCl para un flujo de 31 L/s

La dosis de desinfectante se puede estimar a partir del flujo de operación del pozo de agua (31 L/s) y de la cantidad de solución comercial de hipoclorito de sodio consumida por ciclo de operación (~10 L/día) tomando en consideración el porcentaje de pureza y la densidad específica de dicha solución (13%, ρ : 1.21 g/cm³). A continuación se describe la memoria de cálculo correspondiente:

a) Concentración del hipoclorito de sodio en la solución comercial al 13%

$$C * \rho = (0.13) \left(1.21 \frac{g}{mL} \right) = 0.1573 \frac{g}{mL} = 157300 \frac{mg}{L}$$

b) Flujo volumétrico de solución comercial de hipoclorito de sodio inyectada en línea

$$10 \frac{L}{día} \left(\frac{1 \text{ día}}{24 \text{ hrs}} \right) \left(\frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ s}} \right) = 1.15 \times 10^{-4} \frac{L}{s}$$

c) Flujo másico de solución comercial de hipoclorito de sodio inyectado en línea

$$\rho = \frac{m}{V} \quad m = \rho V = \left(153670 \frac{mg}{L} * 1.15 \times 10^{-4} \frac{L}{s} \right) = 18.10 \frac{mg}{s}$$

c) Dosis de hipoclorito de sodio aplicada en mg/L de agua

$$\left(\frac{18.10 \frac{mg}{s}}{31 \frac{L}{s}} \right) = 0.60 \frac{mg}{L}$$

La Figura 3.9 muestra un diagrama conceptual del proceso de desinfección del agua que se extrae del pozo 1 y que posteriormente se envía a su respectivo tanque de almacenamiento y/o a distribución.

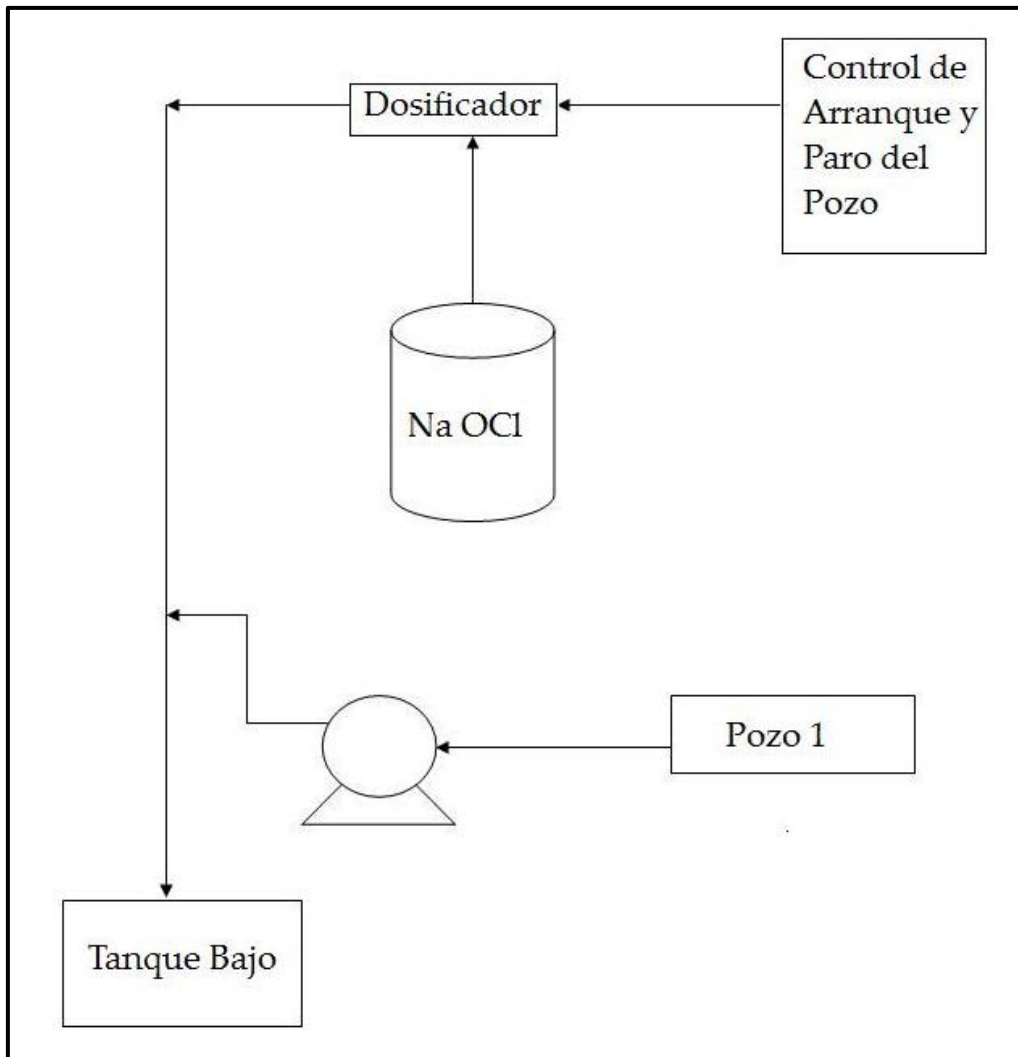


Figura 3.9 Diagrama de flujo del sistema de desinfección del pozo de la Facultad de Química



En la tabla 3.4 se muestran datos relevantes que se obtuvieron por parte de la DGOyC relacionados con el costo del mantenimiento de algunos componentes del sistema de desinfección y su respectivo tanque de almacenamiento.

Tabla 3.4 Costos de mantenimiento del sistema de desinfección pozo Facultad de Química.

Datos del Sistema de Desinfección				
Desinfectante		Hipoclorito de Sodio (Na OCl)		
Volumen Dosificado (DGOYC)		10 L/día		
Capacidad de Tanque de Dosificación(DGOYC)		200 L		
Costo/L de Na OCl		\$ 8.62		
Dosis Calculada (4 hrs de operación continua reportado por operadores de pozo de la DGOYC)		3.52 mg/L		
<i>Tanque Bajo - Suministro de Refacciones P/Clorador Mod A-741, A-831</i>				
Cantidad	No. Parte	Descripción	Precio Unitario(\$)	Importe(\$)
1	510M	Regulador de Vacío	-	10800
2	U-21247	Juego de Empaques	1775	3550
1	AAA1154	Kit de Acoplamiento Cilindro 1 Ton	-	4500
1	G-2416	Kit de Mantenimiento P/Analizador	-	1650
<i>Pozo Facultad de Química - Suministro de Refacciones P/Clorador Mod: 45-020</i>				
Cantidad	No. Parte	Descripción	Precio Unitario(\$)	Importe(\$)
1	510M	Regulador de Vacío	-	6500
			Subtotal	27000
			IVA	4050
			Total	31050

Pozo Multifamiliar

Se ubica en la explanada de la ex-planta incineradora en medio de los campos de fútbol soccer de la universidad (Figura 3.12). Opera con un caudal de extracción 89 L/s, tiene una profundidad de 193 m, el nivel dinámico y estático promedio son respectivamente de 82.32 m y 70.80 m. El pozo cuenta con una bomba sumergible de 200 Hp de potencia, un clorador marca Wallace&Tiernan y un arrancador a tensión reducida de 250Hp y 440 volts marca Siemens. El tanque de almacenamiento que le corresponde es el tanque alto (Figuras 3.10 y 3.11) con una capacidad de 4000 m³, como se menciona anteriormente ambos tanques están interconectados, de ahí que se incluyan en este apartado y no en el anterior.



Figura 3.10 y 3.11 Tanque Alto



Figura 3.12 Pozo Multifamiliar

La desinfección (Figura 3.13), a diferencia del pozo de la Facultad de Química se basa en la aplicación de gas cloro (Cl_2), a razón de 0.67 kg/hr (de acuerdo a la capacidad del clorador, 16 kg/24 hrs). Al igual que en el pozo 1 el tiempo de operación promedio es de 4 hrs.

El gas cloro es inyectado en línea a partir de tanques de gas cloro de 907 kg de capacidad, los cuales tienen un costo de \$15,000 MN por unidad; se cuentan con dos tanques para tener uno de reserva. El equipo de cloración se adapta directamente al tanque del cloro y opera al vacío (presión negativa), el cual se crea al hacer pasar un flujo de agua a presión determinada por el eyector.



Figura 3.13 Tanques de Gas Cloro de 907 Kg con malla ciclónica de protección.

La dosis aplicada se puede estimar tomando cuenta la capacidad de dosificador de cloro (16 kg/24 hrs) y el tiempo de operación tanto del pozo como del clorador. Para este caso partiremos de la suposición que la transferencia de de cloro gas el igual al 100% y por lo tanto el procedimiento es el siguiente.

- a) Flujo másico de cloro gas

$$0.67 \frac{\text{Kg}}{\text{hr}} \left(\frac{1 \times 10^6 \text{mg}}{1 \text{kg}} \right) \left(\frac{1 \text{hr}}{3600 \text{s}} \right) = 186.11 \frac{\text{mg}}{\text{s}}$$

- a) Dosis de cloro gas aplicada

$$\left(\frac{186.11 \frac{\text{mg}}{\text{s}}}{89 \frac{\text{L}}{\text{s}}} \right) = 2.1 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

A continuación se muestra el arreglo del sistema de cloración para la desinfección del agua que se extra del pozo Multifamiliar con cloro (Figura 3.14)

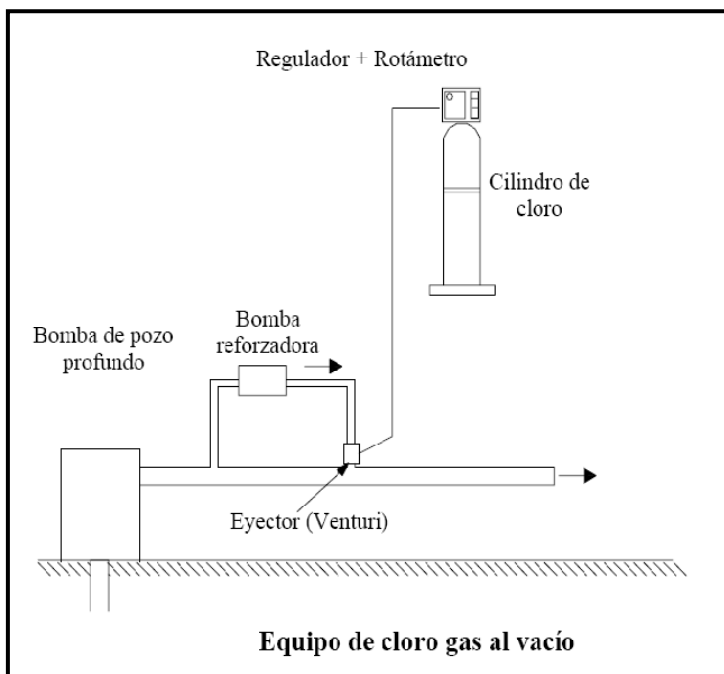


Figura 3.14 Sistema de desinfección de agua del pozo Multifamiliar

En la tabla 3.5 se presentan los datos generales del sistema de desinfección instalado en el pozo Multifamiliar así como los costos de mantenimiento del equipo realizado en el 2008. Tomando en cuenta únicamente el consumo de gas cloro el costo de desinfección sería del orden de \$0.03 MN/m³. Tabla 3.5 Costos de mantenimiento del sistema de desinfección pozo Multifamiliar.

Tabla 3.5 Costos de mantenimiento del sistema de desinfección pozo Multifamiliar.

Datos del Sistema de Desinfección				
Desinfectante				Cloro (Cl ₂)
Volumen Dosificado (DGOYC)				16 kg/24hrs
Capacidad de Tanque de Dosificación(DGOYC)				907 Kg
Costo del tanque de gas cloro				\$ 15,000
Dosis Calculada (*4 hrs de operación continua reportado por operadores de pozo de la DGOYC)				2.1 mg/L
Costos de mantenimiento del sistema de desinfección				
Pozo multifamiliar - Suministro de refacciones P/Clorador Mod A-731				
Cantidad	No. Parte	Descripción	Precio Unitario(\$)	Importe(\$)
1	510M	Regulador de vacío		10800
1	U-21247	Juego de Empaques	1775	3550
1	AAA1154	Kit de Acoplamiento Cilindro 1 Ton		4500
Subtotal				18850
IVA				2827.5
Total				21677.5

Pozo del Vivero Alto

De los pozos que abastecen de agua a Ciudad Universitaria el pozo 3 es el que está en un lugar alejado de la población (Figura 3.15). Se ubica dentro del área del jardín botánico y se extrae agua de una profundidad de 157 m con un flujo de 45 L/s, tiene un nivel dinámico promedio de 92.22m y un nivel estático de 92.08 m. Cabe destacar que es el único que cuenta con 4 tanques de almacenamiento de 1500m³ (Figura 3.16) ubicados en los límites de colindancia con las instalaciones del CCH Sur, además de tener una conexión directa con el tanque alto para abastecer de agua, en dado caso de que el pozo 1 o 2 no estén operando (Figura 3.17).



Figura 3.15 Pozo Vivero Alto



Figura 3.16 Tanques de almacenamiento

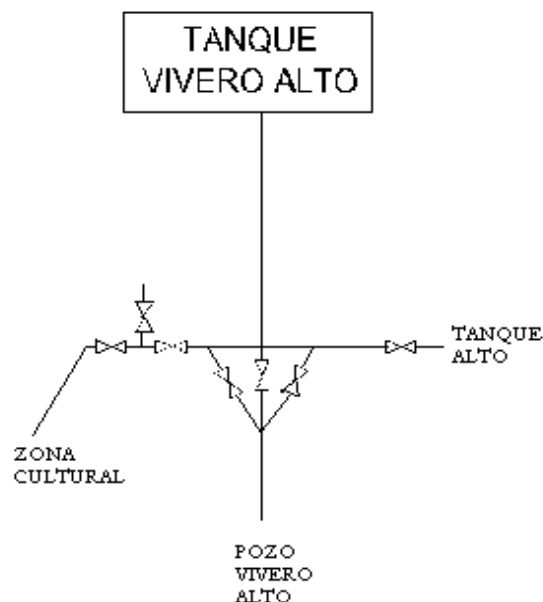


Figura 3.17 Conexiones entre los tanques de almacenamiento en el pozo Vivero Alto.

Cuenta con una bomba sumergible de 200 Hp, un clorador marca Wallace&Tiernan y un arrancador a tensión reducida de 250Hp y 440 volts marca Siemens.

El sistema de desinfección del agua de este pozo también se realiza con gas cloro (Cl_2) el cual se inyecta a razón de 0.375 kg/hr, tomando en consideración la capacidad del clorador de 9 kg/24 hrs (Figura 3.18). El pozo cuenta con dos tanques de gas cloro de 907 Kg cada uno destinándose uno de ellos para reserva.



Figura 3.18 Tanques de gas cloro usados en la desinfección del agua del pozo 3

Como en los dos casos anteriores el pozo 3 opera de manera intermitente por periodos de 4 hrs con un flujo de extracción de 45 L/s. y se toma como base el llenado del tanque principal (tanque 1).

La dosis aplicada se calcula de la misma manera que para el pozo 2 como sigue:

a) Flujo másico de cloro gas

$$0.375 \frac{\text{Kg}}{\text{hr}} \left(\frac{1 \times 10^6 \text{mg}}{1 \text{kg}} \right) \left(\frac{1 \text{hr}}{3600 \text{s}} \right) = 104.17 \frac{\text{mg}}{\text{s}}$$

a) Dosis de cloro gas aplicada

$$\left(\frac{104.17 \frac{\text{mg}}{\text{s}}}{45 \frac{\text{L}}{\text{s}}} \right) = 2.3 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

En la tabla 3.6 se resumen los datos de operación y los costos relativos al mantenimiento.



Tabla 3.6 Costos de mantenimiento del sistema de desinfección pozo Vivero Alto.

Datos del Sistema de Desinfección				
Desinfectante			Gas Cloro (Cl ₂)	
Volumen Dosificado (DGOYC)			9 kg/24 hrs	
Capacidad de Tanque de Dosificación(DGOYC)			907 Kg	
Costo del tanque de gas cloro			\$ 15,000	
Dosis Calculada (*4 hrs de operación continua reportado por operadores de pozo de la DGOYC)			2.3 mg/L	
Costos de mantenimiento del sistema de desinfección				
Pozo del Vivero Alto- Suministro de refacciones P/Clorador Mod A-741				
Cantidad	No. Parte	Descripción	Precio Unitario(\$)	Importe(\$)
1	510M	Regulador de Vacío		10800
1	U-21242	Juego de Empaques		1775
1	AAA1154	Kit De Acoplamiento Cilindro 1 Ton		4500
			Subtotal	17075
			IVA	2561.25
			Total	19636.25

3.4.1 Almacenamiento

A continuación se muestran las dimensiones de los tanques de almacenamiento (tabla 3.7), que se tienen como reserva para evitar el desabasto de agua dentro del Campus Universitario.

Tabla 3.7 Tanques de almacenamiento de pozos de abastecimiento de agua potable

Tanque	Ancho (m)	Largo (m)	Alto (m)	Capacidad (m ³)	Nivel Máximo (m)	Nivel Mínimo (m)
Bajo	23	29	3	2000	2.9	2
Alto	25	40	4	4000	3.9	3.2
Vivero Alto (4 unidades)	20	25	3	1500	2.9	2.1

Los tiempos de retención hidráulica (tabla 3.8), se calcularon con el caudal de operación de los pozos y el diámetro de la tubería que conecta a los pozos con sus respectivos tanques de almacenamiento. Esto nos puede dar una idea del tiempo de residencia del agua.

