

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**



TRABAJO DE GRADUACIÓN

**“EVALUACIÓN Y CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y
MICROBIOLÓGICA DE LAS AGUAS SUPERFICIALES Y
SUBTERRÁNEAS PARA CONSUMO HUMANO DEL SECTOR DE
INFLUENCIA DE MAZACÚA DEL CANTÓN CUTUMAY
CAMONES”**

**PRESENTADO POR:
HÉCTOR JOEL CHICAS MURILLO
DARTHON ALEXANDER VELÁSQUEZ**

**PARA OPTAR AL GRADO DE:
LICENCIADO EN CIENCIAS QUÍMICAS**

**DOCENTE DIRECTOR:
Licdo. JORGE ALBERTO GONZÁLEZ**

**ASESOR ADJUNTO:
Licdo. DOUGLAS ERNESTO GARCÍA SARMIENTO**

ABRIL 2011

SANTA ANA

EL SALVADOR

CENTROAMÉRICA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

ING. Y MSc. RUFINO ANTONIO QUEZADA SÁNCHEZ

VICE- RECTOR ACADÉMICO:

ARQ. Y MSc. MIGUEL ÁNGEL PEREZ RAMOS

VICE- RECTOR ADMINISTRATIVO:

LICDO. Y MSc. OSCAR NOE NAVARRETE

SECRETARIO GENERAL:

LICDO. DOUGLAS VLADIMIR ALFARO CHAVEZ

FISCAL GENERAL:

DR. RENÉ MADECADEL PERLA JIMENEZ

FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE

DECANO

LICDO. JORGE MAURICIO RIVERA

VICE- DECANO

LICDO Y MÁSTER ELADIO EFRAÍN ZACARÍAS ORTEZ

SECRETARIO DE FACULTAD

LICDO. VICTOR HUGO MERINO QUEZADA

JEFE DE DEPARTAMENTO

LICDO. MARIO ANTONIO SANTAMARÍA CHILIN



Agradecimiento

HÉCTOR JOEL CHICAS MURILLO

A DIOS OMNIPOTENTE Y CREADOR DE TODO EL UNIVERSO POR DARME LAS FUERZAS NECESARIAS Y POR GUIARME EN CAMINOS DE LUZ Y SABIDURÍA. EL ES QUIEN ME HA CONFORTADO SIEMPRE PARA SEGUIR ADELANTE Y ASÍ PODER TERMINAR CON SOLVENCIA MI CARRERA.

Agradecimiento



A MIS PADRES:	MARÍA DEL TRÁNSITO MURILLO PEDRO ORLANDO CHICAS QUIENES ME APOYARON SIEMPRE Y POR TODA CLASE DE AYUDA QUE ME BRINDARON.
A MIS ABUELOS:	ANDRÉS GUERRERO MONROY (Q. E. P. D) FILOMENA MURILLO VIUDA DE GUERRERO POR SU CONFIANZA DEPOSITADA Y SU APOYO MORAL.
A MIS TIAS:	CORINA GUERRRERO DE VÁSQUEZ GLORIA ESMERALDA GUERRERO MURILLO MARÍA ESTHER GUERRERO DE MARTÍNEZ POR SU TOTAL Y COMPLETO APOYO EN EL TRANCURSO DE MI CARRERA.
A MI TIO:	CAÍN GUERRRERO POR TODO SU INCONDICIONAL APOYO MORAL Y EJEMPLO COMO PROFESIONAL Y PERSONA.
A MIS PRIMOS:	JOSÉ MIGUEL VÁSQUEZ GUERRERO KARLA MARÍA VÁSQUEZ GUERRERO LAURA MARGARITA MARTÍNEZ GUERRERO DINA RAQUEL GUERRERO POR TODO SU APOYO DURANTE MI PREPARACIÓN COMO PROFESIONAL.



Agradecimiento

AL DOCENTE ASESOR: Licdo. JORGE ALBERTO GONZÁLEZ
POR SER UN EXCELENTE GUIA EN EL DESARROLLO DE
EL TRABAJO DE GRADO.

AL ASESOR ADJUNTO: Licdo. DOUGLAS ERNESTO GARCÍA SARMIENTO
POR SU APOYO, COLABORACIÓN Y ACERTADA
ORIENTACIÓN EN LA ELABORACIÓN DE EL TRABAJO
DE GRADO.

A MI COMPAÑERO DE TESIS: DARTHON ALEXANDER VELÁSQUEZ
POR SER PARTE FUNDAMENTAL PARA LA
ELABORACIÓN DE NUESTRO TRABAJO DE GRADO.

RECONOCIMIENTO

A TODOS LOS DOCENTES DEL DEPARTAMENTO DE QUÍMICA POR SER PARTE CLAVE
EN MI FORMACIÓN COMO PROFESIONAL Y COMO PERSONA, Y A TODOS MIS AMIGOS
LOS CUALES HAN SIDO PARTE ELEMENTAL POR TODA CLASE DE APOYO BRINDADO.



Agradecimiento

DARTHON ALEXANDER VELÁSQUEZ

A DIOS OMNIPOTENTE Y MARAVILLOSO CREADOR DE TODO EL UNIVERSO POR GUIARME EN CADA PASO QUE DOY Y POR SER LA LUZ QUE SIEMPRE ME GUIO EN ESTE ARDUO PROCESO DE FORMACIÓN Y POR BRINDARME SIEMPRE DE SU GRAN SABIDURÍA. EL ES QUIEN ME HA DADO FORTALEZA SIEMPRE PARA SEGUIR ADELANTE Y ASÍ PODER CULMINAR MI CARRERA.

Agradecimiento



A MI MADRE: MESALINA CORALIA VELÁSQUEZ (Q. E. P. D)
POR SER MÍ APOYO Y POR HABERME INSTADO SIEMPRE A SALIR
ADELANTE Y POR ESTAR A MI LADO EN TODO MOMENTO.

A MI ESPOSA: CLAUDIA MARÍA GENOVEZ DE VELÁSQUEZ.
POR SU INCONDICIONAL APOYO Y ESmero EN CADA MINUTO DE
NUESTRAS VIDAS.

A MI ABUELA: BERTA LIDIA VELÁSQUEZ.
POR SER MI APOYO CONSTANTE Y POR ESTAR PRESENTE SIEMPRE EN
LOS MEJORES MOMENTOS DE MI VIDA

A MIS HIJOS: RAFAEL ALEXANDER VELÁSQUEZ GENOVEZ
CAMILA PAULETT VELÁSQUEZ GENOVEZ.
QUE FUERON SIEMPRE LA RAZÓN DE MI LUCHA Y PERSEVERANCIA.

A MIS HERMANOS: JUAN JOSE RAMÍRES VELÁSQUEZ
JOSE MITCHELL RAMÍREZ VELÁSQUEZ
QUE SON PARTE IMPORTANTE EN MI VIDA.



Agradecimiento

AL DOCENTE ASESOR: Licdo. JORGE ALBERTO GONZÁLEZ
POR SER UN PILAR FUNDAMENTAL EN EL
DESARROLLO DE EL TRABAJO DE GRADO.

AL ASESOR ADJUNTO: Licdo. DOUGLAS ERNESTO GARCÍA SARMIENTO
POR SU APOYO, COLABORACIÓN Y ACERTADA
ORIENTACIÓN EN LA ELABORACIÓN DE EL TRABAJO
DE GRADO.

A MI COMPAÑERO DE TESIS: HÉCTOR JOEL CHICAS MURILLO
POR SER PARTE IMPORTANTE Y FUNDAMENTAL PARA
LA ELABORACIÓN DE NUESTRO TRABAJO DE GRADO.

RECONOCIMIENTO

A TODOS LOS DOCENTES DEL DEPARTAMENTO DE QUÍMICA POR SER PARTE CLAVE
EN MI FORMACIÓN COMO PROFESIONAL Y COMO PERSONA, Y A TODOS MIS AMIGOS
LOS CUALES HAN SIDO PARTE ELEMENTAL POR TODA CLASE DE APOYO BRINDADO.

INDICE

	Pág.
RESUMEN	i
1. INTRODUCCIÓN	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
3. JUSTIFICACION	4
4. OBJETIVO	
4. 1 OBJETIVOS GENERALES	5
4. 2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	5
5. MARCO TEÓRICO	
5. 1 ANTECEDENTES	6
5. 1. 1 Estudios Realizados sobre la Incidencia en la calidad del agua, ante la construcción de un relleno sanitario	6
5. 1. 2 Resumen del Estudio Realizado por la US EPA	9
5. 1. 2. 1 Observaciones	11
5. 1. 2. 2 Conclusiones	11
5. 1. 2. 3 Recomendaciones del estudio de la US EPA	12
5. 2 FUENTES DE AGUA	16
5. 2. 1 Aguas subterráneas	17
5. 2. 2 Composición de las aguas subterráneas	17
5. 2. 2. 1 Procedencia de las aguas subterráneas	17
5. 2. 2. 2 Sustancias que se encuentran disueltas en un agua natural subterránea. Iones fundamentales y menores	18
5. 2. 2. 3 Características químicas de los iones y sustancias disueltas más importantes	20
5. 2. 2. 3. 1 Aniones y sustancias aniónicas	20
5. 2. 2. 3. 2 Cationes y sustancias catiónicas	23
5. 2. 2. 3. 3 Principales gases disueltos	25

5. 2. 2. 4. Aniones y sustancias aniónicas menores más importantes	26
5. 2. 2. 5 Evolución geoquímica de las aguas en los acuíferos	28
5. 2. 2. 5. 1 Adquisición de sales durante la infiltración	28
5. 2. 2. 5. 2 Agua freática en las zonas de regadío	30
5. 2. 2. 5. 3 Movimiento del agua subterránea y su composición química	31
5. 2. 2. 5. 4 Relaciones entre geología, litología y composición de las aguas subterráneas	32
5. 2. 2. 5. 4. 1 Relaciones litología-composición de las aguas subterráneas	32
5. 2. 2. 5. 4. 2 Relaciones geología-geomorfología- composición de las aguas subterráneas.	
Tiempo de permanencia	34
5. 2. 2. 5. 4. 3 Variación lateral y vertical de la composición química del agua. Estratificación hidroquímica	34
5. 2. 2. 5. 4. 4 Interés y significado de los elementos menores y de los elementos traza	36
5. 2. 2. 5. 5 Variaciones temporales en la composición del agua subterránea	37
5. 2. 2. 5. 6 Clasificación de las aguas subterráneas por su origen y tiempo de contacto con el acuífero.	
Origen de las salmueras naturales	40
5. 2. 2. 6 Temperatura de las aguas subterráneas	44
5. 2. 2. 6. 1 Origen	44

5. 2. 2. 6. 2 Fluctuación en la temperatura del agua	45
5. 3 ESTÁNDARES DE CALIDAD DEL AGUA	46
5. 3. 1 Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO)	49
5. 3. 1. 1 Requisitos de calidad microbiológicos	50
5. 3. 1. 2 Requisitos de calidad fisicoquímicos	51
5. 4 ÍNDICES DE CALIDAD DEL AGUA	55
5. 4. 1 Estimación del Índice de Calidad de Agua General “ICA”	56
6. METODOLOGÍA	
6. 1 METODOLOGÍA DE CAMPO	59
6. 2 METODOLOGÍA DE LABORATORIO	61
6. 3 METODOLOGÍA ESTADÍSTICA	62
7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	66
8. CONCLUSIONES	72
9. RECOMENDACIONES	74
10. BIBLIOGRAFIA	75
11. ANEXOS	76

RESUMEN

El trabajo de investigación muestra la caracterización fisicoquímica y microbiológica de las aguas del sector de influencia del Cantón Cutumay Camones, con el objeto de evaluar la calidad de agua que la población del sector en estudio consume. La ejecución del presente proyecto comenzó debido al proyecto de elaboración del relleno sanitario en el Cantón Cutumay Camones; y luego de haber obtenido la documentación e información necesaria del lugar de estudio, se procedió al reconocimiento del sector, para identificar los puntos de estudio, y a partir de ahí, se establecieron 4 puntos de muestreo, los cuales fueron georeferenciados. Los puntos de muestreo establecidos fueron: Afloramiento de agua, pozo artesanal de mayor nivel freático, pozo artesanal de menor nivel freático y red de distribución de agua.

Luego se procedió al muestreo para evaluar la calidad de las aguas superficiales y subterráneas y poder estudiar los parámetros microbiológicos y fisicoquímicos; y fueron trasladadas a los laboratorios de ANDA para su inmediato análisis, con el objetivo de obtener datos con mayor credibilidad.

Los resultados obtenidos en el afloramiento de agua se confrontaron con la Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO) y además se determinaron los Índices de Calidad del Agua (ICA); para el pozo artesanal de mayor nivel freático y pozo artesanal de menor nivel freático, se sometieron a un análisis estadístico denominado “t de Student” y además se confrontaron contra la NSO, y también se determinó la existencia de diferencia significativa entre los pozos; y los resultados obtenidos de la red de distribución se sometieron al análisis estadístico denominado “t de Student” y además se confrontaron contra la NSO.

Encontrando en forma general, que en todos los puntos muestreados los parámetros microbiológicos no cumplen con el valor mínimo establecido por la NSO, y algunos parámetros fisicoquímicos en algunos puntos muestreados no cumplen los valores establecidos por la NSO, por lo que no son aptas para consumo humano según la NSO y según los Índices de Calidad del Agua, las aguas del sector se clasifican como “REGULAR”, lo que indica que son aptas para consumo humano.

1. INTRODUCCIÓN

El recurso hídrico en El Salvador se encuentra afectado por diversos factores que cada vez agravan el problema en cuanto a su cantidad y calidad; estos agentes son principalmente la sobreexplotación de los acuíferos, el vertimiento de sustancias contaminantes a las fuentes hídricas, la deforestación, el uso inadecuado de los suelos y su alto grado de erosión, el incremento de urbanizaciones en zonas de producción hídrica. Estos factores han dado como resultado una disminución de la disponibilidad del agua, generando conflictos que han comenzado a sentirse y que tienden a agravarse si no se toman las medidas necesarias, como la regulación del uso del agua a través de mecanismos y leyes que permitan su protección y su distribución en forma racional.