Tabla 3.8 Tiempos de retención hidráulica de los tanques de almacenamiento de agua potable en Ciudad Universitaria, UNAM

Tiempos de retención hidráulico	
Tanque Bajo	17 Hrs + 55 Min
Tanque Alto	12 Hrs + 29 Min
Tanques del Vivero Alto (1-4)	9 Hrs + 15 Min



3.4.2 Control de calidad del agua

La Dirección General de Servicios Médicos (DGSM) es la dependencia encargada de constatar la calidad del agua distribuida en las 136 dependencias (Facultades, Centros, Institutos y dependencias Administrativas) a través del Departamento de Salud Ambiental. Realiza 4 visitas al año para la determinación en campo de parámetros físico químicos como pH y cloro residual, toma de muestras para análisis de Coliformes totales y Mesófilos como parámetros microbiológicos y finalmente emite dictámenes dirigidas a las autoridades correspondientes de los resultados. *Cabe recalcar que para emitir dicho dictamen no se toma como base la norma de agua para uso y consumo humano (NOM-127-SSA1-1994, modificada en el 2000), en su lugar utiliza la norma para Bienes y Servicios. Practicas de Higiene y Sanidad en la Preparación de Alimentos que se Ofrecen en Establecimientos Fijos (NOM-093-SSA1-1994).*



Figura 3.19 Localización de la Dirección General de Servicios Médicos (DGSM)



CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA



4.1 Diagnóstico del sistema de desinfección

Para realizar el diagnóstico del sistema de desinfección en los pozos de abastecimiento se siguieron los siguientes pasos, basados en la evaluación de plantas de tratamiento de agua residual realizada en América Central, Campos, R (2005):

1. Recopilación de información
2. Identificar la participación de las autoridades
3. Evaluación de las condiciones de los sistemas de desinfección.
4. Caracterización del agua
5. Planos de localización de los sistemas de desinfección
6. Realizar el diagnóstico

1. Recopilación de información

Una de las actividades claves para el diagnóstico fue la de recabar la información disponible para identificar las fortalezas y debilidades de los sistemas de desinfección. Para tener acceso a esta información se estableció contacto con personal de la Dirección General de Obras y Conservación (DGOyC) de la UNAM que es la dependencia encargada de la operación y mantenimiento de dichos sistemas.

2. Identificación de la participación de las autoridades.

La Dirección General de Obras y Conservación, es una dependencia administrativa y de servicio, cuyo objetivo fundamental es coadyuvar en el cumplimiento de los fines sustantivos de la Universidad Nacional Autónoma de México, mediante la planeación, proyecto y construcción de las obras de ampliación requeridas; así como la conservación, rehabilitación y mantenimiento de las edificaciones, espacios abiertos, equipos e instalaciones electromecánicas existentes que forman parte del patrimonio inmobiliario institucional (www.obras.unam.mx, 19-11-2010). Como se mencionó es la que tiene a cargo la operación y mantenimiento de los sistemas de desinfección y red de distribución de agua potable así como las plantas de tratamiento del Campus Central.

Departamento de Salud Ambiental (DSA). Pertenece a la Dirección General de Servicios Médicos de la UNAM y es el departamento encargado de llevar a cabo los muestreo de agua en la red de distribución para monitorear la calidad microbiológica, además de medir otros parámetros como el pH y el cloro residual, para constatar al momento las condiciones sanitarias del agua que se abastece a la población.



3. Evaluación de las condiciones de los sistemas de desinfección

Conocida la existencia de 3 pozos profundos y de tanques de almacenamiento, se hizo una visita física en cada uno de ellos, con el propósito de conocer el tipo de sistema de desinfección, las condiciones en las que se encuentra, el tiempo que operan y el tipo de desinfectante empleado. Fue necesario ingresar a las instalaciones para realizar el levantamiento de los sistemas de desinfección debido a que no se logró tener acceso a los diagramas de flujo de proceso o de instrumentación.

Durante las visitas se obtuvo información verbal de los operadores sobre: el funcionamiento de los equipos, el costo de los tanques de gas cloro, el tiempo en que consumen, tiempos de operación y del número del personal con que labora en esta área. Con respecto a los tanques de almacenamiento se tuvo mayor conocimiento del almacenamiento y distribución del agua en el Campus de la Universidad, de la misma forma se obtuvo información verbal del personal de la DGOyC, y mediante la inspección física se identificaron las condiciones de estos.

4. Caracterización del agua

Como parte de las actividades del proyecto PUMAGUA, en el año 2008, durante tres meses se realizaron muestreos (ver tabla 4.1) para evaluar la calidad del agua de los tres pozos de abastecimiento acorde a los requerimientos de la NOM-127-SSA1-2000. En la presente tesis se hace un análisis de los resultados de calidad reportados de estos muestreos. Adicionalmente se hace referencia a los estudios de calidad microbiológica que actualmente realiza el grupo de Calidad del Agua del Instituto de Ingeniería y el Instituto de Ecología.

5. Planos de localización de los sistemas de desinfección

Los planos de localización se incluyen en el capítulo 3 de la presente tesis por lo que no se incluirá en esta sección, sin embargo formó parte de la metodología para la realización del diagnóstico.

6. Realizar el diagnóstico

La información recopilada y desarrollada a partir de los puntos 1-5 fue la base para realizar el diagnóstico de los sistemas de desinfección. Adicionalmente la metodología HAZOP (Hazardous Operative Potential: ver anexos) fue aplicada en el caso del pozo de mayor caudal (pozo del Multifamiliar) con el fin de identificar posibles riesgos para la población expuesta debido al uso de cloro gas como desinfectante. Las líneas que se analizaron fueron la Línea 1, que corresponde a la fuente de abastecimiento y la Línea 2 que corresponde al sistema de cloración; lo anterior debido a eventos esporádicos, ocurridos en 2010, relacionados con la presencia de organismos resistentes a cloro y, a la fuga de gas cloro ocurrida en las instalaciones del pozo del Vivero Alto. Los detalles de la metodología HAZOP se describen en la sección de anexos.



4.2 Control de calidad del agua en Ciudad Universitaria

Se consultaron resultados de análisis de calidad de agua registrados en el 2007, 2008 y 2009 por el Departamento de Salud Ambiental (DSA), específicamente valores de Cloro residual libre y bacterias Coliformes totales. Debido al extenso número de mediciones reportadas de Cloro residual libre residual y de Coliformes totales (en garrafones, grifos y filtros) se hizo una compilación selectiva de valores reportados en el agua de los grifos para evaluar la calidad con la que esta llega al consumidor. Los residuales de cloro pueden garantizar bajo ciertas condiciones la ausencia de microorganismos en las redes de distribución, por lo que fue utilizado como un parámetro clave para relacionarlo con la presencia o ausencia de bacterias Coliformes. De los tres años se obtuvo un promedio anual del total de las mediciones realizadas en cada una de las dependencias evaluadas.

4.3 Muestreo de agua subterránea en los pozos de abastecimiento.

El muestreo de agua se llevo a cabo durante 10 semanas en los 3 pozos de abastecimiento de acuerdo con el calendario de la Tabla 4.1. Los días lunes en el pozo de la Facultad de Química, martes el pozo Multifamiliar y los miércoles el pozo del Vivero Alto. Para realizarlo fue necesario tramitar una solicitud formal ante la DGOyC.

Para las ensayos experimentales de desinfección se muestrearon volúmenes de 20 L de agua cruda de cada uno de los pozos de abastecimiento y de manera paralela se tomaron por duplicado muestras de aproximadamente 300mL en bolsas estériles para los análisis microbiológicos (contenido de Coliformes totales y fecales, respectivamente). El Muestreo se realizo en las mañanas de 8:00 a 10:00 am, de lunes a miércoles del 22 de marzo al 8 de junio del 2010. Para ello fue necesario contar con garrafón de 20L limpios, guantes de látex y bolsas estériles.

Tabla 4.1 Calendario de muestro de agua cruda de pozos de abastecimiento

Pozo	Fechas de muestreo			
	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Facultad de Química	Jueves 18 Lunes 22	Lunes 5 Lunes 12 Lunes 19 Lunes 26	Lunes 3 Jueves 13 Lunes 17 Lunes 24	Lunes 7
Multifamiliar	Martes 16 Martes 23	Martes 6 Martes 13 Martes 20 Martes 27	Martes 4 Martes 11 Martes 18 Martes 25	Martes 8
Vivero Alto	Miércoles 17 Miércoles 24	Miércoles 7 Miércoles 14 Miércoles 21 Miércoles 28	Miércoles 5 Miércoles 12 Miércoles 19 Miércoles 26	Miércoles 9



4.4 Desinfección con ozono e hipoclorito de sodio.

Como alternativa al método de desinfección actual se evaluó el uso del ozono como desinfectante primario ya que este es uno de los agentes desinfectantes más efectivo que puede garantizar la remoción de bacterias patógenas y virus resistentes al cloro, previene la formación de sub-productos de desinfección y mejora las condiciones organolépticas del agua. Como desinfectante secundario se utilizó hipoclorito de sodio para mantener un residual de cloro en la red de distribución que garantice la calidad microbiológica del agua hasta el consumidor.

Las pruebas experimentales se realizaron en los laboratorios del Ingeniería y Bioprocesos Ambientales de Instituto de Ingeniería en donde se cuenta con una unidad de oxidación con ozono y áreas específicas de trabajo para el análisis de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.

Las condiciones de desinfección y los requerimientos de desinfectante para el agua subterránea en estudio se establecieron con base en estándares internacionales de tratamiento y la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994.

En los Estados Unidos cuando no se han realizado pruebas en el laboratorio para determinar la concentración y tiempo de contacto adecuados para la desinfección, se recomienda un factor Ct de 1.6 mg/Lmin. En Francia para asegurar la desinfección se mantiene un residual en la última cámara de contacto de 0.4 mg/L con tiempo de contacto de 4 minutos (Langlais et al., 1991). Para garantizar la calidad microbiológica del agua en las redes de distribución la NOM-127-SSA-1994 recomienda un residual de Cloro residual libre de entre 0.2 y 1.5 mg/L. Con base en esta información fue que se establecieron las condiciones experimentales de prueba: dosis de ozono de 0.3-0.4 mg/L y tiempos de contacto de 4 minutos y, residuales de cloro de 0.5 mg/L.

En los siguientes apartados se describe el arreglo experimental y las condiciones de prueba utilizadas.



4.5 Arreglo experimental del sistema de desinfección a escala laboratorio: ozono e hipoclorito de sodio

4.5.1 Sistema de oxidación con ozono

El sistema de oxidación que se utilizó para realizar las pruebas de desinfección y demanda de ozono lo componen los siguientes elementos (Figura 4.1):

- ✓ Separador de aire AIRSEP
- ✓ Generador de ozono Emery Trailigaz Labo 76 con una capacidad de producción de 19 g de O₃ por hora.
- ✓ Reactor tubular o contactor gas-líquido: columna de burbujeo de vidrio de 110 cm de altura con un diámetro interno de 5.5 cm.
- ✓ Difusor con disco de vidrio de 30 micras de diámetro de poro para la dispersión del gas
- ✓ Unidad de destrucción catalítica de ozono.
- ✓ Analizador de ozono gas en línea de ozono modelo API M465H.

4.5.2 Desinfección con hipoclorito de sodio

Para realizar las pruebas de demanda y desinfección con hipoclorito de sodio al 13% se utilizaron los siguientes materiales:

- ✓ Equipo colorimétrico portátil HACH para determinar Cloro residual libre residual
- ✓ Parrilla de agitación
- ✓ Micropipeta de 20μL
- ✓ Vaso de precipitados de 500mL
- ✓ 2 Matraces aforados de 100mL
- ✓ 2 pipetas de 10mL
- ✓ Guantes

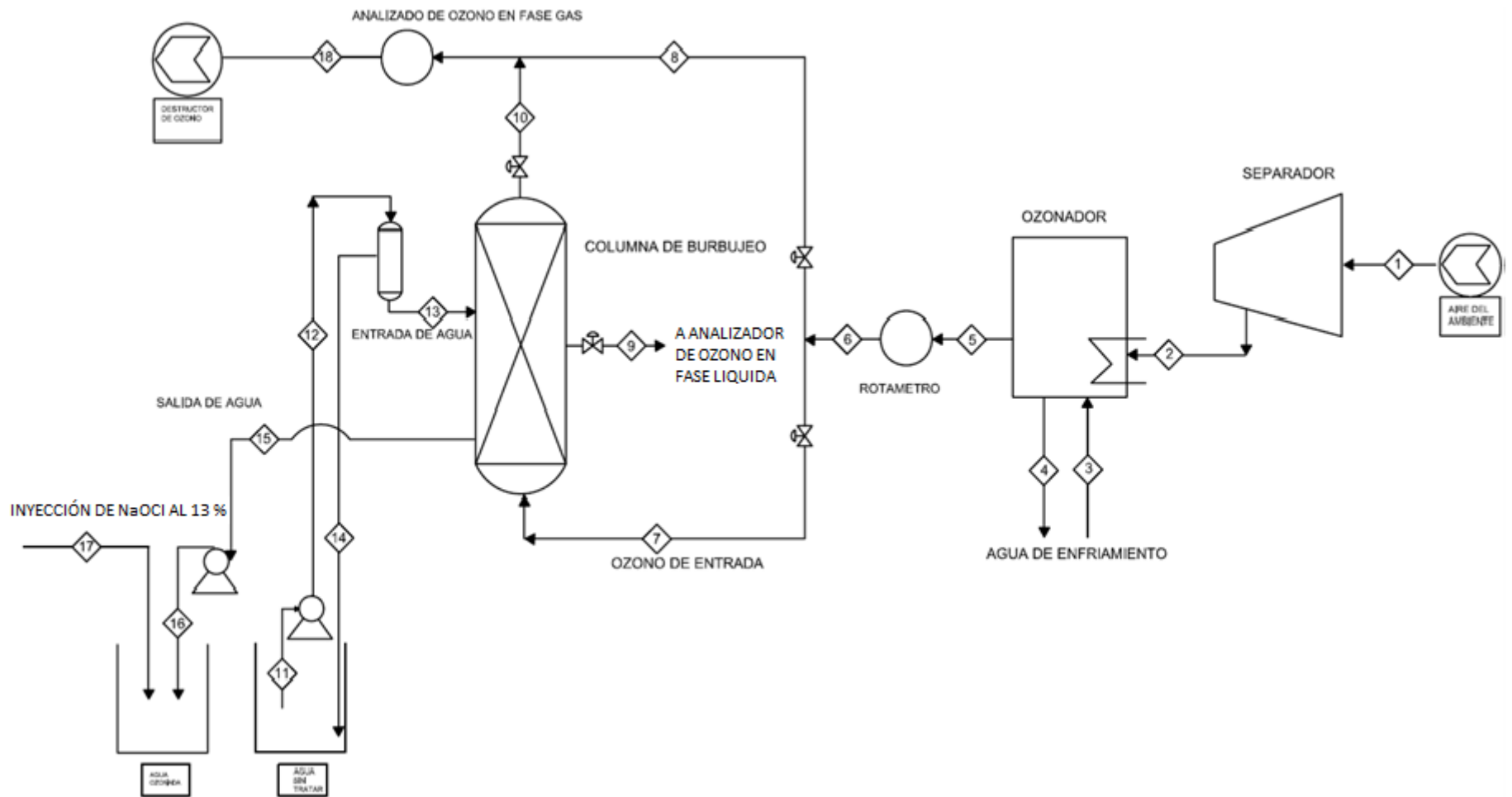


Figura 4.1 Arreglo experimental del sistema de desinfección con ozono e hipoclorito de sodio

4.6 Pruebas de demanda de ozono y desinfección de agua de pozos de abastecimiento

4.6.1 Demanda de ozono

Se determinó la demanda de ozono en un modo continuo de acuerdo al método propuesto por Roustan, (1998). El flujo de gas ozono fue de 0.2 L/min y el de agua (agua cruda de pozos) de 0.17 L/min con un tiempo de retención hidráulico equivalente de 10 minutos (el autor recomienda tiempos entre 5 y 30 minutos). La concentración de ozono a la entrada de la columna fue de 0.9 mg/L para el pozo de la Facultad de Química, 1mg/L para el pozo Multifamiliar y 0.6 mg/L para el caso del pozo del Vivero Alto. En la Figura 4.2 se puede observar una fotografía del arreglo experimental utilizado en continuo, con la que se determinó la demanda de ozono del agua de los pozos de Ciudad Universitaria.



Figura 4.2 Sistema de oxidación con ozono en modo continuo.

4.6.2 Desinfección con ozono

Después de un número importante de pruebas experimentales se encontró que alimentando un flujo de gas de 0.2 L/min con una concentración de 5.2 ± 0.2 mg/L de ozono se obtuvieron concentraciones de 0.29 a 0.32 mg/L de ozono en el líquido en un tiempo de contacto de 4 minutos. Para la cuantificación de la concentración del ozono en fase gas se utilizó un medidor de ozono modelo API M465H (Figura 4.3). Para la determinación del ozono en el líquido se utilizó el método de Índigo (Ver anexos).

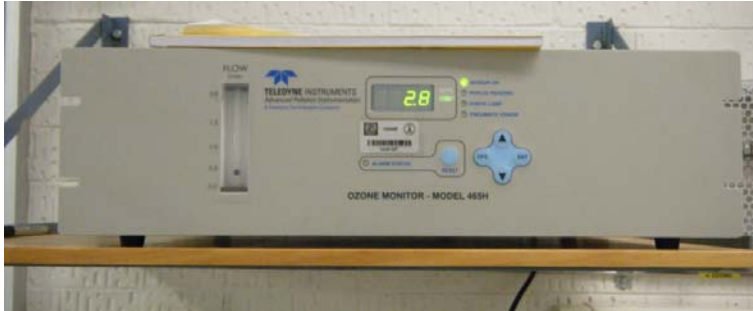


Figura 4.3 Medidor de ozono en fase gas (API M46).