El presente proyecto “EVALUACION Y CARACTERIZACION FISICOQUIMICA Y MICROBIOLOGICA DE LAS AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRANEAS PARA CONSUMO HUMANO DEL SECTOR DE INFLUENCIA DE MAZACÚA DEL CANTON CUTUMAY CAMONES”, nació bajo la perspectiva de servicio a la comunidad, ya que actualmente el Cantón Cutumay Camones se encuentra en una férrea lucha por la protección de sus recursos hídricos, esto debido al interés que en su momento el gobierno municipal de Santa Ana opto por ejecutar el proyecto del funcionamiento de un relleno sanitario, la preocupación de la comunidad radica en que por la falta de un sistema de abastecimiento de la principal empresa abastecedora del país ANDA o un sistema municipal, ellos se han organizado y han desarrollado su propio sistema de abastecimiento el cual es tomado de un manantial y otras comunidades de la zona se abastecen perforando sus propios pozos. Es aquí donde nace el carácter investigativo de proyección social y humanitario de este proyecto, el cual permitió generar información técnica en materia de calidad de agua y evaluar la calidad sanitaria actual de las fuentes de abastecimiento de la zona, así como la de la red de distribución que la comunidad administra; además se establecieron los índices de calidad del agua que permitirán ir evaluando la evolución de posibles contaminaciones de las fuentes.

Para la realización del presente proyecto se tomaron líneas bases y se establecieron puntos de muestreo estratégicos, tomando como referencia las fuentes de abastecimiento de la zona: fuentes superficiales (manantial o afloramiento de agua), pozos artesanales de

abastecimiento domiciliar y agua de la red de distribución del sistema de agua potable de la comunidad.

Los análisis microbiológicos y fisicoquímicos de las muestras de agua, fueron realizados en el Laboratorio de Control de calidad y Contaminantes en el Agua de la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados ANDA, los resultados de los análisis fueron evaluados estadísticamente para realizar las inferencias pertinentes y establecer las conclusiones y recomendaciones respectivas.

El documento plantea los objetivos generales y específicos, un marco conceptual, con el que se pretende que el lector conozca la terminología que se utiliza en el documento, y visualice la importancia de cada uno de los parámetros que deben cumplir las aguas para consumo humano así como la calidad del agua superficial y subterránea; se presenta la metodología utilizada para el análisis de cada uno de los parámetros, para elaborar el estudio estadístico que permitió probar las hipótesis; además se presentan los recursos llevar a cabo el presente proyecto, finalmente se presenta la cronología de las diversas actividades y la bibliografía, la cual ha sido un apoyo muy importante en la fundamentación teórica de este trabajo.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El presente proyecto de investigación denominado “**Evaluación y Caracterización fisicoquímica y microbiológica de las aguas superficiales y subterráneas para consumo humano del sector de influencia de Mazacúa del cantón Cutumay Camones**”, Se fundamenta en un estudio y diagnóstico microbiológico y fisicoquímico de las aguas, realizado mediante la investigación de campo, monitoreo de fuentes, recolección de muestras y análisis microbiológico y fisicoquímico, estableciéndose como área de estudio la zona ubicada a 2 Km al sur de donde se encuentra situada la fuente de captación de agua de la cual se abastece la población; comunidad eminentemente agrícola y ganadera, por lo que históricamente ha utilizado productos químicos que en algún momento podrían poner en riesgo sanitario sus fuentes de agua, pero hasta la fecha no se ha llevado a cabo un monitoreo de las causas y efectos que estos podrían generar en los mantos acuíferos de la zona, y la calidad del agua, es por esa razón se hizo necesaria la determinación de Índices de Calidad del Agua (ICA) para generar información base que permita ir evaluando el comportamiento y el riesgo sanitario de las fuentes, así mismo determinar si las aguas de consumo humano cumplen con los estándares de la Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO).

La finalidad de este trabajo, fue realizar un análisis que cumpla con los siguientes parámetros: Coliformes fecales, Coliformes totales, Escherichia Coli, Turbiedad, Color Verdadero, Olor, Sólidos Totales Disueltos, Dureza total, Temperatura, pH, Cloro residual, Aluminio, Hierro total, Plaguicidas organoclorados, Zinc, Sulfatos, Manganeso total.

A través de esta caracterización y evaluación se pretendió dar a conocer a la población del cantón Cutumay Camones, alrededor de 3500 habitantes¹, a la alcaldía municipal de Santa Ana y a los organismos gubernamentales encargados de preservar el recurso hídrico, las características esenciales que determinan la calidad del agua que actualmente está consumiendo la comunidad.

¹ ACOFUBEN (Asociación Comunal Fuente de Bendición)

3. JUSTIFICACION

El beneficio de cuidar y preservar el recurso hídrico para la humanidad es de suma importancia, en nuestro país una de las regiones hidrográficas más importantes de la zona occidental es la de Cutumay Camones con características geomorfológicas, amenazada por diversos factores entre los cuales podemos mencionar: la contaminación diaria producidas por la agricultura y ganadería, además por la posible construcción de un relleno sanitario a futuro, el cual podría ocasionar el deterioro de la calidad de las aguas por la generación de lixiviados, disminuyendo la disponibilidad hídrica en esta región, debido a esto el presente proyecto es una alternativa de estudio, ya que actualmente, aunque existen esfuerzos e investigaciones de diferentes entidades encaminadas a la protección y preservación del recurso hídrico, no hay una evaluación que caracterice ampliamente los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, de manera que se verifique el cumplimiento de la calidad de las aguas del sector, de acuerdo a lo que establece la Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO), así como la determinación de la oferta y la disponibilidad hídrica actual y su proyección a futuro, que permita establecer lineamientos a seguir para su protección y que sirva de base a los usuarios del recurso, que son un aproximado de 3,500 habitantes de los cuales el 25% son niños, para considerar su uso y disponibilidad en proyectos actuales y futuros.

A través del presente proyecto se pretendió aportar conocimiento teórico que ayude a mejorar la comprensión de los fenómenos que determinan el comportamiento de los recursos hídricos subterráneos y superficiales, así como también evaluar el estado actual de las aguas para consumo humano en el cantón Cutumay Camones, mediante la realización de análisis fisicoquímicos y microbiológicos que determinaron la actual calidad de las aguas que la población consume, ya que anteriormente los líderes comunales gestionaron la realización de análisis en los que algunos resultados no están acordes a los valores permisibles establecidos por la Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO).

4. OBJETIVOS

4.1 GENERALES:

- Orientar la investigación científica hacia la preservación, recuperación y protección de nuestros recursos hídricos; para garantizar en el tiempo el acceso al agua para sustentar las necesidades vitales de la población.

4.2 ESPECÍFICOS:

- Identificar y ubicar las fuentes de aguas superficiales y subterráneas.
- Clasificar las fuentes de aguas por riesgos de contaminación por su proximidad al proyecto de construcción del relleno sanitario.
- Evaluar la calidad fisicoquímica y microbiológica de las fuentes de aguas superficiales y subterráneas.
- Determinar los indicadores de calidad de las fuentes de aguas superficiales y subterráneas.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 ANTECEDENTES

La comunidad del Cantón Cutumay Camones a través de la Asociación Comunal Fuente de Bendición (ACOFUBEN), tomó a bien la subcontratación del Instituto de aguas de la Universidad El Salvador, Facultad Multidisciplinaria de Occidente, para realizar análisis fisicoquímicos y microbiológicos de las fuentes superficiales y subterráneas de agua para consumo humano, con la finalidad de determinar su calidad e inferir si son aptas para su consumo. Para ello ACOFUBEN presentó el 12 de marzo del año 2002, 8 muestras de agua (4 de pozos y 4 de sistema de agua potable), realizándose análisis fisicoquímicos (pH, Cloro Libre, cloro real, turbidez, sólidos suspendidos, sólidos totales, dureza, nitratos, sulfatos, cloruros, hierro, cromo hexavalente y plomo) y microbiológicos (Escherichia Coli, Coliformes Totales y Conteo Total de Bacterias).

TABLA 5. 1 RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ANALISIS REALIZADOS EN LOS LABORATORIOS DEL INSTITUTO DE AGUAS, FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE

PARÁMETRO	RESULTADOS				
	Chorro Público Santa Gertrudis	Pozo 13 m Manuel Palma	Fuente Mazacúa	Pozo 14m María Hernández	Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO)
Cloro real	0	2	2	27	0.3 – 1.1 mg / l
Plomo	-	-	43	-	0.01 mg / l
Escherichia Coli	300	0	0	1,800	1.1 NMP / 100ml
Coliformes totales	4,600	1,500	500	9,300	1.1 NMP / 100ml
Conteo Total de Bacterias	-	-	2,200	-	100 microorganismos / ml

5.1.1 Estudios Realizados sobre la Incidencia en la calidad del agua, ante la construcción de un relleno sanitario

- La empresa EYCO S.A de C.V realizó un estudio sobre la Explotación Geoeléctrica del Subsuelo que corresponde al área, donde la alcaldía municipal de Santa

Ana proyecta desarrollar su relleno sanitario, entregando su informe a ACOFUBEN el 23 de mayo del año 2007, en el que se detalla lo siguiente:

1. El área del proyecto se encuentra deshabitada, con escasa vegetación, ofreciéndose condiciones de acceso favorables.
 2. El área del proyecto está cubierta por materiales de la formación de San Salvador (suelos arcillo-limosos de baja permeabilidad) en sentido Norte-Sur, y en los límites Nor- Oriente y Poniente se distinguen materiales de la formación del bálsamo (suelo limo-arcilloso).
 3. Manifiesta también, que en la exploración geofísica para determinar las propiedades litológicas y estratigráficas del área del proyecto, se alcanzaron profundidades comprendidas de 3 a 9 metros, mediante la perforación de 9 Sondeos de Penetración Estándar (SPT).
 4. Por las condiciones de humedad del terreno, y los valores similares de resistividad eléctrica de los estratos explorados, no se ha logrado definir la presencia de aguas subterráneas, a partir de la exploración realizada, infiriéndose a partir de la elevación del nivel freático del pozo existente en la fábrica de textiles del pacífico (528 m.s.n.m), abandonada desde hace varios años, la superficie freática se encuentra en el área del proyecto, a una profundidad del orden de 25 a 30 metros, caracterizándose las formaciones acuíferas de la zona, por su baja permeabilidad y por consiguiente, por bajos caudales de producción.
 5. Por la baja permeabilidad, secuencia y espesor de los materiales explorados cuya naturaleza es predominante arcillosa, se establece que el área seleccionada para el proyecto, ofrece condiciones favorables desde el punto de vista geo-morfológico e hidrológico, con bajo riesgo de contaminación por los lixiviados, que serían generados durante la operación del relleno.
- Debido a la construcción del relleno sanitario, los habitantes del Cantón Cutumay Camones en busca de preservar y mantener la calidad de su recurso hídrico, presentaron a través de ACOFUBEN el 27 de junio del 2007 muestras al Instituto de Aguas de la Universidad El Salvador, Facultad Multidisciplinaria de Occidente, a las que se les realizó análisis fisicoquímicos (pH, cloro real, turbidez, sólidos

disueltos totales, dureza, nitratos, sulfatos, cloruros, hierro, y plomo), microbiológicos (Escherichia Coli, Coliformes Totales y Conteo Total de Bacterias) y otros análisis (Amebas y cloro residual). En los resultados de dichos análisis no se observó ningún valor que estuviera fuera de la Norma Salvadoreña Obligatoria de agua potable para consumo humano (NSO), indicando a la vez que el agua del sector es apta para su consumo.

- En el mes de agosto del 2007 los habitantes del Cantón Cutumay Camones a través de ACOFUBEN subcontrató los servicios del Ing. Geólogo Samuel Ortiz Castillo y al Técnico en manejo de aguas y tratamiento de desechos José Alberto Barrientos, para realizar un “Diagnóstico del comportamiento del agua en relación a la geomorfología, aspectos tectónicos y características litoestratigráficas de la colonia Santa Gertrudis en la jurisdicción del Cantón Cutumay Camones Santa Ana”. De dicho diagnóstico se recopilan las siguientes conclusiones:
 1. De acuerdo a la geomorfología del lugar como un pequeño valle que inicia en la base de las formaciones montañosas, se encuentra en la etapa madura con buenas características para el aprovechamiento agrícola y ganadero, contando con vegetación abundante y arboleda en la estructura montañosa.
 2. Seleccionar otro sitio para la construcción y puesta en marcha del nuevo relleno sanitario, que no tenga las mismas condiciones de privilegio que el estudiado, distante de asentamientos humanos.
 3. Que la empresa constructora del nuevo relleno sanitario (PRESYS S.A de C.V) adopte los métodos modernos de tratamiento de desechos sólidos que se utilizan actualmente en Europa, Japón y USA.
- El 13 de febrero del año 2008 se entregó al Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) la versión final del estudio denominado “La ubicación de un relleno sanitario de desechos sólidos en el cantón de Cutumay Camones, departamento de Santa Ana, El Salvador inspección visual del sitio y

recomendaciones”, preparado por La Agencia de los Estados Unidos Para el Desarrollo Internacional (**USAID**) y La Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo (**CCAD**), en el cual se manifiesta todo lo relacionado a la visita e inspección del autor del estudio Ing. Kathy Gaynor, Global Garbage, Ltd. Co., realizada del 17 al 21 de diciembre del año 2007.