4.6.3 Balance de masa

Con la ecuación 4.4 se realizó un balance de materia para determinar la cantidad de ozono que se transfirió en la fase acuosa. Para el cálculo de la dosis aplicada de ozono se utilizó la ecuación 4.3, el consumo de ozono con la ecuación 4.5 y la eficiencia de transferencia con la ecuación 4.6 respectivamente.

$$[O_3]_A = \frac{[O_3]_{g,e} * Q_g * t}{V_r} \dots\dots\dots (4.3)$$

$$[O_3]_r = \frac{\{[O_3]_{g,e} - [O_3]_{g,s}\} * Q_g * t}{V_r} \dots\dots\dots (4.4)$$

$$[O_3]_c = \frac{([O_3]_{ge} - [O_3]_{gs}) * Q_g * t}{V_r} - [O_3]_{l,r} \dots\dots\dots (4.5)$$

$$ET = \frac{([O_3]_{ge} - [O_3]_{gs})}{[O_3]_{ge}} \dots\dots\dots (4.6)$$

A continuación se presenta la nomenclatura correspondiente a las ecuaciones utilizadas

Q_g = flujo de gas (L/min)

t = tiempo de contacto (min)

V_r = volumen en el reactor (L)

$[O_3]_T$ = ozono transferido (mg/L)

$[O_3]_{g,e}$ = ozono que entra al tratamiento en fase acuosa (mg/L)

$[O_3]_{g,s}$ = ozono que sale del tratamiento en fase acuosa (mg/L)

$[O_3]_A$ = dosis aplicada de ozono (mg/L)

$[O_3]_C$ = ozono consumido (mg/L)

ET = eficiencia de transferencia

4.7 Pruebas de demanda y desinfección de agua de pozos de abastecimiento con hipoclorito de sodio.

4.7.1 Demanda de cloro

Se utilizó una solución comercial de hipoclorito de sodio al 13%. Los residuales de cloro fueron medidos con un colorímetro portátil HACH (Figura 4.4 y 4.5) que mide concentraciones en un intervalo de 0 a 2 mg/L. (El procedimiento es equivalente al método estándar 4500-Cl G para agua potable). Para las pruebas se aplicaron volúmenes crecientes de hipoclorito de sodio de 1 a 10 μ L en cada una de las muestra de agua cruda en agitación, y se midió a los 10 minutos de haber dosificado



Figura 4.4 HACH POCKET-Diseñado para la medición colorimétrica a una longitud de onda de 528nm.



Figura 4.5 Celda para cloro residual.



4.7.2 Desinfección con hipoclorito de sodio

Dado que se utilizó ozono como desinfectante primario, solo se adicionó la cantidad de hipoclorito de sodio necesario para mantener un residual equivalente a 0.5 mg/L de cloro una muestra de 100 mL de agua ozonada, con el fin de mantener la calidad microbiológica del agua.

4.8 Parámetros de control de calidad del agua

Los parámetros de control de calidad se basaron en la NOM-127-SSA1-1994, modificada en el 2000. Debido al extenso número de parámetros contenidos en dicha norma, solo se seleccionaron aquellos que son importantes en la desinfección. De los parámetros se hizo una separación, por una parte los parámetros Físicoquímicos (FQ) y por otro parámetros Microbiológicos.

4.8.1 Determinación de parámetros físicoquímicos.

En la tabla 4.2 se presentan los equipos que se utilizaron para la determinación de los parámetros Físico Químicos (F.Q) antes y después de la desinfección.

Tabla 4.2 Equipos utilizados para la medición de los parámetros F.Q

Parámetro	Método	Equipo empleado
Turbiedad	Nefelométrico	Turbidímetro HACH modelo 2100P
pH	Potenciométrico	Potenciómetro Multi 350i WTW
Sólidos disueltos totales	Electrométrico	Conductímetro marca HACH modelo 46600-00

4.8.2 Determinación de parámetros microbiológicos (Coliformes totales y Coliformes fecales).

Debido a que el tiempo de contacto fue de 4 minutos por lo que se detuvo la reacción del ozono en el agua, para este fin se utilizó tiosulfato de sodio 0.1 N para inactivar un volumen de 500 mL de agua ozonada, cantidad suficiente para hacer la determinación de los parámetros microbiológicos (Coliformes totales y fecales).

Para la determinación de Coliformes totales y Coliformes fecales (Figura 4.6) del agua cruda y desinfectada, se utilizó el método por filtración de membrana. Se filtro una muestra de 100mL en una membrana de celulosa (45µm) que retiene los organismos, se colocó en un medio de cultivo selectivo de Agar MFC (Coliformes totales) y en un medio de cultivo selectivo Agar Endo (Coliformes fecales), se incubó durante 24 h, a 35°C para Coliformes totales y a 37°C para Coliformes fecales para su detección. Se llevó a cabo la cuenta directa de las colonias características desarrolladas sobre la membrana. Finalmente se hizo el cálculo del número de organismos Coliformes que pueden estar presentes en 100 mL de la muestra PUMAGUA (2010).

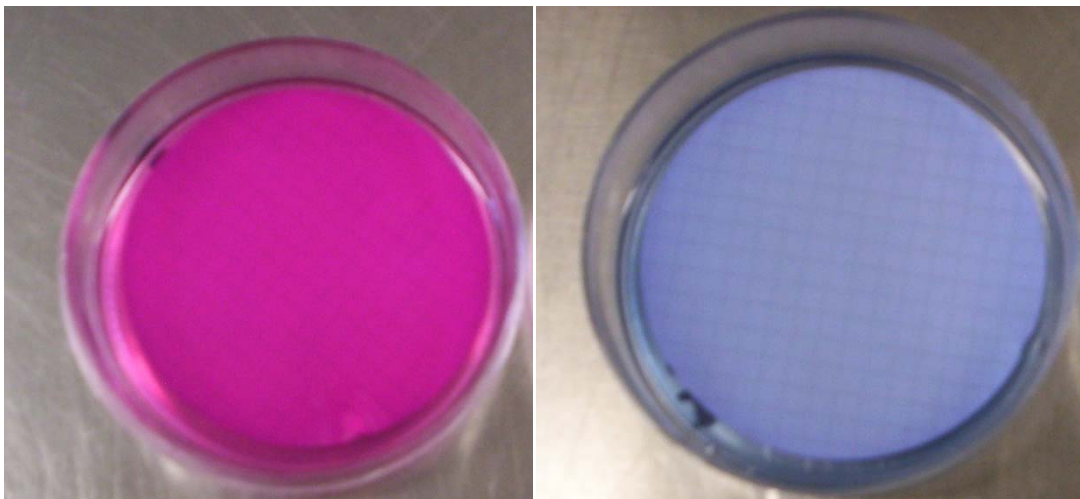


Figura 4.6 Medios de cultivo selectivos para la determinación de Coliformes totales (lado izquierdo) y Coliformes fecales (lado derecho).

4.9 Esquema general de procedimiento experimental

En la Figura 4.7 se muestra un esquema del procedimiento experimental que se llevo a cabo para la desinfección del agua de los pozos de abastecimiento, así como las determinaciones de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos antes y después del tratamiento con ozono e hipoclorito de Sodio.

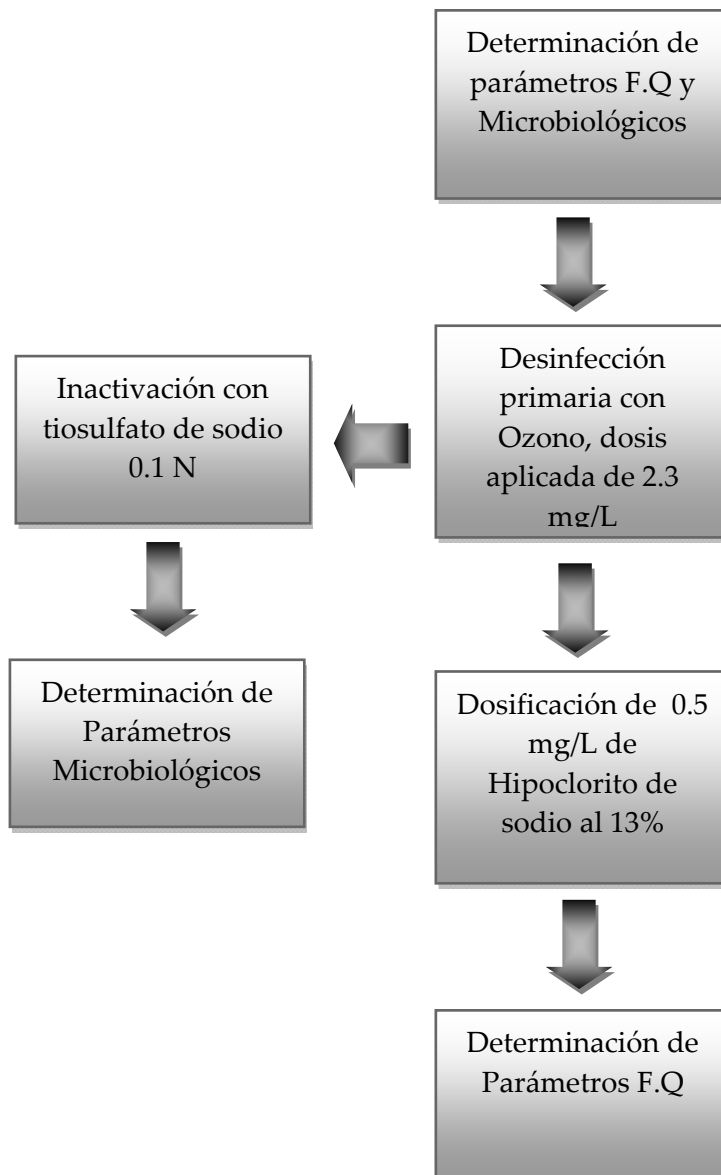


Figura 4.7 Esquema General de Desinfección Combinada con Ozono e Hipoclorito de Sodio.



4.10 Estimación teórica de los costos de la desinfección con ozono e hipoclorito de sodio.

Como parte de los objetivos particulares de la presente tesis, se hizo una estimación “teórica” del costo del sistema de desinfección con ozono e hipoclorito de sodio.

Para estimar el costo de capital de la ozonación se tomó como base de cálculo el caudal de agua a desinfectar, el cual corresponde a los flujos promedio de operación de cada uno de los pozos de abastecimiento respectivamente, así como los requerimientos de dosis de ozono para lograr la desinfección los cuales fueron determinados experimentalmente (ver tabla 5.5). Debido a que la aplicación de ozono en el tratamiento de agua en México es relativamente nueva, no se cuenta con índices de costos locales de generación de ozono por lo que, para este trabajo de tesis, las estimaciones fueron realizadas a partir de datos reportados para 20 plantas construidas en Estados Unidos y Francia (ver grafica de las Figura 2.23).

Para el hipoclorito de sodio se utilizó: la dosis necesaria para conservar el residual de cloro que estuviera dentro de norma, el costo de \$8.62/L reportado por la DGOyC, el costo de la bomba dosificadora (se obtuvo con el cálculo del volumen en L/h necesario de hipoclorito de sodio al 13% para satisfacer la dosis de 0.5mg/L) y los caudales a tratar. Estos datos sirvieron para sacar un promedio del costo de un sistema de desinfección con hipoclorito de sodio con 3 distribuidores que incluye: controlador, sensor de medición de cloro residual, bomba dosificadora, tanque de almacenamiento, porta sensor y cable de control.

Costos de ozonación. Para poder estimar el costo del equipo de generación (Generador de ozono, tubería, instrumentación etc.), se requiere calcular la producción de ozono (Kg/hr) para desinfectar el caudal de cada pozo.

$$Y = W/Q$$

W: Flujo másico (mg/s)

Q: Flujo volumétrico (L/s)

Y: Dosis aplicada (mg/L)

Teniendo el costo del equipo de generación de ozono se partió de que este representa el 53% del costo total y con la tabla 4.3 se calculo el costo de construcción y el contactor.

Tabla 4.3. Porcentajes estimados para determinar el costo de capital total (Fuente. A.W.W.A 1996)

Equipo de generación	53%
Construcción	25%
Contactador	22%



La estimación del costo del capital en conjunto con el interés (16% IVA, 2010) y la amortización (se estimó en 20 años) sirvieron para calcular el costo anual, de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$\text{Costo anual} = \frac{Ct(i(1+i)^n)}{((1+i)^n - 1)}$$

Ct: Costo total de capital i=Interés (IVA) n=No. de años de amortización

El costo anual se dividió entre el volumen en metros cúbicos por año de cada pozo y con ello se obtuvo el costo de capital de la ozonación. Los costos de operación involucran, energía eléctrica, mano de obra, mantenimiento y enfriamiento. Los costos aproximados de estos componentes para pequeñas sistemas que requieren menos de 1.89 Kg/hr se presentan en la tabla 4.4

Tabla 4.4 Porcentajes estimados para determinar el costo de operación para pequeños sistemas (Fuente. A.W.W.A 1996)

Energía eléctrica	22%
Mano de obra	38%
Mantenimiento	38%
Enfriamiento	2%

Para estimar el costo de energía eléctrica se investigo el costo por Kw/h en el Distrito federal, la energía específica por kilogramo de ozono es de 20 Kwh/Kg de O₃; dado que los equipos de ozonación son de tipo industrial, se investigó el costo de energía eléctrica para la mediana industria y de servicios, el costo es de \$1.18 pesos/Kwh (Fuente: CFE 2010). Para estimar el costo de energía eléctrica que se requiere para generar la producción de ozono necesaria para la desinfección de los caudales de los pozos de abastecimiento se utilizo la siguiente ecuación:

$$CE = (PO) * (E) * (C)$$

CE= Costo de energía eléctrica

PO=Producción de ozono

E= Energía específica

C= Costo de energía eléctrica

Con este cálculo y basándose en los costos de la tabla X1 fue posible calcular el costo de operación y mantenimiento anual que involucra: energía eléctrica, mano de obra, mantenimiento y agua de enfriamiento.



Costos de cloración.

Para el caso del hipoclorito de sodio se hace la estimación del costo de las bombas dosificadoras con el cálculo del volumen (L/h) necesario de hipoclorito de sodio para satisfacer la dosis de 0.5mg/L en con los caudales a tratar. La concentración que usó fue del 13% de cloro activo.

El costo total de inversión de los sistemas de cloración se baso en el costo promedio de las bombas dosificadoras con 3 proveedores (ADASA, ISH y Prominent México), el reactivo necesario para la desinfección de los flujos promedio de los pozos durante un año y se cálculo el costo anual para cada uno, y finalmente se dividió entre el volumen extraído de agua en un año.

Costo del desinfectante = $Q * \$/L \text{ NaOCl}$

“Para terminar la estimación del costo por metro cubico de agua a tratar con ozono e hipoclorito de sodio se sumaran ambos costos, tanto los de la ozonación como los de la cloración”.



CAPÍTULO 5. RESULTADOS



5.1 Análisis del control de calidad del agua en Ciudad Universitaria

Al hacer el análisis de los datos se encontraron variaciones en el número de dependencias evaluadas: 85 en 2007, 74 en 2008 y 106 en 2009. En la tabla 5.1 se puede observar que durante los 3 años, más del 80% de dichas entidades cumplieron con los niveles de Cloro residual libre residual, es importante resaltar los altos porcentajes de dependencias donde no se encontró presencia de bacterias, estos resultados pueden deberse a la falta de un monitoreo controlado.

Tabla 5.1 Cumplimiento en la norma en contenido de Cloro residual libre residual y Coliformes totales en muestras de agua en dependencias de Ciudad Universitaria 2007 – 2009.

Año	Cloro residual (0.2-1.5mg/L)	Coliformes totales (Ausencia o no detectable NMP/100mL)
	Porcentaje de Dependencias dentro de la norma (NOM-127-SSA1-1994, modificada en el 2000)	Porcentaje de Dependencias dentro de la norma (NOM-127-SSA1-1994, modificada en el 2000)
2007	82%	77%
2008	81%	93%
2009	84%	98%

Como parte de los objetivos planteados se realizó una compilación de los resultados de los análisis de cloro residual y Coliformes totales en agua de grifos, realizado por el Departamento de Salud Ambiental (Figura A2.1 del 2007 al 2009. Las mediciones son llevadas a cabo por el departamento de salud ambiental apoyados por alumnos de servicio social. Para la determinación de Cloro residual libre en grifos se utiliza el método de la ortotolidina (Figura en anexo A2.2), *sin embargo en la actualidad se ha dejado de usar por su poca exactitud además de que esta sustancia es tóxica APHA-AWWA-WPCF (1992)*, por lo que es importante valorar la opción de cambiarlo por uno con mayor sensibilidad.

En cuanto a la determinación de Coliformes totales la lleva a cabo un laboratorio externo, las muestras son tomadas por el DSA. En la Figura A2.3 se puede observar el procedimiento, finalmente se envía un dictamen (Figura A2.4) a cada una de las dependencias reportando los resultados.

Los muestreos se realizan 4 veces al año para llevar un control de la calidad de agua que llega a cada punto de consumo; para fines de este análisis solo se tomaron en cuenta las mediciones de cloro residual y de Coliformes totales en grifos

Cloro residual libre residual

Los resultados de Cloro residual libre en grifos de la red de distribución de los años 2007, 2008 y 2009 de las 136 dependencias (tabla A2.1). Para el análisis se tomó como referencia la NOM-127-SSA1-1994, modificada en el 2000.

En el 2007 se hicieron mediciones en 85 dependencias, un 18% (Figura 5.1), no cumplió con los límites permisibles de Cloro residual libre residual; de este porcentaje un 23% no alcanzó el límite mínimo destacando el Instituto de Química con 0mg/L de Cloro residual libre residual, el 77% sobrepasó el límite máximo de dicha norma enfatizando los casos de la Dirección General de Orientación y Servicios Médicos y el Departamento de Salud y Psiquiatría donde el Cloro residual libre fue de 3mg/L.

Sin embargo los resultados muestran que en este año no se tuvieron problemas en cuanto al Cloro residual libre lo que indica que la dosificación de gas cloro de los sistemas de desinfección están cumpliendo para mantener el residual dentro de la *mayor parte de la red* de distribución. Es recomendable que se de seguimiento en los puntos donde no se está detectando o se está sobrepasando la concentración de Cloro residual libre residual.

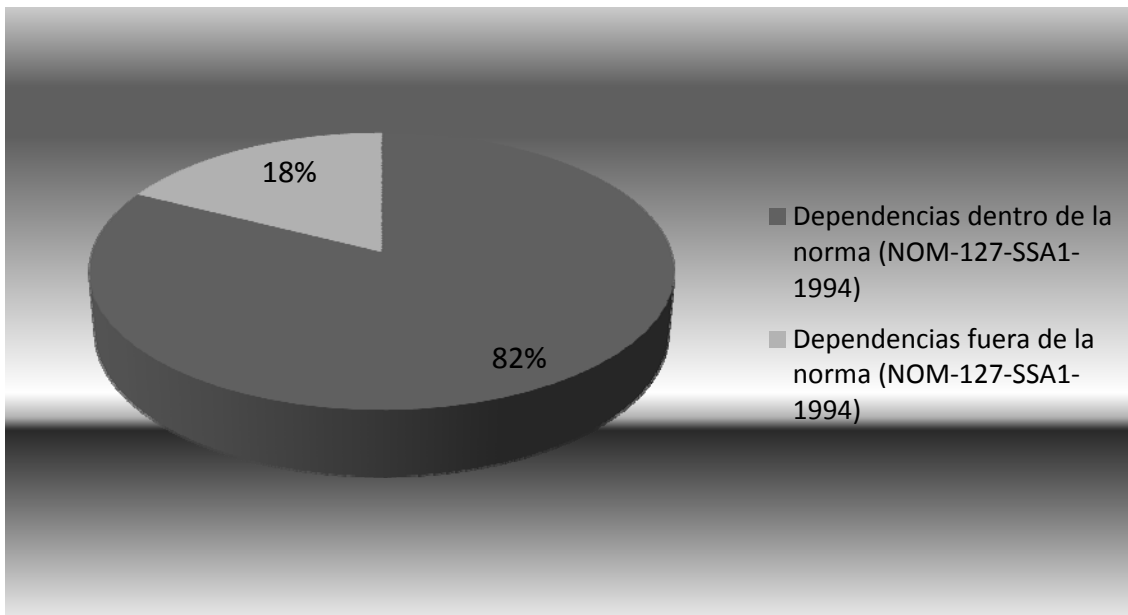


Figura 5.1 Determinación de cloro residual en grifos de dependencias de Ciudad Universitaria durante el año 2007 (Fuente: Grafica construida a partir de datos publicados por la DGSM).

Para dar seguimiento al comportamiento de Cloro residual libre en la red de distribución, se revisaron los resultados del 2008. En este año disminuyó el número de dependencias evaluadas; se encontró que 16 de las 74 dependencias analizadas no cumplieron con los límites permisibles lo que representa un 19% (Figura 5.2), de este porcentaje, sobresale un 82% por debajo del límite mínimo, destacando nuevamente el Instituto de Química y la

Casa club académico, el 18% estuvo por encima del límite de 1.5mg/L, siendo 3.2mg/L el más alto.

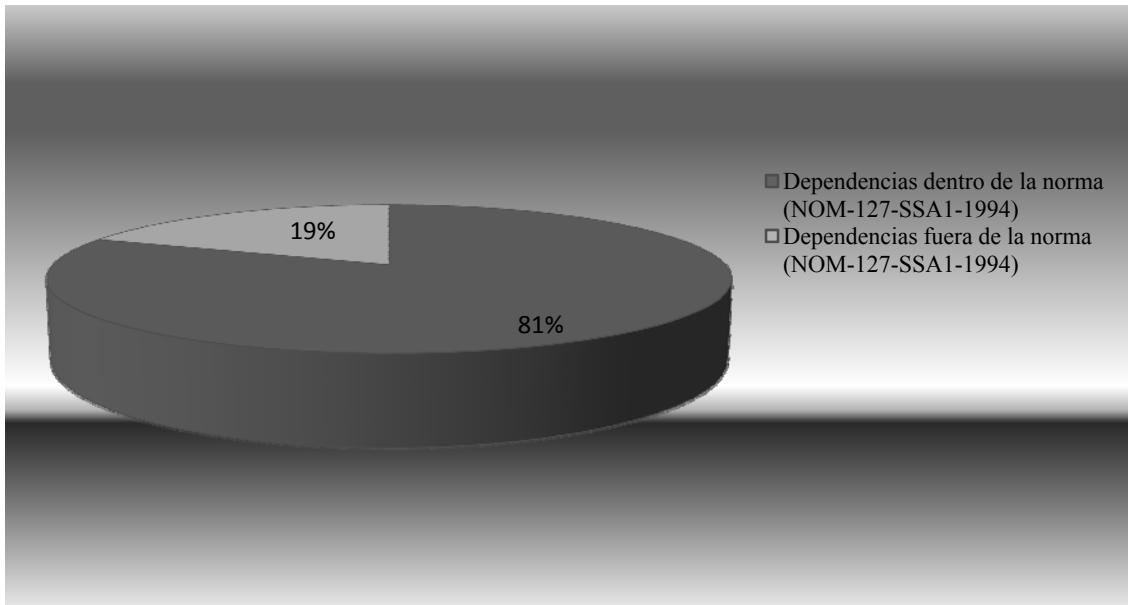


Figura 5.2 Determinación de cloro residual en grifos de dependencias de Ciudad Universitaria durante el año 2008 (Fuente: Grafica construida a partir de datos publicados por la DGSM).

Para finalizar este análisis se revisaron datos de 2009. Durante este año se incremento el número de dependencias donde se realizaron las mediciones, de 74 a 106; encontrándose un aumento de 1 dependencia con respecto al año anterior que no cumplen con la normatividad, lo que representa un 16% (Figura 5.3); de este porcentaje de dependencias que no cumplieron con los límites de Cloro residual libre un 76% no alcanzo el valor mínimo de 0.2 mg/L.

El porcentaje restante (26%), estuvo por encima del límite permisible destacando la DGOyC con un promedio de 3mg/L de Cloro residual libre residual en 4 muestras

Los resultados del análisis de los datos de Cloro residual libre muestran que para mantener un residual en la red de distribución que cumpla con los límites de la norma es necesario que se realicen ajustes en la dosificación o en su defecto la actualización o sustitución de los sistemas de desinfección, ya que en los dos últimos años el porcentaje de dependencias que no cumplieron con los límites permisibles de la normatividad se encuentran por debajo del límite mínimo.

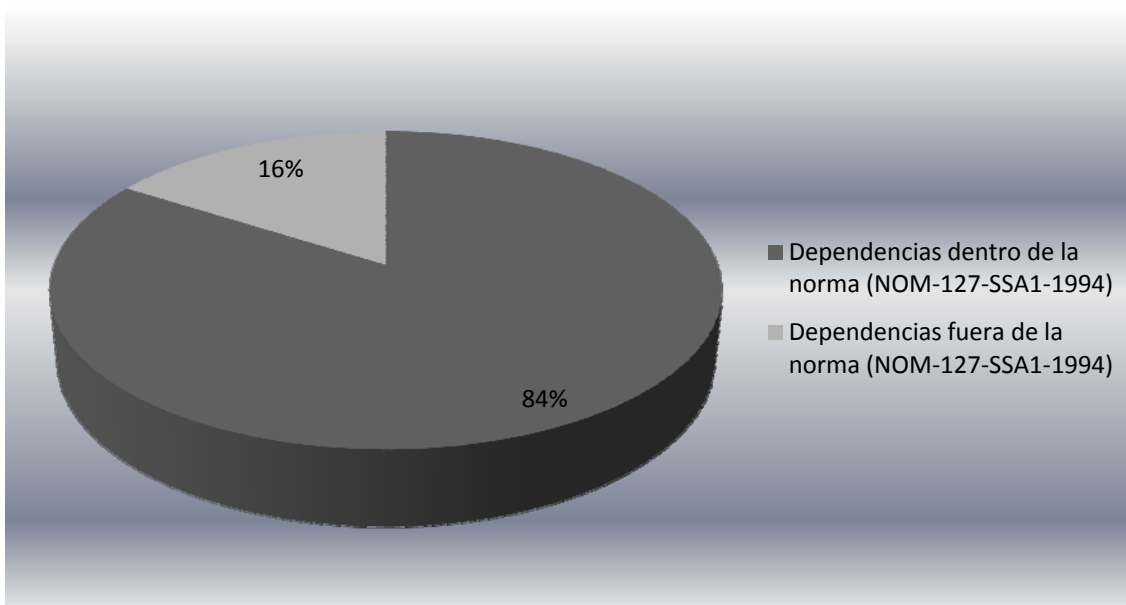


Figura 5.3 Determinación de cloro residual en grifos de dependencias de Ciudad Universitaria durante el año 2009 (Fuente: Grafica construida a partir de datos publicados por la DGSM).

Coliformes totales

Los resultados de las determinaciones de Coliformes totales en las dependencias de Ciudad Universitaria en el 2007; revelan que 17 de 74 dependencias presentan una densidad bacteriana en el orden de 2 a 16 NMP/100mL, lo que representa un 23% (Figura 5.4), de dependencias que no cumplen con los límites establecidos por la normatividad.

Los casos que llaman la atención son la Dirección General de Divulgación de la Ciencia y la Facultad de Derecho con una densidad bacteriana de 16NMP/100mL. El Cloro residual libre en estas dependencias fue de 1mg/L y de 1.68mg/L respectivamente, por lo que se descarta una contaminación en estas dependencias y se atribuye el resultado a una probable contaminación al momento de tomar la muestra o durante su determinación.

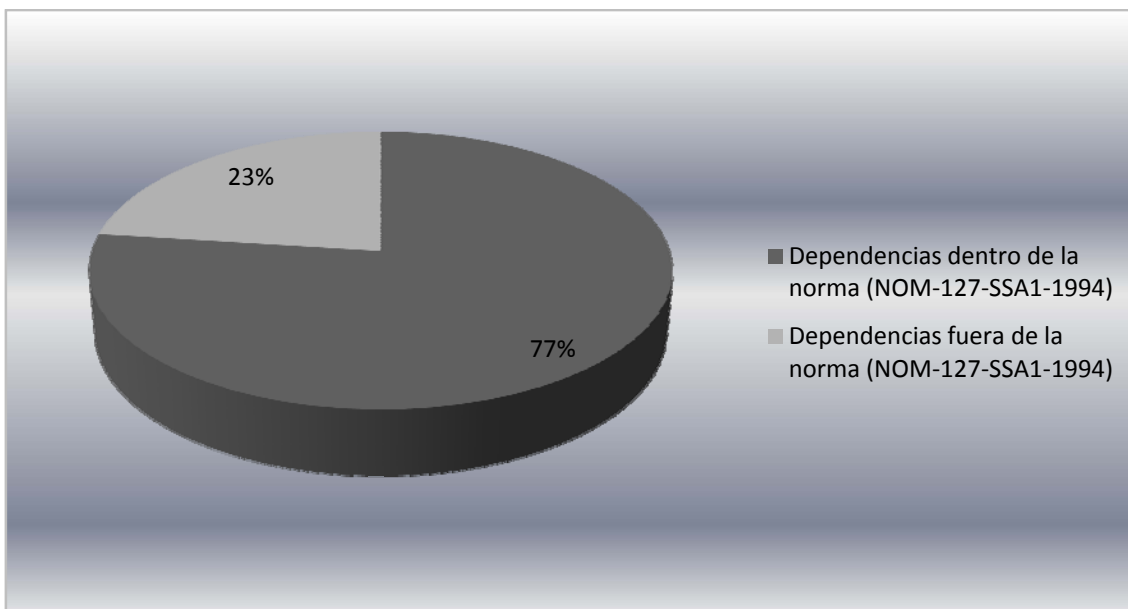


Figura 5.4 Determinación de Coliformes totales en grifos de dependencias de Ciudad Universitaria durante el 2007 (Fuente: Gráfica construida a partir de datos de la DGSM).

En el 2008 hubo una disminución considerable del 16% con respecto al año anterior de dependencias que no cumplieron con los límites de la normatividad (Figura 5.5), sin embargo aparecieron nuevamente 2 dependencias que presentan una densidad bacterianas de 16NMP/100mL: la Coordinación de Universidad Abierta y Educación a Distancia y el Instituto de Ingeniería.

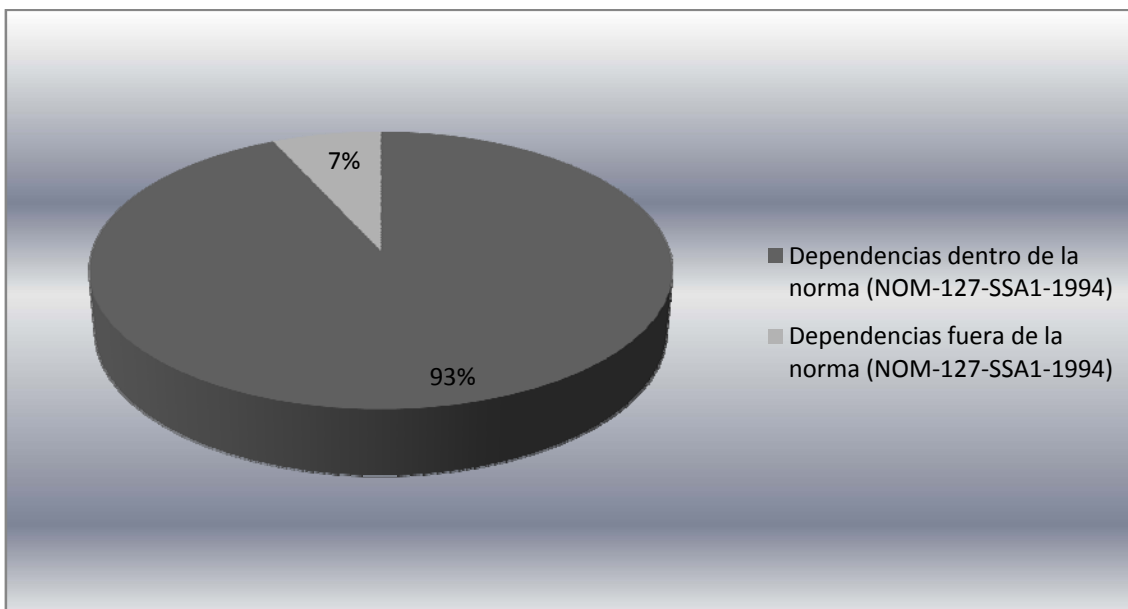


Figura 5.5 Determinación de Coliformes totales en grifos de dependencias de Ciudad Universitaria durante el 2008 (Fuente: Gráfica construida a partir de datos de la DGSM).



En este último año (2009) contrariamente a lo que uno pensaría por el alto número de dependencias que no cumplieron con el límite mínimo de Cloro residual libre (76% del 16% que no cumplieron con los límites de 0.2 a 1.5mg/L), se redujo aun más el porcentaje (2%) en las 105 dependencias analizadas, donde no se encontró presencia de Coliformes totales. En la Coordinación de Universidad Abierta y Educación a Distancia se encontraron nuevamente presencia de Coliformes totales, solo que en esta ocasión se hallaron 5 NMP/100mL en lugar de las 16 NMP/100mL encontradas en el año anterior, por otro lado en el Departamento de Salud Mental y Psiquiatría se encontraron 16NMP/100mL. En la Figura 5.6 se muestran los porcentajes correspondientes de dependencias que cumplieron o no con los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-1994 modificada en el 2000, durante el 2009.

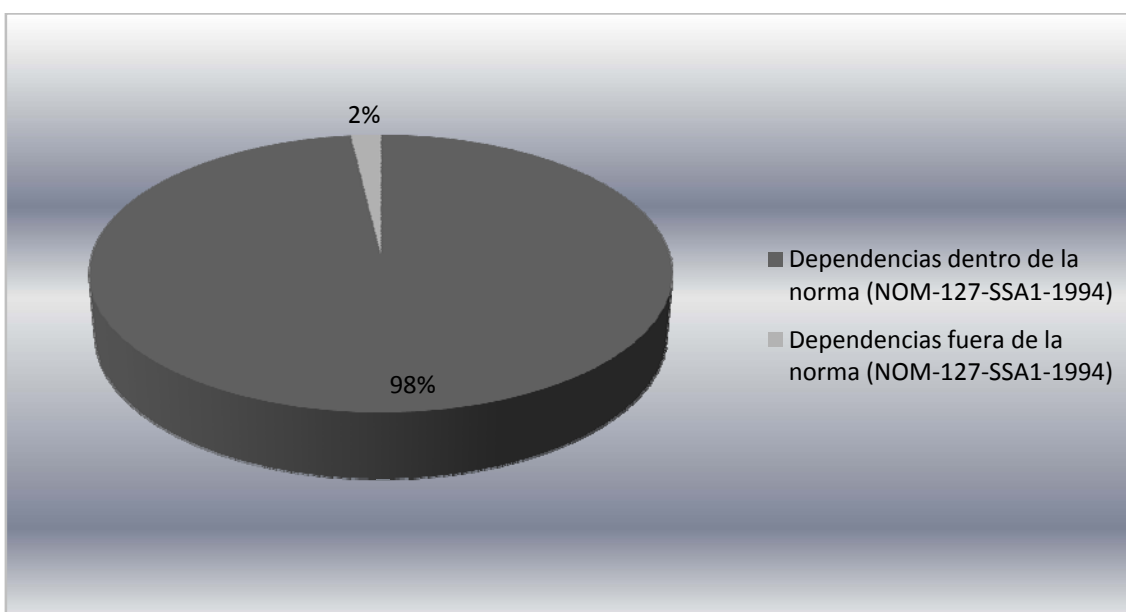


Figura 5.6 Determinación de Coliformes totales en grifos de dependencias de Ciudad Universitaria durante el 2009 (Fuente: Grafica construida a partir de datos de la DGSM).



5.2 Diagnóstico del sistema de desinfección de agua de consumo en Ciudad Universitaria

La información proporcionada por personal de la DGOyC, respecto a la operación de los sistemas de desinfección instalados en el Campus Universitario fue escasa, siendo en su mayoría de forma verbal. Se tuvo acceso a reportes de mantenimiento realizados durante el 2008 por la empresa que instaló los sistemas de cloración. La información es muy escueta y específica respecto a cambios de piezas de equipos y los costos correspondientes, sin embargo no se cuenta con una valoración de la operación de los mismos. No se tuvo acceso a los diagramas de flujo de proceso (DFP), de tubería e instrumentación o plano general de localización de los sistemas, por lo que fue necesario realizar un levantamiento general del lugar para conocer el proceso de desinfección y generar con ello el DFP respectivo (ver Figura 5.7). Las autoridades de la DGOyC mantienen comunicación de manera regular con los operadores de los pozos de abastecimiento y tanques de almacenamiento, sin embargo se muestran renuentes a proporcionar información a personal que no sea de la dependencia.

Durante las visitas a campo se observó que en aquellos casos donde se emplea gas cloro para la desinfección del agua (pozos Vivero alto y Multifamiliar), se cuenta con el número telefónico de emergencia en caso de fugas, no obstante, los operadores no han sido capacitados para actuar en casos de emergencia y su conocimiento básicamente es empírico en cuanto a la operación de los equipos. Es de destacar que no se tienen en el lugar (pozos) equipos de respiración autónoma, detectores o planes de emergencia en caso de una fuga de gas cloro. Solo se tiene la hoja de datos de seguridad en el pozo del Vivero Alto.