- El 27 y 28 de febrero del año 2008, la población del Cantón Cutumay Camones en virtud de seguir monitoreando y salvaguardar la calidad de su recurso hídrico ante la posible contaminación por la construcción y puesta en marcha del nuevo relleno sanitario; a través de ACOFUBEN presentó muestras al Instituto de Aguas a las que se les realizaron análisis fisicoquímicos (pH, cloro real, turbidez, Sólidos Disueltos Totales, dureza, nitratos, sulfatos, cloruros, hierro, y plomo), microbiológicos (Escherichia Coli, Coliformes Totales y Conteo Total de bacterias) y otros análisis (Amebas y Cloro Residual). Dichos análisis han confirmado que el agua del sector es totalmente apta para su consumo, ya que ningún parámetro analizado ha excedido los valores establecidos por la NSO, resultados que han venido a confirmar por que los habitantes defienden su recurso hídrico.

5. 1. 2 Resumen del Estudio Realizado por la US EPA

La Ing. Kathy Gaynor, se reunió con representantes del Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) de El Salvador. Dichas reuniones se llevaron a cabo con los siguientes propósitos:

Evaluar la ubicación del sitio propuesto para un nuevo relleno sanitario municipal de desechos sólidos llamado “Relleno Sanitario de Santa Ana”, en el cantón Cutumay Camones, departamento de Santa Ana, El Salvador.

Determinar la viabilidad técnica de un estudio de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), dentro del paquete de aplicación presentado por los desarrolladores del relleno sanitario propuesto.

Revisar la permeabilidad del suelo y los datos hidrogeológicos presentados al MARN por la firma desarrolladora del proyecto del relleno sanitario.

Señalar el potencial de contaminación del acuífero situado debajo del relleno sanitario propuesto.

Indicar la profundidad del agua subterránea en el sitio, con base a la información presentada al MARN por los desarrolladores del relleno sanitario u otros funcionarios.

Los cambios técnicos recomendados al diseño propuesto se refieren al espesor de la geomembrana que revestirá el relleno sanitario y al diseño de control de los lixiviados. Algunos de los desafíos que presenta el sitio son los de estar ubicado en una área limitada para el desarrollo futuro del relleno sanitario, costos adicionales en el desarrollo de un sistema de revestimiento para un relleno sanitario situado en un área de actividad sísmica, y la aceptación de los ciudadanos en la ubicación del relleno sanitario en la comunidad de Cutumay Camones.

Los controles de ingeniería propuestos para el manejo de lixiviados en el relleno sanitario, deben prevenir cualquier conexión hidrogeológica con el acuífero que es la fuente de abastecimiento de agua potable para la comunidad, la cual se encuentra localizada exactamente al sur del relleno sanitario y que hidrogeológicamente puede estar en el gradiente inferior del relleno sanitario propuesto. Impactos potenciales en la cuenca ocasionada por prácticas agrícolas normales y el uso de herbicidas y pesticidas en labores de agricultura. También observó que el propietario de la finca adyacente a los terrenos del relleno sanitario propuesto, utilizó un herbicida conocido como ATRAZINA, la cual se encuentra comúnmente en el agua que se saca de los pozos de algunas regiones agrícolas.

El nivel máximo de contaminante (NMC) asignado por la EPA para la Atrazina es de 3 partes por billón (ppb) ó 0.003 miligramos por litros de agua potable.

La Ing. Gaynor recomienda que el MARN efectúe un muestreo y análisis del agua potable una vez al mes por un periodo de un año, para evaluar la calidad de esta fuente de abastecimiento de agua potable, con el fin de proteger la salud humana de la población de Cutumay Camones.

5. 1. 2. 1 Observaciones

1. Al MARN se le recomienda que los requisitos o normas a cumplir para los permisos de todos los rellenos sanitarios que están en uso, sean más exigentes y que la expedición de permisos futuros para la operación de rellenos sanitarios incluya mecanismos para el pre-tratamiento de las aguas lluvias antes de descargarlas fuera del sitio.
2. Se recomienda que el MARN fortalezca las leyes ambientales nacionales para requerir un tiempo mínimo de 10 años para el monitoreo y cuidado a largo plazo de los rellenos sanitarios municipales, más allá de la fecha de clausura del relleno sanitario. El MARN debe considerar la implementación de estos criterios para todos los rellenos sanitarios existentes y futuros que fueron creados en ciertas fechas. Este requisito debe ser agregado automáticamente a todos los permisos de operación existentes emitidos por el Ministerio que estén operando después de la fecha seleccionada.

5. 1. 2. 2 Conclusiones

En general, el sitio propuesto es una ubicación adecuada para un relleno sanitario municipal de desechos sólidos. Tiene muchos atributos positivos, tales como su ubicación estratégica, el trazado general del sitio del relleno sanitario para obtener la máxima cantidad de espacio al aire libre, proximidad estratégica a la comunidad de Santa Ana, lo cual minimizará los costos de transportación de los desechos sólidos, y disponibilidad de suelos para material de cobertura para ser usados en la clausura futura del relleno sanitario y/ o para la cobertura de los desechos sólidos durante las operaciones diarias.

En base a todo lo planteado anteriormente la Ing. Gaynor concluye que la realización del proyecto no representa ninguna amenaza eminente a la salud humana, dado que el impacto biológico es mínimo que podría causar al sitio, por haber sido un terreno utilizado en labores agrícolas. Los controles de ingeniería propuestos por los desarrolladores, después de incluir los cambios recomendados, responderán a los criterios de diseño básicos de instalación y construcción del revestimiento de un relleno sanitario. Los cambios técnicos recomendados al diseño propuesto se refieren al espesor de la

geomembrana que revestirá el relleno sanitario y al diseño del sistema de control de los lixiviados.

5. 1. 2. 3 Recomendaciones del estudio de la US EPA

Las siguientes recomendaciones se basan en el hecho de que el relleno sanitario propuesto será un relleno sanitario municipal de desechos sólidos “no peligrosos”. Los siguientes criterios deberán tenerse en cuenta para la construcción de este relleno sanitario municipal de desechos sólidos:

1. La geomembrana que servirá como revestimiento del relleno sanitario debe tener un espesor mínimo de 60 mil ó 1.5 mm de material de polietileno de alta densidad.
2. La tubería del sistema de recolección de lixiviados y todos los componentes deben estar fabricados de polietileno de alta densidad, con el fin de hacerlos resistentes a los químicos asociados con los desechos sólidos municipales o industriales que pudiesen ser depositados en el relleno sanitario.
3. La Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), indica que los propietarios utilizarán evaporación y recirculación de los lixiviados con almacenamiento temporal en lagunas de lixiviados como método para el tratamiento y manejo de los lixiviados. También los propietarios deben contar con un plan de contingencia para la operación, mantenimiento y manejo de lixiviados en el caso que las lagunas de los lixiviados se llenen de líquido y puedan exceder estos estándares.
4. Las lagunas de lixiviados propuestas, las cuales fueron permitidas por el MARN se componen de una mezcla de suelo-cemento/concreto y una geomembrana. Este tipo de diseño de revestimiento no es suficiente para detectar las fugas que ocurren típicamente en las lagunas de lixiviados por las condiciones de presión hidráulica a que se someten.

Se recomienda que el propietario considere las siguientes opciones para una mejor protección de los recursos del agua subterránea y el manejo de lixiviados:

OPCION A: Utilizar tanques en lugar de las lagunas de lixiviados.