Durante las actividades de muestreo de agua realizadas como parte de este trabajo (marzo-junio, 2010) se observaron cambios en cuanto al mantenimiento de los sitios tales como la instalación de maya ciclónica en el pozo Multifamiliar, mayor limpieza del área, instalación de nuevos medidores de flujo en el pozo del Vivero Alto. El suceso más sobresaliente se dio en el pozo de la Facultad de Química, donde el sistema de desinfección reinició operaciones (septiembre del 2010) después de 19 meses de estar parado por razones de mantenimiento durante; durante este periodo no se contó con un sistema auxiliar de cloración. Al respecto, no se tiene documentación sobre la calibración de la bomba dosificadora de hipoclorito sodio y fue posible tener acceso a manuales de operación dicho sistema.

Por parte del Departamento de Salud Ambiental (DSA) se obtuvo información importante de los registros de calidad de agua y sobre los equipos y/o métodos utilizados para la determinación de los parámetros de control que se llevan a cabo en la red de distribución: Cloro residual libre residual, pH, temperatura y análisis microbiológicos. Para los análisis microbiológicos, las muestras de agua son enviadas a un laboratorio certificado el cual se encarga de procesarlas para la determinar la presencia de Coliformes totales y Mesófilos. Un aspecto relevante es el hecho de que se utiliza la NOM-093-SSA1-1994 para diagnosticar la calidad microbiológica del agua, una norma para prácticas de higiene y sanidad en la preparación de alimentos la cual especifica como límite permisible de Coliformes totales de < 2 NMP/100 ml. Al respecto es importante resaltar que la NOM-



127-SSA1-1994 modificada en el 2000, la cual es la adecuada para el agua de consumo humano, el límite permisible que especifica es la ausencia o no detectable de dicho parámetro indicador.

Pozos de abastecimiento. En esta tabla se presentan datos de calidad de 44 números de parámetros fisicoquímicos y se comparan con los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-1994 modificada en el 2000. Desde el punto de vista fisicoquímico, el agua de dichas fuentes de abastecimiento cumple con los requerimientos de uso potable.

Aunque en esta tabla 5.2 no se presentan datos con respecto a la calidad microbiológica, los resultados de las determinaciones Coliformes totales y fecales realizadas por Calidad del agua del proyecto PUMAGUA indican eventos esporádicos de estos indicadores microbiológicos en los pozos de abastecimiento.

Por otro lado se han venido presentando eventos esporádicos de microorganismos patógenos que no están contemplados en la NOM-127-SSA1-1994 modificada en el 2000, es trascendente mencionar que se deben realizar estudios detallados para corroborar la aparición de estos microorganismos.

Tabla 5.2 Caracterización de agua de pozos de abastecimiento (PUMAGUA 2008)

PARÁMETRO	UNIDADES	LIMITE PERMISIBLE	Pozo 1	Pozo 2	Pozo 3
Aluminio	mg/L	0.20	<0.15	<0.15	<0.15
Arsénico (Nota 2)	mg/L	0.05	0.0020	0.0016	0.0018
Bario	mg/L	0.70	<0.15	<0.15	<0.15
Cadmio	mg/L	0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Cianuros (como CN-)	mg/L	0.07	<0.02	<0.02	<0.02
Cloro residual libre	mg/L	0.2-1.50	<0.06	<0.06	<0.06
Cloruros (como Cl-)	mg/L	250.00	74	45	49
Cobre	mg/L	2.00	<0.01	<0.01	<0.01
Cromo total	mg/L	0.05	<0.02	<0.02	<0.02
Dureza total (como CaCO ₃)	mg/L	500.00	112	130	107
Fenoles o compuestos fenólicos	mg/L	0.3	<0.001	<0.001	<0.001
Fierro	mg/L	0.30	<0.015	<0.015	<0.015
Fluoruros (como F-)	mg/L	1.50	0.42	0.16	0.68
Hidrocarburos aromáticos.			µg/L		
Benceno	µg/L	10.00	<0.10	<0.10	<0.10
Etilbenceno	µg/L	300.00	<0.10	<0.10	<0.10
Tolueno	µg/L	700.00	<0.01	<0.01	<0.10
Xileno (tres isómeros)	µg/L	500.00	<0.20	<0.20	<0.10
Manganeso	mg/L	0.15	<0.01	<0.01	<0.01
Mercurio	mg/L	0.001	<0.0005	<0.0005	<0.0005
Nitratos (como N)	mg/L	10.00	0.45	1.12	2.50
Nitritos (como N)	mg/L	1.00	0.002	0.002	0.002
Nitrógeno amoniacal (como N)	mg/L	0.50	0.32	0.49	0.32
pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH		6.5-8.5	7.00	7.08	6.97



Continuación tabla 5.2

Plaguicidas en microgramos/L:					
Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	µg/L	0.03	<0.02	<0.02	<0.02
Clordano (total de isómeros)	µg/L	0.20	<0.10	<0.10	<0.10
DDT (total de isómeros)	µg/L	1.00	<0.5	<0.5	<0.5
Gamma-HCH (lindano)	µg/L	2.00	<1.00	<1.00	<1.00
Hexaclorobenceno	µg/L	1.00	<0.5	<0.5	<0.5
Heptacloro y epóxido de heptacloro	µg/L	0.03	<0.02	<0.02	<0.02
Metoxicloro	µg/L	20.00	<10.00	<10.00	<10.00
2,4 – D	µg/L	30.00	<10.00	<10.00	<10.00
Plomo	mg/L	0.01	<0.005	<0.005	<0.005
Sodio	mg/L	200.00	35.53	19.89	24.82
Sólidos disueltos totales	mg/L	1000.00	299	303	287
Sulfatos (como SO₄=2)	mg/L	400.00	6	27	25
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	mg/L	0.50	<0.01	<0.01	<0.01
Trihalometanos totales	mg/L	0.20	<0.10	<0.10	<0.10
Yodo residual libre	mg/L	0.2-0.5	<0.02	<0.02	<0.02
Zinc	mg/L	5.00	<0.01	<0.01	<0.01

Diagrama de flujo del proceso de desinfección y evaluación con el método HAZOP.

Dado que no se tuvo acceso a los diagramas de flujo del proceso (DFP) fue necesario realizar un levantamiento generar con ello el DFP respectivo de desinfección, los resultados se muestran en la Figura 5.7. Este paso es importante para poder aplicar el método HAZOP y con ello evaluar los posibles riesgos de operación.

La desinfección se lleva a cabo con gas cloro desde un cilindro de 907kg, el flujo de gas entra a un dosificador a razón de 16kg/24 hrs, para posteriormente ingresar a un eyector y ser inyectado a la línea de agua cuyo flujo volumétrico es de 89L/s que sale del pozo que cuenta con una bomba sumergible de 200 hp.

El agua clorada llega a un tanque de almacenamiento y/o a distribución. Aunque no se cuenta con un historial de incidentes por fallo de equipo o fugas de gas cloro, dado que no se cuentan con detectores de fugas es importante realizar el análisis en la línea que sale del tanque y que ingresa al dosificador (línea 2, ver Figura 5.7).

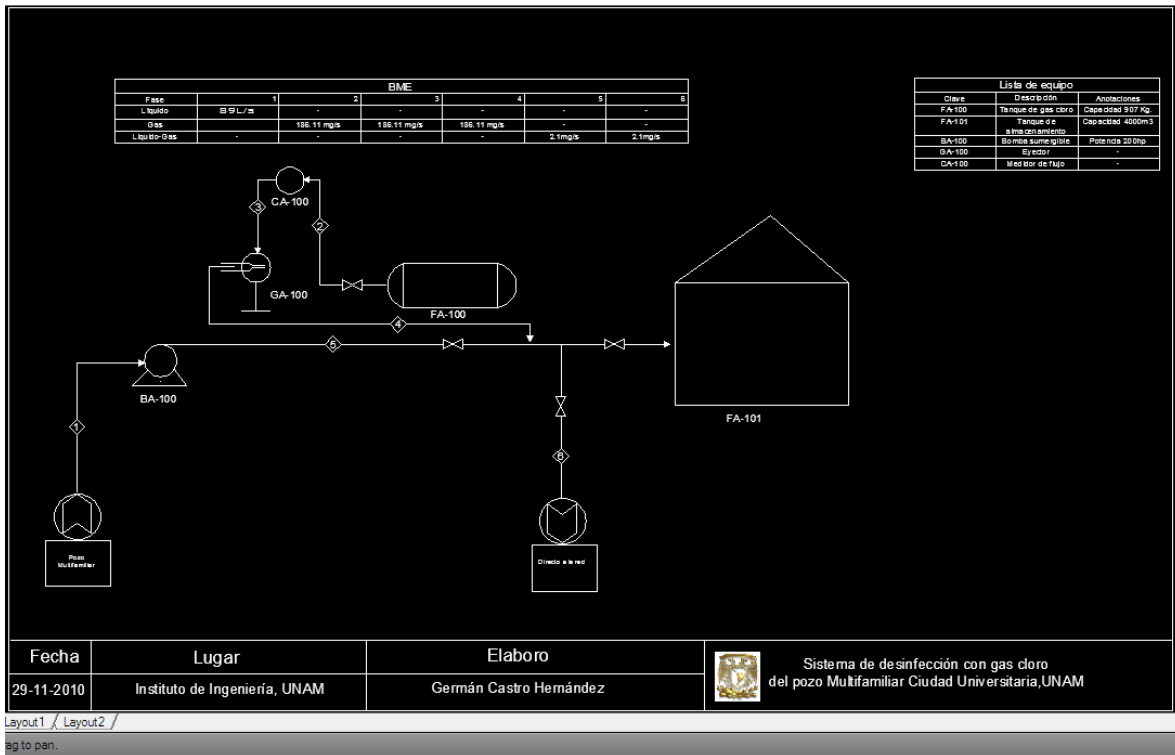


Figura 5.7 Diagrama de flujo de proceso de la desinfección con gas cloro del pozo Multifamiliar

Con la información recabada de los sistemas de desinfección y el DFP se conformaron las palabras guía de las líneas 1 y 2 para la aplicación del método HAZOP. Es importante mencionar que este método solo se aplicó al caso del pozo Multifamiliar.

A continuación se presenta la tabla con las palabras guía de la línea 1 que corresponde a la fuente de abastecimiento. Como se puede ver en la tabla 5.3 el mayor riesgo que se corre en la fuente de abastecimiento es la alta concentración de microorganismos resistentes al desinfectante utilizado actualmente, por lo que no se descarta el evaluar desinfectantes que sean capaces de inactivar este tipo de microorganismos.



Por otra parte podemos observar que una fuga no controlada es un riesgo latente, pero que puede ser controlada llevando a cabo las medidas necesarias (tabla 5.4).

Tabla 5.3 Palabras guía de la fuente de abastecimiento

Palabras Guía	Perturbación	Causas posibles	Repercusiones	Medidas necesarias
Mayor que o así como	Mayor número de microorganismos resistentes al cloro	Infiltración de materia orgánica al acuífero	Enfermedades gastrointestinales a la población expuesta.	Aumento de la dosis de gas cloro (mg/L). Monitoreo de la calidad de agua del acuífero mediante la determinación de los microorganismos existentes.
Parte de	Alta concentración (densidad microbiana) de microorganismos resistentes al cloro.	Contaminación de acuífero por descarga de aguas residuales.	Enfermedades gastrointestinales a la población expuesta.	Realizar la desinfección con un desinfectante capaz de inactivar este tipo de microorganismos.
Antes o después.	Presencia de microorganismos resistentes al cloro, después de la desinfección	Dosis inadecuada.	Enfermedades gastrointestinales a la población expuesta.	Aumento de dosis de desinfectante adoptado.
Otro	Ausencia de agua de abastecimiento.	Falla de bomba de extracción.	Mayor demanda de extracción agua de pozos 1 y 3.	Reparación de bomba sumergible. Utilizar línea de emergencia del pozo Vivero Alto para cubrir la demanda de agua. Rebombeo de agua de pozo 1 (Tanque Bajo a Tanque alto).



Tabla 5.4 Palabras guía de la línea tanque – regulador dosificador

Palabras Guía	Perturbación	Causas posibles	Repercusiones	Medidas necesarias
No	No flujo de gas	Inexistencia de gas cloro en el cilindro.	Agua no desinfectada.	Derivar el flujo al tanque para diluir con el flujo del pozo. Inspección de tanque de gas cloro por personal capacitado.
		Falla del regulador dosificador.	Lectura incorrecta de dosificación	Paro del proceso, verificar regulador dosificador o llamar al proveedor para tomar las medidas necesarias.
		Probable fuga.	Personal expuesto a intoxicación.	**Uso de equipo de seguridad, detectar la fuga con un trapo impregnado con solución amoniacal atado a un palo acercándolo al punto de sospecha, en caso afirmativo se formara un gas blanco. Conducir el gas que se está escapando por un manguera a una solución soda caustica o lechada de cal.
Más	Más flujo de gas cloro	Aumento de dosis por equivocación (error humano).	Sobre cloración	Regular el flujo del dosificador.
		Válvula atascada del clorador.	Sobre cloración	Usar equipo de seguridad e intentar regular válvula del clorador. En caso contrario cerrarla.
Menos	Menos flujo de gas cloro	Disminución de dosis	Disminución ó ausencia de residual en la red de distribución	Ajustar la dosis.
		Probable fuga.	Personal expuesto a intoxicación.	**
Otro	Inexistencia de gas cloro	Falta de pago al proveedor	Agua distribuida sin desinfección	Pago oportuno al proveedor para asegurar la existencia del reactivo. Tener un taque de reserva.



5.3 Desinfección con ozono e hipoclorito de sodio

El arreglo experimental sirvió para establecer las condiciones necesarias para obtener experimentalmente las dosis de ozono e hipoclorito de sodio para la desinfección y con ello alcanzar los residuales deseados. Adicionalmente fue de utilidad para realizar pruebas de demanda de ozono e hipoclorito de Sodio.

Demanda de oxidantes

Ozono

Con las condiciones de operación establecidas se procedió a realizar los análisis experimentales para determinar la demanda de ozono del agua de los pozos de abastecimiento. La tabla 5.5 muestra los resultados para cada pozo. La dosis aplicada para el pozo de la Facultad de Química fue de 0.08mg/L, para el Multifamiliar de 0.09mg/L y para el Vivero Alto de 0.08mg/L.

Tabla 5.5 Resultado de la determinación experimental de la demanda de ozono de pozos de abastecimiento

Pozo	Demanda de Ozono (mg/L)
Facultad de Química	0.08
Multifamiliar	0.09
Vivero Alto	0.08

Hipoclorito de sodio

Se encontró que la demanda de cloro de los 3 pozos fue de 0.3 mg/L, esto puede deberse a que el agua extraída de ambos pozos tiene características fisicoquímicas similares (pH, turbiedad, etc.) ya que ambos están ubicados dentro del mismo acuífero.

Pruebas de desinfección con la combinación O₃ - NaOCl

Bajo las condiciones establecidas, el ozono residual promedio a la salida de la columna en las muestras de la Facultad de Química fue de 0.28±0.08, para el Multifamiliar de 0.26±0.09, y para el Vivero alto de 0.29±0.07. En todos los casos el promedio de las determinaciones de ozono residual estuvo muy cercano al residual que se planteo como objetivo (0.3mg/L).

La cantidad de Cloro residual libre promedio para el agua de la Facultad de Química fue de 0.38±0.09mg/L, en el Multifamiliar de 0.41±0.08 y en el Vivero Alto de 0.33±0.09; los resultados muestran que después de un día completo de haberse dosificado, el decaimiento de cloro es mínimo al estar entre [0.41 y 0.33mg/L], con lo que se conserva un residual que está dentro de los límites de [0.2 a 1.5mg/L] que maneja la NOM-127-SSA1-1994(2000).



La tabla 5.6 muestra el promedio de los resultados de la determinación de los parámetros fisicoquímicos antes de la desinfección y posteriormente en la tabla 5.7 los resultados de estos parámetros después de la desinfección, como se puede observar no hubo un cambio significativo.

Tabla 5.6 Resultados de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos antes de la desinfección

Parámetro	Pozo Facultad de Química	Pozo Multifamiliar	Pozo Vivero Alto	Límite permisible NOM-127-SSA1-1994 modificada en el 2000.
pH	7.50±0.32	7.42±0.31	7.48±0.26	6.5-8.5
Turbiedad (UNT)	1.03±0.45	1.22±0.78	1.03±0.51	5
Sólidos disueltos totales (mg/L)	234±22	226±44	204±12	1000
Coliformes totales (UFC/100mL)	2	0	6	Ausencia o no detectable
Coliformes fecales (UFC/100mL)	0	1	1	Ausencia o no detectable

Tabla 5.7 Resultados de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos después de la desinfección

Parámetro	Pozo Facultad de Química	Pozo Multifamiliar	Pozo Vivero Alto	Límite permisible NOM-127-SSA1-1994 modificada en el 2000.
pH	7.78±0.32	7.87±0.33	7.76±0.20	6.5-8.5
Turbiedad (UNT)	0.94±0.47	1.12±0.52	0.87±0.35	5
Sólidos disueltos totales (mg/L)	237±19	237±32	230±78	1000
Coliformes totales (UFC/100mL)	0	0	0	Ausencia o no detectable
Coliformes fecales (UFC/100mL)	0	0	0	Ausencia o no detectable

pH

En la Figura 5.8 se puede observar que el pH de las muestras de agua de la Facultad de Química estuvo dentro del rango de [7.1 y 8.1]. El pH de las muestras del Multifamiliar presentaron cambios más significativos, ya que el extremo superior estuvo cerca del límite permisible de la norma al ser de 8.4, sin embargo esto se debe al efecto desinfectante del Hipoclorito. Las muestras del Vivero Alto fueron las que tuvieron un comportamiento intermedio con respecto a las de los pozos anteriores, ya que el pH vario de entre [7.5 y 8.2].