OPCION B: Revestir con doble geomembrana las lagunas de lixiviados, utilizando dos capas de geomembrana de 60 mil y un geomalla con alto coeficiente de transmisividad, y una subcapa de un metro de arcilla de baja permeabilidad al 10^{-7} cm/sec².

OPCION C: Desarrollar una planta de tratamiento y tratar las aguas residuales en el sitio.

OPCION D: Recolectar los lixiviados en tanques de almacenamiento para su transportación inmediata a una planta con licencia para tratamiento de aguas residuales.

5. El EIA no presentó un análisis suficiente del balance hídrico del lugar para las escorrentías del agua pluvial y los lixiviados del relleno sanitario.

6. Se observa que hay una tubería de anclaje que pasa a través de la geomembrana y desagua en las lagunas de lixiviados. En el diseño propuesto, el instalador de la geomembrana de poliuretano de alta densidad en esta área, deberá hacer múltiples uniones, corriendo el alto riesgo de fallar en la instalación de la geomembrana, con un riesgo alto también de que ocurra fugas de lixiviados cuando el relleno sanitario este construido en su totalidad. Se recomienda que la firma desarrolladora utilice en esta área una “bota” para minimizar cortes, uniones o costuras.

7. El MARN debe pedir que se prepare y presente un plan de garantía y control de calidad (QA/AC) para la colocación de la geomembrana de poliuretano de alta densidad y de los componentes arcillosos, para asegurarse que el revestimiento se construirá adecuadamente.

8. PRESYS debe consultar con el geólogo de el MARN / SNET en relación con la adición de un nuevo pozo de monitoreo a lo largo de los linderos de la propiedad al sureste, cerca de la ubicación del pozo manual situado en terrenos de la finca. Un nuevo pozo en esta localidad puede proporcionar una mejor triangulación de los pozos de monitoreo para establecer la dirección del flujo de las aguas subterráneas, como también el monitoreo potencial de la migración de contaminantes fuera del sitio hacia la finca o la migración de contaminantes procedentes de fuentes distintas de contaminación ajenas al sitio.

9. El MARN debe efectuar inmediatamente el análisis de las aguas de la Planta de Bombeo de ACUFUBEN para evaluar la calidad del agua de esta fuente de abastecimiento

de agua potable para la comunidad. El MARN debe efectuar el análisis de las aguas cada mes como mínimo para la protección de la salud humana.

Los Parámetros para el monitoreo de esta fuente de agua potable se enumeran a continuación:

Herbicidas: Atrazina & Paraquat. El MARN debe agregar cualquier otros herbicidas o pesticidas que se esté usando en la actualidad o que fueron utilizados en el pasado en todo El Salvador.

Pesticidas (POPs): aldrín, clordano, DDT, dieldrin, endrina, heptacloro, hexaclorobenceno, mirex, toxafeno.

Químicos Industriales: bifenilos policlorados (BPCs), dibenzo- p- dioxinas policloradas (dioxinas), dibenzofuranos policlorados (furanos).

Metales: arsénico (límites mínimos de detección de 10 ppb), bario, cadmio, cromo, plomo, mercurio, selenio, plata, cobre, hierro, zinc

Nutrientes: nitratos, nitritos, fosfatos totales, nitrógeno total – TKN

Bacteria: coliformes fecales totales

Otros: trihalometanos (THM), cloruros, sodio, amoníacos sin iones, Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO), sólidos totales disueltos (STD), sólidos totales suspendidos (STS).

10. Una completa bioevaluación del río debe ser llevada a cabo por un biólogo entrenado con experiencia en este campo

11. Se debe diseñar y desarrollar en todo el perímetro del sitio, una zona extensa con la vegetación dominante en los alrededores para que sirva de barrera y de hábitat natural para la fauna silvestre. Estas zonas de barrera se deben situar entre la carretera, otras actividades de agricultura especiales, y los propietarios de las tierras adyacentes. Adicionalmente, se debe minimizar aún más el riesgo a la salud humana colocando una amplia zona de arborización que sirva de barrera. Estas zonas de barreras se pueden utilizar para diferentes usos de la tierra, lo cual puede asistir en el desarrollo financiero sostenible del relleno sanitario, el hábitat de la fauna silvestre, fines agrícolas, o proyectos de energía sostenible.

12. El sitio se encuentra ubicado en una zona de fallas y en un área de actividad sísmica. La normatividad ambiental de los Estados Unidos en el Código de Regulaciones Federales, indica que se deben efectuar análisis, para determinar si existe un diez por ciento de una probabilidad mayor de que la máxima aceleración horizontal sobre las capas litificadas de la tierra, expresada como un porcentaje de la atracción gravitacional de la tierra excederá el 0.10 g en 250 años. Donde la máxima aceleración horizontal estimada de las capas litificadas de la tierra muestra que la aceleración horizontal estimada, representada en un mapa de riesgo sísmico con un 90% o una probabilidad mayor de que la aceleración no excederá el 0.10g en 250 años; o la aceleración horizontal máxima estimada se base en una evaluación específica de riesgo sísmico del sitio.

13. Se recomienda que se efectúen análisis para determinar si el sitio excede estos estándares. Adicionalmente las discusiones se deben enfocar en controles adicionales de ingeniería como la utilización de geomallas estructurales en la sub-base del recubrimiento para la protección del recubrimiento en zonas de fallas y de actividad sísmica.

A los funcionarios del gobierno de Santa Ana se les alienta para que preparen por escrito un “Plan de Reciclaje” para el desarrollo de una Instalación para la Recuperación de Materiales (IRM), con una área para el establecimiento de un proyecto de compostaje en el sitio o en la ubicación del botadero clausurado o en el nuevo relleno sanitario, lo cual incorporará una participación activa de las comunidades aledañas.

5. 2 FUENTES DE AGUA

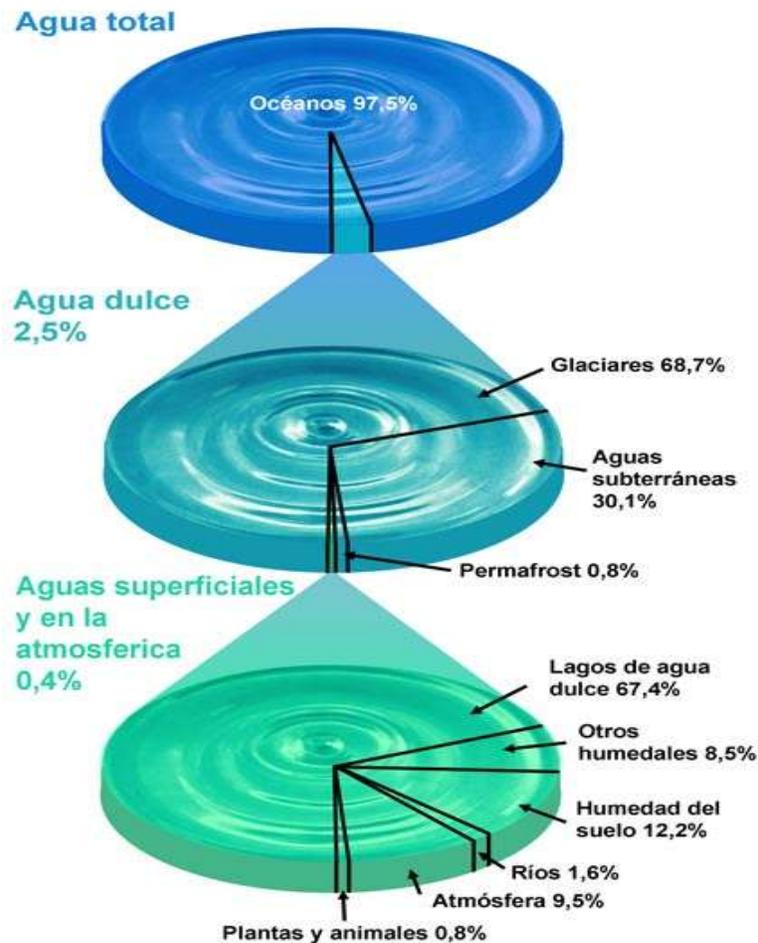


FIGURA 5. 1 Distribución del agua. Fuente: informe de consenso científico publicado en 2006 por el programa mundial de evaluación de los recursos hídricos (UNESCO-WWAP)

La calidad y la cantidad del agua procedente de aguas superficiales y subterráneas, las dos fuentes principales, experimentan la influencia de la geografía, el clima y las actividades humanas. Las aguas subterráneas normalmente se pueden utilizar con poco o ningún tratamiento. El agua superficial, por otra parte, suele necesitar tratamientos extensos, en especial si está contaminada. En las regiones áridas del mundo la falta de aguas subterráneas o superficiales puede hacer necesaria la desalinización de agua de mar y la recuperación de aguas residuales tratadas. Estos tratamientos son costosos, pero se produce agua de calidad adecuada para cualquier propósito.

5. 2. 1 Aguas subterráneas

Se estima que el 80% del abastecimiento del agua potable en El Salvador proviene de fuentes de aguas subterráneas².

Las aguas subterráneas son aquellas que se han filtrado desde la superficie de la tierra hacia abajo por los poros del suelo. Las formaciones de suelo y roca que se han saturado de líquido se conocen como depósitos de agua subterránea o acuíferos. El agua normalmente se extrae de estos depósitos por medio de pozos. El tamaño de los poros del suelo, la viscosidad del agua y otros factores se combinan para limitar la velocidad a la cual el agua se mueve a través del suelo para rellenar el pozo. Un depósito de aguas subterráneas solo puede soportar una rapidez de extracción de la misma magnitud que la del mismo suministro que recibe de manera continua por infiltración. Una vez que este flujo se excede, el nivel freático comienza a bajar, con lo cual los pozos existentes se secan y se requiere una costosa perforación para localizar nuevos pozos. Existe una preocupación creciente de que grandes extensiones de granjas productivas pierden agua de irrigación a medida que los pozos se secan.

La mayor parte de los usuarios de aguas rurales recurren a las aguas subterráneas por que las mismas se pueden extraer y utilizar en el lugar donde se le necesita, con lo cual se elimina la necesidad de costosas tuberías y procesos de purificación.

El agua que se escurre a través de terrenos de rellenos industriales y sanitarios disuelve sustancias que constituyen un serio peligro para la calidad de las aguas subterráneas locales. Esto se puede impedir con un sistema apropiado de manejo de lixiviados.

5. 2. 2 Composición de las aguas subterráneas

5. 2. 2. 1 Procedencia de las aguas subterráneas

Como es sabido el agua que se precipita sobre los continentes, tiene tres caminos por seguir:

- 1) Evaporarse para formar las nubes

² Losilla M., Rodríguez H., Schosinsky G., Stimson J. y Bethune, D 2001

- 2) Escorrir por la superficie del suelo formando arroyos y ríos que finalmente vierten sus aguas al mar.
- 3) Infiltrarse en el subsuelo para formar acuíferos. Esta agua infiltrada, posteriormente es drenada por corrientes superficiales o aflora en forma de manantiales para evaporarse o seguir su camino hacia el mar.

El agua subterránea que forma los acuíferos, proviene principalmente de la lluvia, donde parte de esta al precipitarse sobre las formaciones geológicas, se filtra y corre a través de ellas. El agua infiltrada, en ocasiones, pasa por zonas cercanas a cámaras magmáticas o puede permanecer atrapada entre sedimentos en forma de agua fósil.

Al circular por el subsuelo, entra en contacto con diversas formaciones geológicas, disolviendo las sales minerales que forman las rocas y produciendo cambios en su composición. Por lo tanto, la composición química del agua dependerá de la solubilidad y composición de las rocas por las que circula y de los factores que afecten la solubilidad, como son: las formaciones, la velocidad de circulación, la longitud de recorrido, la previa composición química del agua y otros factores.

El agua subterránea presenta en general, comparado con el agua superficial, múltiples ventajas. Casi siempre está libre de bacterias y no contiene materia en suspensión. Es clara y sin color. Normalmente no presenta contaminación producida por desechos industriales o aguas negras, excepto en los acuíferos fisurados, en los que ésta puede penetrar con facilidad a su interior, a través de grietas o fracturas.

5. 2. 2. 2 Sustancias que se encuentran disueltas en un agua natural subterránea. Iones fundamentales y menores

El agua subterránea natural es una solución muy diluida, cuando las sustancias minerales se disuelven en ella, se separan para quedar entonces como partículas cargadas eléctricamente denominadas iones, por lo tanto la mayoría de las sustancias disueltas encuentran en estado iónico.

Normalmente los análisis de calidad de agua se expresan como concentraciones de iones individuales. Cuando se habla de cloruros en el agua, se entiende la cantidad de

cloruros presentes, independientemente que setos provengan del cloruro de sodio, cloruro de calcio o cloruro de magnesio.

Los cationes que con mayor frecuencia son obtenidos en los análisis de calidad de agua son los de calcio, magnesio, sodio y potasio. Por lo general estas sustancias están presentes en todo tipo de aguas y casi siempre constituyen la mayoría de los cationes de la muestra. Otros cationes que aparecen en los análisis con menor frecuencia son los siguientes:

Aluminio	Cadmio	Estaño	Plomo
Arsénico	Cobalto	Estroncio	Selenio
Antimonio	Cobre	Litio	Titanio
Berilio	Cromo	Manganeso	Zinc
Bario	Hierro	Níquel	

Los aniones o iones cargados negativamente, que con mayor frecuencia aparecen en los análisis del agua son los cloruros, sulfatos, bicarbonatos, hidróxidos y nitratos. Estos aniones casi siempre constituyen la totalidad de los que existen en una muestra de agua natural. Otros que aparecen en cantidades pequeñas en los análisis, son los siguientes:

Fluoruro	Boro	Nitrito	Yoduro
Bromuros	Cianuro	Fosfato	

Los gases que deben considerarse como fundamentales son el anhídrido carbónico (CO_2) y el oxígeno disuelto (O_2) aunque no es frecuente que se analicen en aguas subterráneas.