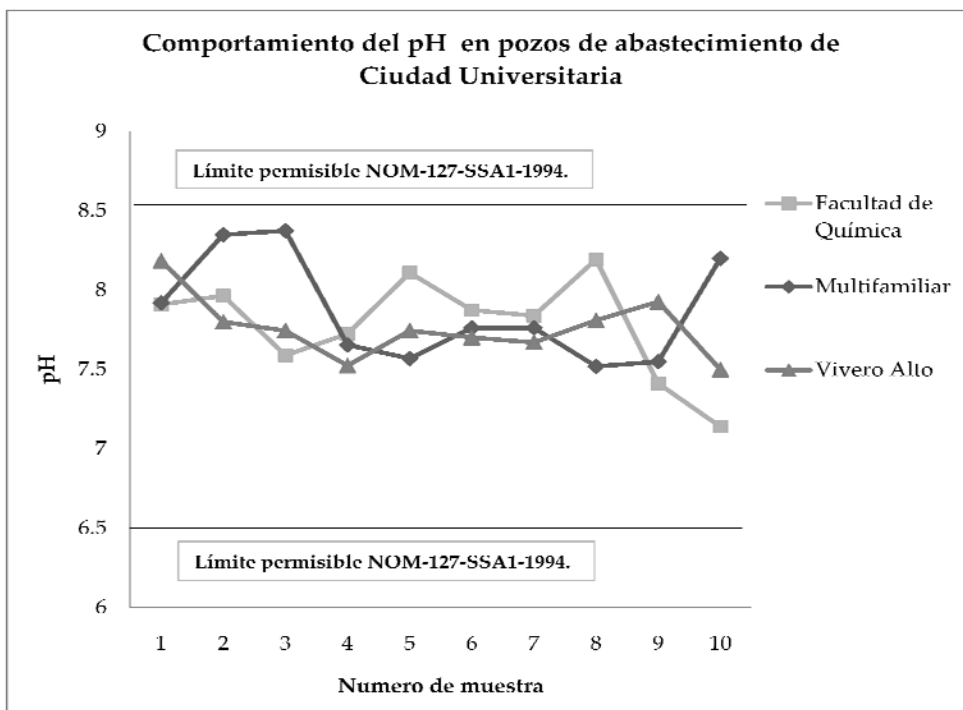


Figura 5.8 Variación del pH después de la desinfección de agua de pozos de abastecimiento

Turbiedad

La turbiedad es un parámetro importante de la desinfección ya que un agua turbia reduce la absorción del cloro, por lo que la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda una turbiedad menor a 5 UNT, siendo la ideal la menor a 1 UNT.

La turbiedad del agua cruda de los pozos de abastecimiento en promedio está entre 1.22 y 1.03 lo cual la hace ideal para el tratamiento. Al final el promedio en las muestras fue de 0.81 a 1.12 UNT. Por lo que la desinfección Ozono-Hipoclorito de sodio no afecta a este parámetro.

En la Figura 5.9 se muestran gráficamente los resultados de las determinaciones de este parámetro en particular.

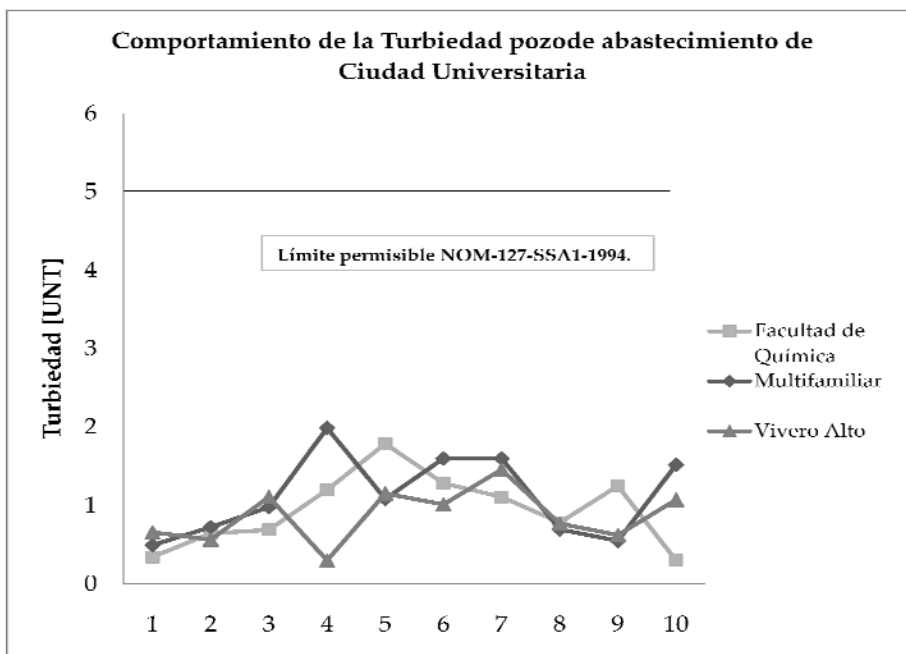


Figura 5.9 Variación de la turbiedad después de la desinfección de agua de pozos de abastecimiento *Sólidos disueltos totales (SDT)*.

En la Figura 5.10 se muestran los resultados de la determinación de los Sólidos disueltos totales de los pozos de abastecimiento después de la desinfección.

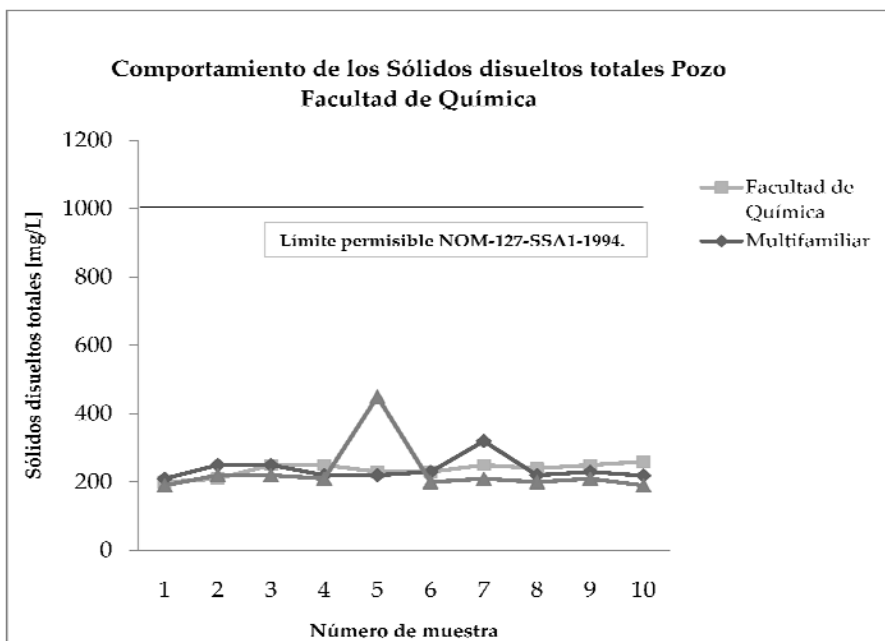


Figura 5.10 Variación de los Sólidos disueltos totales después de la desinfección de agua de pozos de abastecimiento.



Parámetros microbiológicos

Uno de los parámetros más importantes en la desinfección de aguas naturales es la determinación de Coliformes totales y fecales, este parámetro es un indicador de la calidad de agua para consumo humano.

Coliformes totales

En la muestra tomada en el pozo de la Facultad de Química el 17 de mayo del 2010 se encontraron 2UFC/100mL, sin embargo fue el único que se presentó durante los 10 muestreos por lo que no es representativo para decir que hay contaminación en el pozo.

Por otro lado en las 10 muestras del pozo Multifamiliar no hubo presencia de estas bacterias.

El problema se presentó en el Vivero Alto, donde se encontró presencia de Coliformes totales en la mitad de las muestras, los casos más sobresalientes se dieron el 28 de abril con 6UFC/100mL y el 19 de mayo con 7UFC/100mL, la primera muestra que presentó presencia de estas bacterias se tomó en la misma semana que la del pozo de la Facultad de Química.

Como antecedente se tiene que en el 2008 el área de calidad del agua del proyecto PUMAGUA encontró presencia de Coliformes totales en los 3 pozos: 1UFC/100mL en el pozo de la Facultad de Química, 2 UFC/100mL en el Multifamiliar y 1 UFC/100mL en el Vivero Alto.

Coliformes fecales

Por otro lado en la muestra tomada en el pozo del Multifamiliar el 6 de abril del 2010 se encontró 1UFC/100mL de Coliformes fecales; en el Vivero Alto se presentó 1UFC/100mL el día 19 de mayo que coincide con la presencia de Coliformes totales.

El área de Calidad del agua del proyecto PUMAGUA no encontró presencia de Coliformes fecales en ningún pozo.

Solo se presentan las graficas de los resultados de las determinaciones de Coliformes totales (Figura 5.11 - 5.12), debido a su presencia recurrente en las muestras tomadas de agua cruda de los pozos de abastecimiento (pozo de Facultad de Química y Vivero Alto).

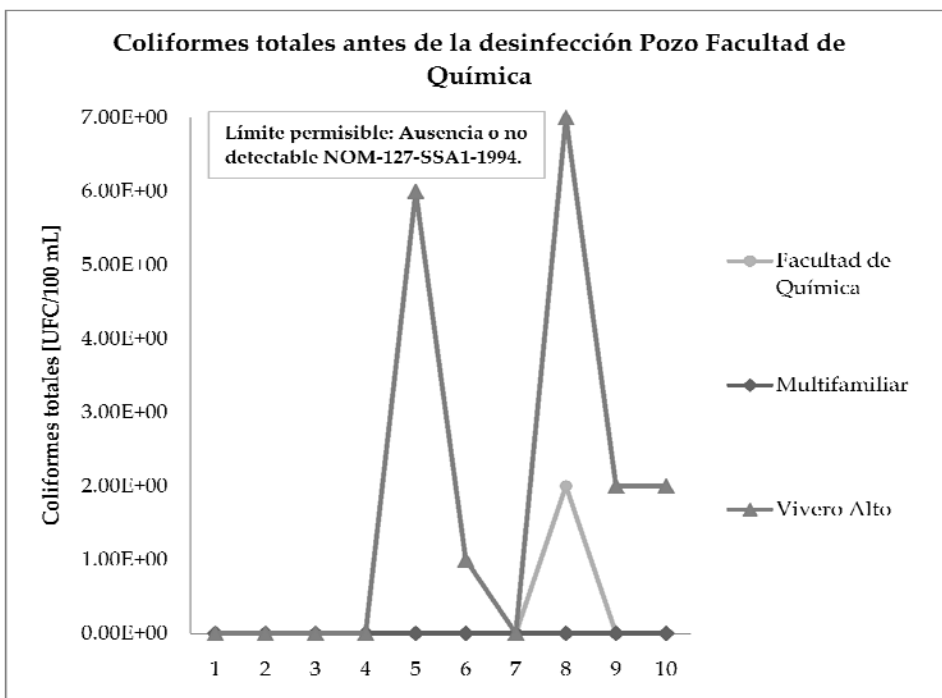


Figura5.11 Variación de las Coliformes totales antes de la desinfección.

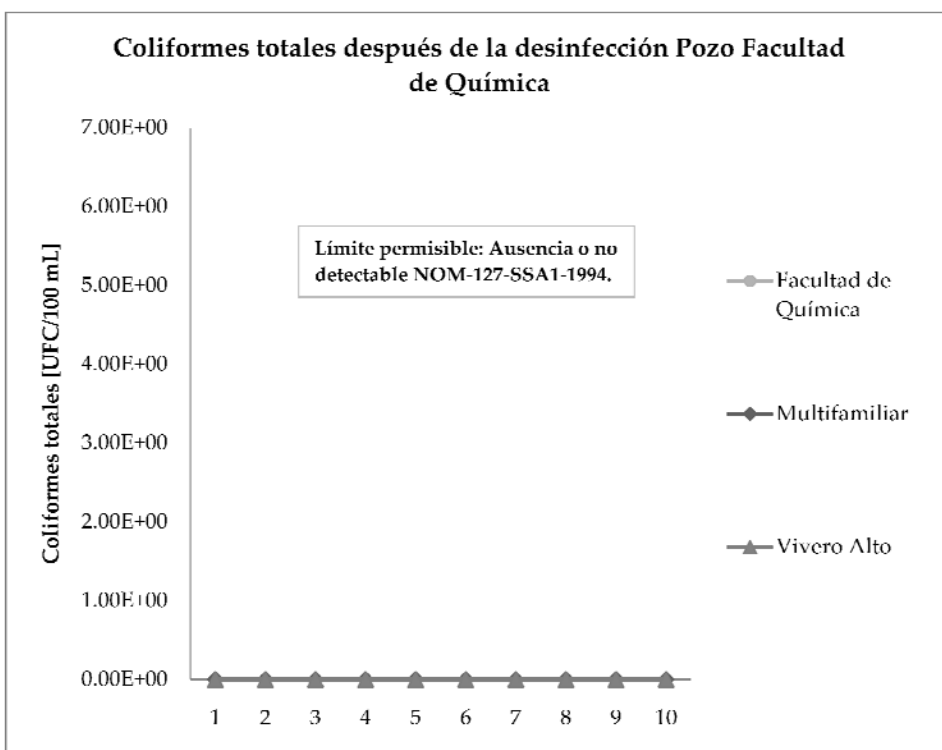


Figura5.12 Variación de las Coliformes totales después de la desinfección.



5.4 Estimación teórica de los costos de la desinfección con ozono e hipoclorito de sodio.

La dosis necesaria para la desinfección con ozono para el flujo del pozo de la Facultad de Química fue de 0.38mg/L, para el pozo Multifamiliar 0.35mg/L y para el pozo del Vivero Alto 0.37mg/L.

La producción de ozono para el flujo de agua del pozo de la Facultad de Química fue de 0.06 Kg/h (3lb/h), para el pozo Multifamiliar 0.15 Kg/h (8lb/h) y para el Vivero Alto 0.08 Kg/h (4.3lb/hr).

Conociendo el flujo másico (lb/h) se hace uso de la Figura 2.24 para estimar el costo en libras por hora de ozono, tomando como referencia el costo en dólares para un flujo másico de 100 lb/h y se extrapola debido a que la grafica no abarca un rango menor a este valor, dando como resultado que el costo de la producción de ozono necesaria para desinfectar el agua del pozo de la Facultad de Química es de 270 dólares, para el pozo Multifamiliar 712 dólares y para el Vivero Alto de 381 dólares.

El costo del equipo de generación de ozono para el pozo de la Facultad de Química fue de 199099 pesos, para el pozo Multifamiliar de 526479 pesos y finalmente para el pozo del Vivero alto de 281409 pesos, estos costos representan el 53% del costo total de capital, basándonos en estos costos se calculara el costo de la construcción y el Contactor (Ver tabla 4.3).

El costo de construcción del sistema de ozonación para el pozo de la Facultad de Química es de \$93915, para el pozo Multifamiliar \$248340 pesos y para el Vivero Alto de \$132741 pesos.

El costo para el Contactor para el pozo de la Facultad de Química es de \$82645 pesos, para el pozo Multifamiliar \$218539 pesos y para el pozo del Vivero Alto de \$116812 pesos.

El costo total del capital para un sistema de ozonación para la Facultad de Química fue de \$375659 pesos, para el pozo Multifamiliar fue de \$993357 pesos y finalmente para el pozo del Vivero Alto fue de \$530961 pesos.

El costo anual para la desinfección de ozono con el 16% de IVA y 20 años de amortización para el pozo de la Facultad de Química fue de \$63362 pesos, para el pozo Multifamiliar fue de \$167547 pesos y para el Vivero Alto fue de \$89596 pesos.

Una vez que se tiene el costo anual de ozonación se divide entre los flujos de agua que se extraen en un año de operación por cada pozo. El agua extraída en un año del pozo de la Facultad de Química es de 977616 m³/año, para el Multifamiliar 2806704 m³/año y para el Vivero alto de 1419120 m³/año.

El costo de capital anual para un sistema de ozonación para el pozo de la Facultad de Química es de \$0.064 pesos/m³, para el pozo Multifamiliar fue de \$0.059 pesos/m³ y para el pozo del Vivero Alto de \$0.063 pesos/m³.



Los volúmenes necesarios para la desinfección secundaria con hipoclorito de sodio al 13% y que determinaron las capacidades de las bombas dosificadoras fueron: pozo de la Facultad de Química 0.3 L/h, Multifamiliar 0.9 L/h y Vivero Alto 0.35L/h.

El costo promedio de una bomba dosificadora fue de 517.4 dólares tomando como base el costo del dólar de 12.5 pesos en el 2010, el costo de cada bomba fue de 6468 pesos.

El costo del desinfectante para un año de operación del pozo de la Facultad de Química fue de 22653 pesos, Multifamiliar \$67966 pesos, Vivero Alto \$26429 pesos. Por lo tanto el costo total fue de \$29121 pesos para Química, \$74434 pesos para el Multifamiliar y \$32897 pesos para el Vivero Alto.

El costo anual tomando en cuenta el IVA del 16%, y 20 años de amortización para el pozo de la Facultad de Química fue de \$495057 pesos, Multifamiliar \$1265378 y Vivero Alto \$558943 pesos.

En la Facultad de Química se extraen 977616 m³/año, en Multifamiliar 2806704 m³/año y en el Vivero Alto 1419120 m³/año.

El costo por metro cubico desinfectado con hipoclorito de sodio al 13% para el pozo de la Facultad de Química fue de \$0.5 pesos, Multifamiliar \$0.45 pesos y Vivero Alto \$0.39 pesos.

El costo anual por metro cubico con ozono e hipoclorito de sodio para el pozo de la Facultad de Química fue de \$0.60 pesos, Multifamiliar \$0.50 pesos y Vivero Alto \$0.45 pesos.



Conclusiones

Mediante el diagnóstico, análisis y procesamiento de la información recabada durante la presente tesis se identificaron puntos vulnerables en la operación del sistema de desinfección de la red de abastecimiento de agua de Ciudad Universitaria.

1. Del diagnóstico se desprenden las siguientes conclusiones mismas que deben ser tomadas en consideración como propuestas de mejoras al sistema de desinfección:

-El personal encargado de la operación de los sistemas de cloración carece de la formación y la capacitación requerida para dicha tareas. Se requiere implementar y ejecutar programas de capacitación para la operación y mantenimiento de los sistemas de cloración instalados, poniendo especial atención a aquellos a base de cloro gas por el riesgo que implica para la seguridad del operador y la de la población expuesta.

-Se adolece de medidas de seguridad adecuadas en las áreas de trabajo y durante en el manejo de equipo y reactivos, indispensables para la seguridad del personal y de la población expuesta.

-Solo se tienen datos de la sustitución de refacciones de cloradores en los 3 pozos, siendo insuficientes para tomarlos en cuenta. No se cuenta con registros históricos sobre el mantenimiento y operación de los equipos de cloración instalados, que son de vital importancia dada la antigüedad que estos tienen (aproximadamente 50 años), a fin de poder evaluar y garantizar su adecuado funcionamiento y de preservar su vida útil.

-Durante la supervisión del funcionamiento de los sistemas de cloración, uno se encontraba fuera de operación por mantenimiento y no se disponía de un equipo sustituto.

-La Metodología HAZOP sirvió para identificar puntos vulnerables de los sistemas de Desinfección (pozo Multifamiliar). El resultado mostro que es importante poner especial atención en los equipos de dosificación así como de la fuente de abastecimiento.

2. Del control de calidad del agua se concluye que no se cuenta con un programa de monitoreo acorde a lo establecido en la NOM-179-SSA1-1998 y nom-127-SSA1-1994 modificada en el 2000.

-Se analiza y da seguimiento al Cloro residual libre y Coliformes totales aunque sin la frecuencia, metodología y límites de calidad adecuados. Existen puntos en los extremos de la red de distribución de agua en donde los niveles de Cloro residual libre residual son nulos, por lo que no se está garantizando la calidad microbiológica del agua. Cerca del 20% de las dependencias reciben agua sin los niveles adecuados de cloro residual.

-La información consultada acerca de resultados de calidad de agua de pozos de abastecimiento del proyecto PUMAGUA (Informe 2009), indican posible contaminación microbiológica por bacterias patógenas presumiblemente resistente al cloro, por lo que se recomienda evaluar métodos de desinfección alternativos más eficaces como el evaluado en la presente tesis.



3. Mediante las pruebas experimentales fue posible determinar los requerimientos de dosis de ozono y de NaOCl para desinfectar y mantener los residuales de cloro recomendados por la NOM-127-SSA1-1994 modificada en el 2000.

-La desinfección mediante la combinación O_3 -NaOCl garantiza la remoción de bacterias patógenas, incluyendo las resistentes a cloro, y es una alternativa técnicamente factible de implementar. Por las características fisicoquímicas del agua de las fuentes de abastecimiento de ciudad universitaria y la baja demanda de oxidantes, puede ser una opción competitiva, sobre todo si se considera que mejorara la aceptación de los consumidores y se tendrá un ahorro en el consumo de agua embotellada.

4. Los costos del sistema de ozono-hipoclorito de sodio para los 3 pozos de abastecimiento son de \$1.55 pesos, si se compara con el costo actual del metro cubico de agua potable en el Distrito federal que es de \$1.504 pesos/m³ CONAGUA (2006), se puede decir que el precio es aceptable.

Recomendaciones

1) Diseñar y poner un marcha un programa de monitoreo de calidad del agua de la red de suministro acorde a lo establecido en la NOM-179-SSA1-1998, y hacer una valoración y actualización del mismo en función de los resultados obtenidos.

2) Utilizar un método comparador con características mínimas de medición a través de escala colorimétrica, entre los valores obligatorios de 0.2 a 1.5 mg/L, utilizando reactivo DPD (dialquil-1,4-fenilendiamina o N, N-dietil -p-fenilendiamina), para el análisis de Cloro residual libre; y el método de membrana para Coliformes totales por su fácil aplicación.

3) La calidad del agua debe ser diagnosticada con base en los límites establecido en la NOM-127-SSA1-1994 modificada en el 2000.

4) Se recomienda revisar los sistemas de cloración, la dosis aplicada y la operación misma de la red para garantizar los niveles de Cloro residual libre en los extremos de la red.



Bibliografía

- I. AINIA (2003), centro tecnológico. Introducción a la aplicación de ozono como agente de desinfección de equipos y Superficies.
- II. American Water Works Association (1998). Water Chlorination principles and practices. Diciembre.
- III. APHA-AWWA-WPCF (1992). Métodos normalizados para el análisis de agua potable y residual. Editorial Díaz de Santos. 1992. P.P 455-457
- IV. Arboleda, VJ (2000) Teoría y práctica de la purificación del agua. Teoría de la Sedimentación del Agua, Diseño de sedimentadores. Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
- V. Bairón, PL (2002). Gestión de recursos hídricos. Ediciones UPC. 2da. Edición. PP 279.
- VI. Cairncross, S; Feachem, RG (1997). Environmental health engineering in the tropics: an introductory text. 4. Ed. Chinester, Jhon Wiley and Sons. PP 283., apud HELLER, L. Saneamiento e saúde. Brasília, OPAS/OMS.97p.
- VII. Campos, R (2005). Evaluación de la operación, mantenimiento y mejoramiento de 12 plantas de tratamiento de agua residual en Guatemala, El Salvador y Honduras. Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza (CAITE). Turrialba, Costa Rica.
- VIII. Christman, K (1998). Trabajo presentado en el Simposio OPS: Calidad de Agua, Desinfección Efectiva. Publicado también en CD-ROM Disponible en la OPS/CEPIS.
- IX. CONAGUA (2010). Estadísticas del Agua en México.
- X. Deininger, R; Skadsen, J; Sanford, L; Myers, A (1998). Desinfección del agua con ozono. Trabajo presentado en el Simposio OPS: Calidad de Agua, Desinfección Efectiva. Publicado también en CD-ROM Disponible en la OPS/CEPIS.
- XI. DeMers, LD; et al (1996). Ozone System Energy Optimization Handbook, AWWA Research Foundation, 1996, ISBN 0-9648877-1-1
- XII. Diario Oficial de la Unión Europea (2003). Directiva 2003/40/CE de la COMISIÓN
- XIII. DuRon, B (1982). "Ozone Generation with Ultraviolet Radiation", in Rice and Netzer, 1982, PP 77-84. D. FAVIS, U.S. Patent 2,955,123, ca 1964.
- XIV. Geering, F (1995). Optimization of Ozone Plants for Water Works in Switzerland. Ozone Science and Engineering 17(1).
- XV. Gray, NF (1996). Calidad del agua potable. España. Ed. Acriba
- XVI. Gutiérrez, OC (2006). Curso de actualización en geohidrología. San Luis Potosí. PP 6-10.
- XVII. Haas, C.N (1999). Disinfection. In Water Quality and Treatment, 5th ed. Raymond D. Letterman, Ed. New York.
- XVIII. Hach Company (2000). Manual de Análisis de Agua. Editorial Casa Rocas. P.P 100-107.
- XIX. Hazen and Sawyer (1992). Disinfection Alternatives for Safe Drinking Water. Instituto de Ingeniería, UNAM



- XX. Kemmer, FN (1998). Manual del agua, su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. Nalco Chemical Company, Tomo I. PP 2-11,
- XXI. Kerwin, LR (2005) Ozone in Drinking Water Treatment. Process Design, Operation, and Optimization. PP 102-107.
- XXII. Langlais, B; Reckhow, DA; Brink, DR (1991) Ozone in water treatment, Application and Engineering. Lewis Publishers, Michigan, USA.
- XXIII. Lin y Wang (2003). Gas-induced agitated reactor equipped with dual pitched blades.
- XXIV. Luis, AD (2001). Processos de Desinfeccao e Desinfetantes Alternativos na Producao de Agua Potavel. Programa de Pesquisa Em Saneamiento Básico 2.
- XXV. Manual de monitor de ozono Modelo APIM465H (2007). PP 7.
- XXVI. Martínez, PE; et al (2006). Fundamentos de hidrogeología. Editor Mundi-Prensa Libros. PP 75-77
- XXVII. Masschelein, WJ (1992). Processus Unitaires du Traitment de Léau Potable. Instituto de Ingeniería, UNAM.
- XXVIII. Mazarí, Mariza; Mazarí, Marcos (2007). Efectos ambientales relacionado con la extracción de a gua en la Mega ciudad de México .AIDIS. Vol 8.No.2.pp)
- XXIX. Muñoz, R; et al. (2005) Hidrología Agroforestal. Editor Mundi-Prensa Libros. PP 262.
- XXX. Nicholas, GP (2005). Water Treatment Operator Handbook, Instituto de Ingeniería. UNAM, PP. 105-116
- XXXI. Nielsen, D (1991). Practical Handbook of Groundwater Monitoring. Lewis Publishers. Chelsea (Michigan), USA.
- XXXII. NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización, modificada en el 2000
- XXXIII. NOM-093-SSA1-1994 Bienes y servicios. Preparación de alimentos que se ofrecen en establecimientos fijos. Especificaciones sanitarias. Cédula de verificación
- XXXIV. NOM-AA-124-SCFI-2006 Potabilización del agua para uso y consumo humano – hipocloritos de sodio y calcio – especificaciones y métodos de prueba
- XXXV. OPS/ILS I. (1996). *La calidad del agua en América Latina. Ponderación de los riesgos microbiológicos contra los riesgos de los subproductos de la desinfección química*, ILSI Press, Washington DC.
- XXXVI. OPS (1999). La desinfección del agua. Publicación OPS/HEP/99/32.
- XXXVII. Orta, MT; et al (2000). Desinfección para Sistemas de Agua Potable y Saneamiento. CONAGUA.
- XXXVIII. PUMAGUA (2010). Manual de técnicas analíticas para determinar la calidad del agua potable, agua residual y agua residual tratada.
- XXXIX. Reiff, F.; Witt, V (1995). Guía para la selección y aplicación de tecnologías de desinfección del agua para consumo humano en pueblos pequeños y comunidades rurales en América Latina y el Caribe. Documento OPS/OMS, Serie Técnica No. 30.



- XL. Rice, RG (1996). *Ozone Reference Guide*, Report CR-106435 (St. Louis, MO: Electric Power Research Institute, Community Environmental Center, 1996).
- XLI. Rojas, R; Guevara, S (1999). Celdas electrolíticas para producción in situ de hipoclorito de sodio; Publicación CEPIS/GTZ.
- XLII. Roustan M. and al (1998). Development of a method of ozone demand of water. OS&E, vol. 20, PP. 513-520.
- XLIII. Roustan, M (2007). Aplicación del proceso de ozonación del agua. Aspectos de Ingeniería. Cursos UNAM.
- XLIV. Storch, JM (1998). Manual de seguridad industrial en plantas químicas y petroleras. Mc Graw Hill.PP. 239-245
- XLV. Solsona, F (2001). *Water disinfection for small community supplies*, Capítulo de desinfección del agua para el manual del IRC “Small Community Supplies” y disponible como separata en la OPS/CEPIS.
- XLVI. Witt, VM; Reiff, FM (1993). “La Desinfección del Agua a Nivel Casero en Zonas Urbanas Marginales y Rurales”. Washington, D.C., OPS.

Artículos científicos

- I. Andrew, R (2001). Water wells and unique treatment needs. *Water Conditioning & Purification*. 43(12).
- II. El-Din, G; Smith, DW (2001). “Designing Ozone Bubble Columns: A Spreadsheet Approach to Axial Dispersion Model”, *Ozone Sci. & Eng.* 23(5): 369-384.
- III. Gehra, R; Wagner, M; Veerasubramaniana, P; Payment, P (2003) Disinfection Efficiency of Peracetic Acid, UV and Ozone After enhanced Primary Treatment of Municipal Wastewater.
- IV. Hoja de datos de tecnología (1999). Desinfección de aguas residuales con Ozono. EPA 832-F-99-063
- V. Kruithof, JC; Masschelein, WJ (1999). State of the Art of the Application of Ozonation in Benelux Drinking Water Treatment. *Ozone Science and Engineering*. 21(2).PP 139-152.
- VI. Liberti, L; Notarnicola, M (1999). Tratamiento Avanzado y desinfección de aguas residuales para su reutilización en la agricultura. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 40, No. 4-5. PP. 235-245.
- VII. Orta, L; et al (1998). Improvement of wastewater coagulation using ozone. *Ozone Science & Engineering*. Vol. 20, PP 151-162
- VIII. Ozono (1999). Manual de Orientación de Desinfectantes y oxidantes. EPA.
- IX. Rice, G (1999). Ozone in the United States of America – State of the Art. *Ozone Science and Engineering*, 21 (2): PP 99-118.
- X. RICE, RG (2002). Century 21 – Pregnant With Ozone. *Ozone: Science & Engineering* 24(1-15).



Bibliografía electrónica

- I. [www.cepis.ops-oms.org/bvsacg/fulltext/desinfección/capitulo 6.pdf](http://www.cepis.ops-oms.org/bvsacg/fulltext/desinfección/capitulo%206.pdf)
- II. <http://www.fcyt.umss.edu.bo/docentes/29/practicas/practica8.pdf>
- III. www.conagua.gob.mx/OCB07/NotaP/agua.pdf
- IV. [http://www.imta.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=181:agua-subterranea&catid=52:enciclopedia-del-agua&Itemid=80.](http://www.imta.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=181:agua-subterranea&catid=52:enciclopedia-del-agua&Itemid=80)
- V. http://www.prominent.com.mx/desktopdefault.aspx/tabid-5629/72_read-941/
- VI. http://pure-process.com/L-empaques_rubberfab.html 26-06-2010
- VII. <http://www.mazzei.net/es/index-56185.html> 26-06-2010

Anexos

A.1 Cuantificación de ozono en el líquido (ozono residual)

La dificultad de medir el ozono residual en una solución acuosa es estrictamente una consecuencia de su naturaleza, ya que el ozono se descompone con suma facilidad. El método de índigo es cuantitativo, selectivo y simple; además reemplaza a los métodos basados en la determinación de oxidantes totales. Es aplicable a agua de lagos, ríos, aguas subterráneas conteniendo manganeso, agua subterránea extremadamente dura y agua residual tratada biológicamente. Este método se basa en el principio siguiente: La disminución de la absorbancia es lineal con el incremento de la concentración del ozono.

La constante de proporcionalidad a 600 nm es 0.42 ± 0.01 cm/mg/L [Standar Methods, 1992]. Se tiene conocimiento de que existe algunos compuestos que interfieren en la medición, tal es el caso del peróxido de hidrogeno y de los peróxidos orgánicos, que decoloran el reactivo de índigo muy lentamente. El peróxido de hidrogeno no interfiere si el ozono se miden en menos de 6 horas después de añadir los reactivos. Los peróxidos orgánicos pueden reaccionar con mayor rapidez. El Fe (III) y Mn (III) no interfieren pero este último es oxidado por el ozono a formas que decoloran el reactivo. El cloro también interfiere, pero puede ser enmascarado por el ácido malónico. El bromo, que puede formarse por la oxidación de Br^- , interfiere (1 mol Br^- corresponde a 0.4 moles de ozono).

Equipos: Espectrofotómetro

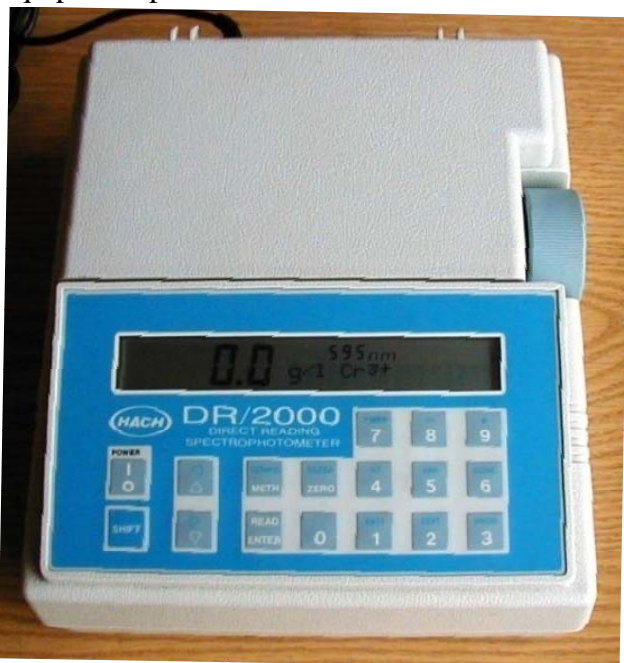


Figura A.1 Espectrofotómetro HACH para medir la absorbancia



Reactivos:

Solución madre índigo. En un matraz aforado de 1L, agregar 500 ml de agua, agregar 1 ml de ácido fosfórico concentrado y añadir con agitación, 770 mg de trisulfonato potásico de índigo, aforar con agua destilada. Una dilución 1:100 exhibe una absorbancia de 0.02 cm a 600 nm. La solución madre es estable por cuatro meses almacenada en frasco ámbar.

Reactivo I. En una matraz aforado de 1 L, añadir 20 ml de solución madre, 10 g de fosfato monobásico de sodio y 7 ml de ácido fosfórico concentrado. Diluir hasta el aforo (almacenar en frasco ámbar). *Reactivo II.* Proceder como el reactivo de índigo I, añadiendo 100 ml de solución madre en lugar de 20 ml.

Procedimiento espectrofotométrico

Para un intervalo de concentración de ozono de 0.01 a 0.1 mg/L. Añadir 10 ml de reactivo de índigo I a dos matraces aforados de 100 ml. Llenar uno de ellos hasta el aforo con agua destilada (blanco) y el segundo con la muestra a analizar. Medir la absorbancia a 600 nm lo antes posible y siempre dentro de las 4 horas siguientes. Utilizar celdas de 10 cm de largo y 1 cm de ancho. Para un intervalo de concentración de ozono de 0.05 a 0.5 mg/L. Proceder como el punto anterior pero utilizar 10 ml de reactivo índigo II en lugar del reactivo I. Medir preferentemente la absorbancia en celdas de 4 o 5 cm. Para concentraciones superiores a 0.3 mg/L se procede a utilizar el reactivo de índigo II, pero utilizando un volumen menor de muestra. Diluir la mezcla resultante a 100 ml con agua destilada.

Con la ecuación 4.2 se calcula la concentración de ozono en la fase acuosa.

$$[O_3]_{l,r} = \frac{(A_b - A_m) * (100)}{0.42 * (V_m) * (C)} \dots \dots \dots (4.2)$$

- [O₃]_{l,r}= concentración de ozono residual en fase acuosa (mg de O₃/L)
- Ab= absorbancia del blanco
- Am= absorbancia de la muestra
- 0.42= factor de sensibilidad de 20000/cm para el cambio de absorbancia (600 nm) por mol de ozono añadido por litro.
- V_m= volumen de muestra (ml)
- C= recorrido de la luz en la celda (cm)

A2. Dirección General de Servicios Médicos (DGSM)



Figura A2.1 Departamento de Salud Ambiental (DGSM)



Figura A2.2 Equipo de campo para medición de Cloro residual libre con el método de la ortotolidina



Figura A2.3 Mechero de alcohol y alcohol isopropílico utilizados en la toma de muestras en grifos para la determinación de Coliformes Totales.

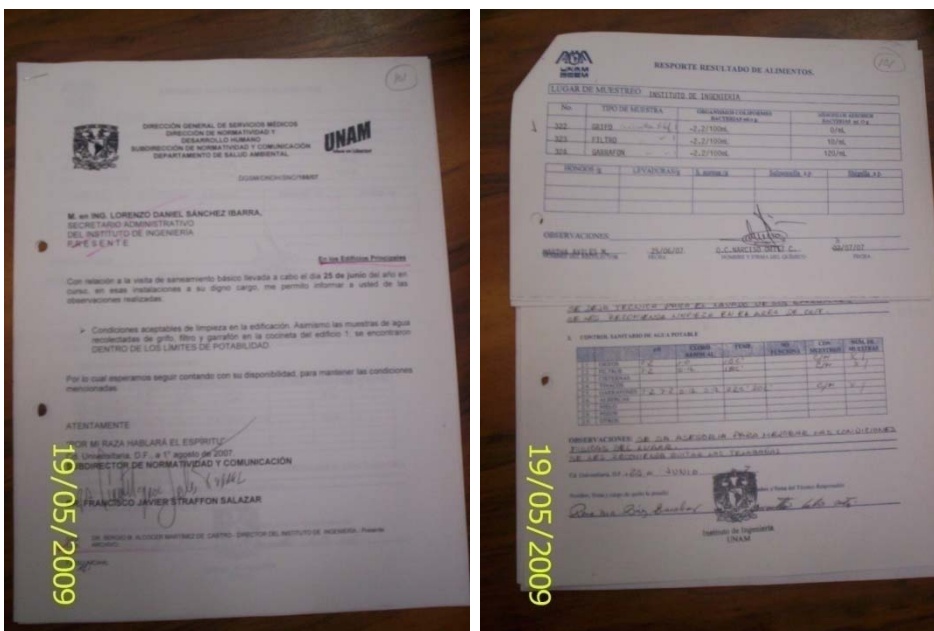


Figura A2.4 Dictámenes de resultados de cloro residual y Coliformes totales



Cloro residual libre A2.1 Lista de dependencias de Ciudad Universitaria

#	DEPENDENCIA
1	Auditoría interna
2	Casa club académico
3	Centro universitario de teatro
4	Centro de ciencias de la atmosfera
5	Centro de ciencias aplicadas y desarrollo tecnológico
6	Centro de enseñanza de lenguas extranjeras
7	Centro de enseñanza para extranjeros
8	Instituto de investigación sobre la universidad y la educación
9	Unidad coordinadora de consejos académico área
10	Coordinación de difusión cultural
11	Dirección de teatro
12	Sala Netzahualcóyotl
13	Salas de cine
14	Salas de teatro
15	Coordinación de humanidades
16	Coordinación de universidad abierta y educación a distancia
17	Coordinación de la investigación científica
18	Dirección general de obras y conservación
19	Planta de tratamiento de aguas residuales
20	Talleres de conservación
21	tanque bajo
22	Dirección general de actividades deportivas y recreativas
23	Alberca olímpica
24	Dirección de medicina del deporte
25	Estadio tapatío Méndez
26	Gimnasio y frontón cerrado
27	Subdirección de futbol americano
28	Dirección general de artes visuales
29	Dirección general de administración escolar, edificio metro
30	Dirección general de administración escolar, imán
31	Dirección general de asuntos jurídicos
32	Dirección general de asuntos del personal académico
33	Dirección general de atención a la comunidad estudiantil
34	Dirección general de bibliotecas , biblioteca central
35	Subdirección de servicios especializados, CICH
36	Dirección general de comunicación social ,zona comercial CU
37	Dirección general de control e informática edificio b, zona cultural



38	Dirección general de divulgación de la ciencia
39	Dirección general de planeación, edificio de estudios administrativos
40	Dirección general de estudios de legislación universitaria, edificio b zona cultural
41	Coordinación de estudios de posgrado, edificio de posgrado
42	Dirección general de incorporación y revalidación de estudios
43	Dirección general de orientación y servicios educativos
44	Dirección general del patrimonio universitario
45	Dirección general de personal
46	Centro de desarrollo infantil, ciudad universitaria
47	Dirección de relaciones laborales
48	Jardín de niños
49	Dirección general de presupuesto universitario
50	Dirección general de proveeduría y almacenes
51	Imprenta de la dirección general de la proveeduría
52	Dirección general de publicaciones, fomento editorial av. imán 5
53	Dirección general de servicios administrativos
54	Tienda metro CU
55	Dirección general de servicios generales
56	Base 1 departamento de vigilancia
57	Departamento de prevención y combate de siniestros, estación de bomberos
58	Dirección de operaciones , av. universidad
59	Taller mecánico de mantenimiento
60	Dirección general de servicios médicos
61	Departamento de salud ambiental
62	Dirección general de servicios de computo académico
63	Edificio de cómputo para la investigación
64	Dirección general e televisión universitaria
65	Dirección general del cch circuito interior
66	Dirección general del cch av. universidad
67	Edificio de programas universitarios
68	Dirección de teatro, zona cultural
69	Escuela nacional de trabajo social
70	Facultad de arquitectura
71	Centro de investigación en diseño industrial, edificio de posgrado
72	Facultad de ciencias
73	Facultad de ciencias políticas y sociales
74	Facultad de contaduría y administración
75	Facultad de contaduría y administración, edificio de posgrado
76	Facultad de derecho



77	Facultad de derecho , edificio de posgrado
78	Facultad de economía
79	Facultad de filosofía y letras
80	Observatorio meteorológico
81	Facultad de ingeniería, edificios principales
82	Facultad de ingeniería, edificios del anexo
83	Facultad de ingeniería, edificio de posgrado
84	Facultad de medicina, edificios principales
85	Facultad de medicina, edificio de posgrado
86	Departamento de salud mental y psiquiatría
87	Departamento de medicina familiar
88	Facultad de medicina veterinaria y zootecnia
89	Facultad de odontología
90	Facultad de odontología, edificio de posgrado
91	Facultad de psicología
92	Facultad de psicología, edificio de posgrado
93	Facultad de química , edificios a b y c
94	Facultad de química , edificios d
95	Facultad de química, edificio e
96	Instituto de astronomía
97	Instituto de biología
98	Jardín botánico exterior
99	Jardín botánico interior
100	Instituto de ciencias nucleares
101	Instituto de ciencias del mar y limnología
102	Instituto de ecología
103	Instituto de fisiología celular
104	Instituto de física
105	Instituto de geofísica
106	Instituto de geografía
107	Instituto de geología
108	Instituto de ingeniería
109	Instituto en matemáticas aplicadas y sistemas
110	Dirección de sistemas y servicios institucionales DGSCA, edificio IIMAS
111	Instituto de investigaciones antropológicas
112	Instituto de investigaciones bibliográficas
113	Instituto de investigaciones biomédicas
114	Instituto de investigaciones económicas circuito Mario de la Cueva
115	Instituto de investigaciones estéticas



116	Instituto de investigaciones históricas
117	Instituto de investigaciones filológicas, circuito Mario de la Cueva
118	Instituto de investigaciones filosóficas, circuito Mario de la Cueva
119	Instituto de investigaciones jurídicas
120	Instituto de investigaciones sociales, circuito Mario de la Cueva
121	Instituto de investigaciones en materiales
122	Instituto de matemáticas
123	Instituto de química
124	Museo universitario de ciencias y arte circuito interior
125	Museo universitario de arte contemporáneo zona cultural
126	Secretaría técnica de intercambio académico, edificio de posgrado
127	Torre de humanidades I
128	Torre de humanidades II
129	Torre de rectoría
130	Unidad bibliográfica
131	Unión de universidades de América latina
132	Unidad de seminarios
133	Vivero alto
134	Zona comercial de Ciudad Universitaria
135	Estadio olímpico de Ciudad Universitaria
136	Teatro Juan Ruiz de Alarcón y foro sor Juana

A3. Metodología HAZOP

El principio de la metodología es descubrir los factores que evitan que el sistema a considerar funcione según los objetivos del diseño. La reflexión crítica ordenada da como resultado el descubrimiento de alteraciones respecto a las intenciones y previsiones proyectadas, las cuales deben estar perfectamente establecidas. Se aplican a cada una de las partes o "nudos" en que se divide la instalación (tuberías, equipos, servicios auxiliares, etc.) y de forma sistemática, unas palabras-guía asociadas a cada una de las variables que intervienen en el proceso: caudal, presión, temperatura, etc., tratando de averiguar la posibilidad de que una causa particular lleve a un mal funcionamiento de la instalación o incluso de lugar a una situación peligrosa. Estas palabras-guía que caracterizan el método, son utilizadas cualificando o cuantificando a todas y cada una de las variables en vistas a estimular la reflexión sobre la diversidad de situaciones en que puede encontrarse la instalación, algunas inverosímiles y que dejarán de ser consideradas, pero otras por la posibilidad de producirse y/o por sus consecuencias serán analizadas.



Tabla A3.1 Palabras-guía fundamentales con su correspondiente significado:

Palabras-Guía	SIGNIFICADO	ALGUNOS EJEMPLOS DE PROBLEMAS TÍPICOS
No	NEGACIÓN O AUSENCIA DE LAS ESPECIFICACIONES DE DISEÑO	NO FLUJO (fallo de bomba, válvula cerrada, fuga, conducto de aspiración en vacío, obstrucción por sedimentos o cuerpos extraños, etc)
Más	AUMENTO O DISMINUCIÓN CUANTITATIVA Se refiere a cantidades de medición: caudales, presión, temperatura, viscosidad, etc, o actividades: reaccionar, calentar, etc.	MÁS FLUJO (aspiración presionada, válvula atascada abierta, lectura flujómetro incorrecta, etc.)
Menos		
Mayor que o así como	AUMENTO CUALITATIVO Junto a la función deseada se realiza una actividad adicional	MÁS TEMPERATURA (suciedad en intercambiador de enfriamiento, fallos del regulador de temperatura, etc)
Parte de	DISMINUCIÓN CUALITATIVA Se realiza solamente una parte de la función deseada	PRESENCIA DE IMPUREZAS (entrada de contaminantes como el agua, aceites, productos de corrosión, fallos de aislamientos, etc)
Inverso	OPOSICIÓN A LA FUNCIÓN DESEADA Utilizable preferentemente a actividades tales como flujo de retroceso, inversión de racción química, etc)	FLUJO DE RETORNO (bomba invertida, comunicación con sobrepresión, fallo de bomba, fallo de válvula antiretroceso, etc)
De otra forma	SUSTITUCIÓN COMPLETA DE LA FUNCIÓN DESEADA Sucede algo totalmente diferente a las finalidades originales	OTRAS ACTIVIDADES DISTINTAS A LA OPERACIÓN NORMAL (arranques y paradas en la instalación, fallos de energía o servicios, emisiones, incompatibilidades, operaciones de limpieza y mantenimiento, tomas de muestras, etc)

Tales palabras guía no son las únicas que pueden emplearse y son admisibles ciertas modificaciones para expresar mejor determinadas situaciones. Por ejemplo la variable TIEMPO con las palabras guía MÁS / MENOS, significa mayor o menor duración o frecuencias más altas o más bajas. Sin embargo la palabra-guía adicional ANTES o DESPUÉS introduce una nueva matización a considerar más precisa que DE OTRA FORMA. En cuanto a la posición, fuentes o destino, también puede ser más precisa la nueva palabra-guía DONDE MÁS que DE OTRA FORMA.

Finalmente para alteraciones en altura las palabras MAYOR/MENOR son un poco más precisas en ocasiones que las palabras MÁS/MENOS, aunque la decisión de adoptar esta matizaciones corresponde al grupo de trabajo. En el siguiente esquema se representa el desarrollo secuencial de aplicación del AFO en un proceso continuo:

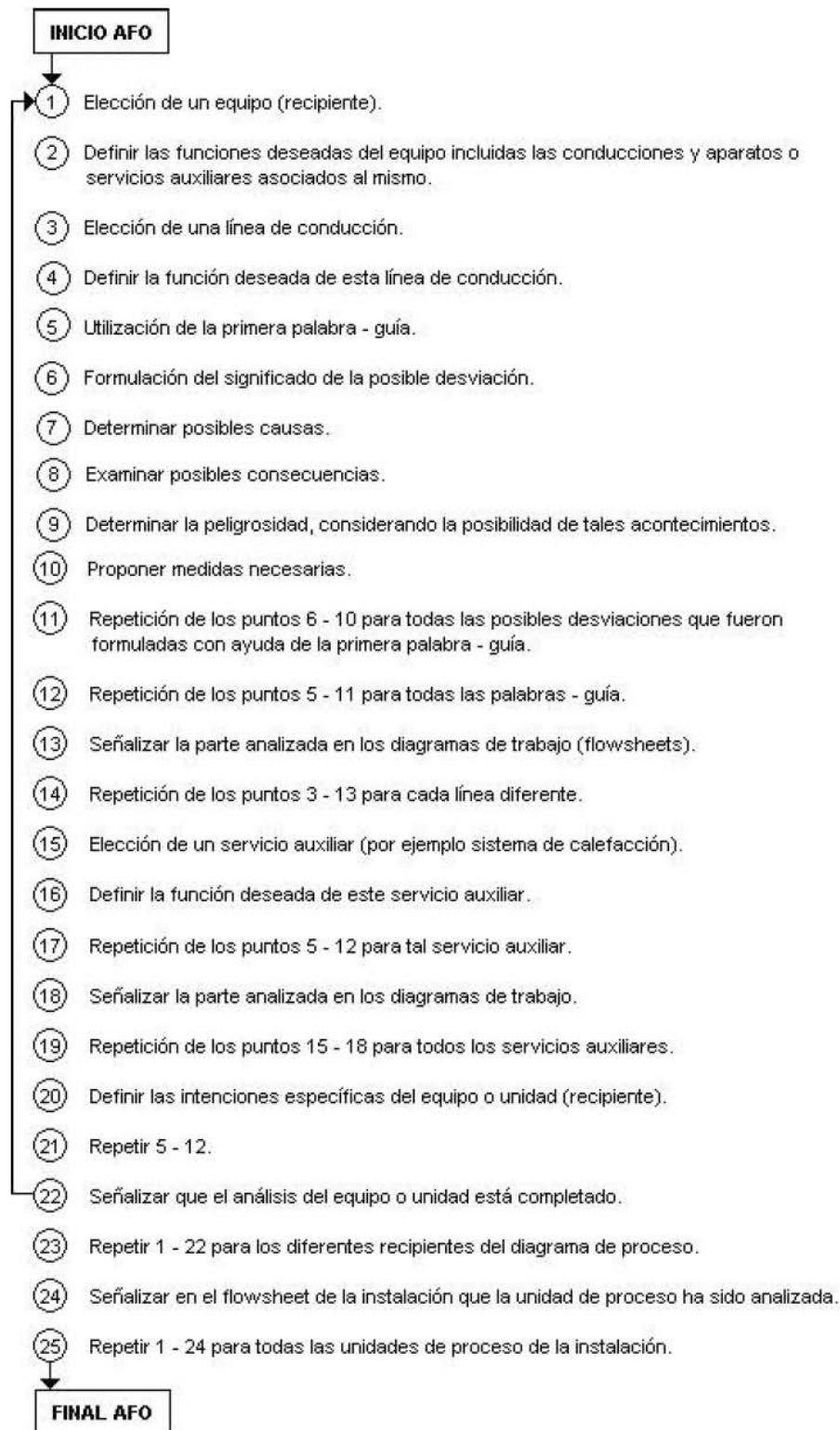


Figura A3.1 Secuencia operativa para HAZOP.



Glosario

Agua subterránea, Puede definirse como agua subterránea el agua subsuperficial que aparece justo bajo el nivel freático en suelos y formaciones geológicas completamente saturadas

Calidad del agua, es un término abstracto, que sólo adquiere sentido práctico susceptible de ser medido cuando se asocia el agua a un uso determinado y, a partir de ello, se establecen parámetros y valores que se deben cumplir

Cloro activo, significa el porcentaje en peso de cloro molecular que aporta un determinado compuesto en cualquier estado.

Ct, Es el producto de la concentración (mg/L) del desinfectante por el tiempo (min) en que se debe exponer el agua al desinfectante.

Desinfección: destrucción de organismos patógenos por medio de la aplicación de productos químicos o procesos físicos.

Diagnóstico, Es el análisis de las necesidades, capacidades y recursos más relevantes de los espacios sociales en estudio, relacionado con los aspectos económicos, sociales, culturales y ambientales, a fin de identificar y caracterizar sus principales problemas y potencialidades para el desarrollo local.

Difusor (Inyector), Es aquel que se utiliza para difundir gases como el sulfuro de hidrógeno y el dióxido de azufre o para introducir ozono y oxidantes para destruir bacterias y químicos orgánicos.

Espora, Se trata de una estructura presente en algunas especies bacterianas, pueden estar en el interior de la bacteria (endospora) o permanecer libres, y estos últimos constituyen la forma de resistencia de las bacterias.

Límite permisible, concentración o contenido máximo o intervalo de valores de un componente, que no causará efectos nocivos a la salud del consumidor.

Oxidación, pérdida de electrones de un elemento, ion o compuesto por la acción del oxígeno u otro agente oxidante.

Permeable, es la capacidad de un material para que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna. Se afirma que un material es *permeable* si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e *impermeable* si la cantidad de fluido es despreciable.

Potabilización, conjunto de operaciones y procesos, físicos y/o químicos que se aplican al agua en los sistemas de abastecimiento públicos o privados, a fin de hacerla apta para uso y consumo humano.