Entre las sustancias disueltas poco ionizadas en estado coloidal son importantes los ácidos y aniones derivados de la sílice (SiO_2).

Muchos de los componentes del agua, iónicos y no iónicos, le aportan características distintivas a las que se denominan propiedades. Las propiedades más importantes son:

Dureza	Densidad	Temperatura
Alcalinidad	Turbidez	Radioactividad
Acidez	Color, sabor y olor	Sólidos disueltos totales
pH	Demanda de Oxígeno	Conductividad Eléctrica Específica

Las aguas subterráneas llamadas dulces contienen como máximo 1000 o quizá 2000 ppm de sustancias disueltas; si el contenido es mayor, por ejemplo hasta 5000 ppm se llaman aguas salobres y hasta 40000 ppm aguas saladas. No es raro encontrar aguas que superen los 40000 ppm de sustancias disueltas, llegando a veces hasta 300000 ppm. A estas aguas se les llama salmueras y están asociadas con frecuencia a depósitos salinos.

5. 2. 2. 3 Características químicas de los iones y sustancias disueltas más importantes

5. 2. 2. 3. 1 Aniones y sustancias aniónicas

1. Ión Cloruro, Cl⁻

- a) Características químicas. Sales en general muy solubles. Muy estable en disolución y muy difícilmente precipitable. No se oxida ni se reduce en aguas naturales. En general va asociado al ión Na⁺, en especial en aguas muy salinas, pero el número de miliequivalentes de ambos iones no es necesariamente igual.
- b) Fuente o causa de origen. Proviene de la disolución de rocas suelos, en especial evaporitas, se presenta por contaminación de desperdicios y desagües. Antiguas salmueras, agua de mar y salmueras industriales, contienen grandes cantidades de este elemento.
- c) Concentraciones. Entre 10 y 250 ppm en aguas dulces, no siendo raro encontrar contenido mucho mayores, hasta varios miles de ppm. El agua de mar tiene entre

18000 y 21000 ppm. Las salmueras naturales pueden llegar a tener hasta 220000 ppm (saturación).

- d) Nocividad y toxicidad. Más de 300 ppm comunican sabor salado al agua de bebida, pero no es perjudicial por lo menos hasta algunos miles de ppm. Es esencial para la vida. Contenidos elevados son perjudiciales para muchas plantas y comunican corrosividad al agua.

2. Ión Sulfato, SO_4^-

- a) Características químicas. Sales moderadamente solubles a muy solubles, excepto las de Sr (60 ppm) Y de Ba (2 ppm). En agua pura el SO_4Ca satura a 1500 ppm, y puede llegar hasta 7200 ppm en aguas salinas. Es difícilmente precipitable químicamente ya que las sales solubles de Sr y Ba son muy escasas en la naturaleza, pero puede separarse de la solución por concentración si existe una evaporación importante.
- b) Fuente o causa de origen. Proviene de la disolución de rocas y suelos que contienen yesos, hierros y compuestos sulfurosos. Comúnmente se presenta en aguas de drenaje de minas y en algunos desechos industriales.
- c) Concentraciones. Entre 2 y 15 ppm en aguas dulces pudiendo llegar hasta 5000 ppm en aguas salinas si existe Ca y hasta 200000 ppm si está asociado a Mg y Na en ciertas salmueras. El agua de mar contiene alrededor de 3000 ppm.
- d) Nocividad y toxicidad. Las aguas selenitosas (elevado contenido en sulfatos) no quitan la sed y tienen sabor poco agradable y amargo. Por si mismo o si va asociado a Mg o Na en cantidad importante puede comunicar propiedades laxantes. En cantidades elevadas puede ser perjudicial a las plantas. Más de algunos centenares de ppm perjudican a la resistencia del hormigón y cemento.

3. Iones Bicarbonato y Carbonato, $\text{CO}_3 \text{H}^+$, CO_3^-

- a) Características químicas. Existe una profunda relación entre el CO_2 gas, CO_2 disuelto, CO_3^- y pH. Estos iones comunican alcalinidad al agua en el sentido que

dan capacidad de consumo de al crear una solución tampón. No son oxidables ni reducibles en aguas naturales. Se pueden precipitar con mucha facilidad como CaCO_3 .

- b) Fuente o causa de origen. Proviene de la incorporación del bióxido de carbono en el agua y de la disolución de rocas carbonatadas como la caliza y la dolomita.
- c) Concentraciones. El ión carbonato $\text{CO}_3 \text{H}^+$ varía entre 50 y 350 ppm en aguas dulces pudiendo llegar a veces hasta 800 ppm. El agua de mar tiene alrededor de 100 ppm.
- d) El ión carbonato CO_3^- esta en concentraciones mucho menores que el ión bicarbonato y si el $\text{pH} < 8.3$ se le considera cero. En aguas alcalinas con un $\text{pH} > 8.3$ puede haber cantidades importantes, hasta 50 ppm en algunas aguas naturales. El agua de mar tiene menos de 1 ppm.
- e) Nocividad y toxicidad. No presentas problemas de toxicidad, las aguas carbonatadas sódicas son malas para riego, debido a la fijación del sodio en el terreno y creación de un medio alcalino. El equilibrio entre CO_2 , $\text{CO}_3 \text{H}^+$, CO_3^- y pH es determinante de la corrosividad o incrustividad.

4. Ión Nitrato, NO_3^-

- a) Características químicas. Sales muy solubles y por lo tanto es muy difícilmente precipitable. Aunque tiene tendencia a ser estable, aun en medios reductores, puede pasar a N_2 ó NH_4^+ .
- b) Fuente o causa de origen. Proviene de la disolución de rocas ígneas, suelos enriquecidos por legumbres y fertilizantes, establos y aguas de drenaje.
- c) Concentraciones. Normalmente entre 0.1 y 10 ppm, pero en aguas polucionadas puede llegar a 200 ppm y en algún caso hasta 1000ppm.
- d) Nocividad y toxicidad. Concentraciones elevadas en aguas de bebida pueden producir cianosis en los niños y comunican corrosividad (oxidaciones) al agua y producen interferencias en fermentaciones.

5. Sílice, SiO_2

- a) Características químicas. La hidroquímica del Silicio no está del todo aclarada pero se cree que la mayoría de la sílice está como SiO_4H_4 , en parte disuelta y en parte coloidal, y solo una pequeña parte esta ionizada (SiO_4H_3^-).
- b) Fuente o causa de origen. Proviene de la disolución de la mayoría de suelos y rocas.
- c) Concentraciones. La mayoría de las aguas naturales tienen entre 1 y 40 ppm en SiO_2 pudiendo llegar hasta 100 ppm, en especial en aguas bicarbonatadas sódicas. En aguas muy básicas puede llegar a 1000 ppm.
- d) Nocividad y toxicidad. El mayor inconveniente está relacionado con su incrustabilidad en calderas y calentadores.

5. 2. 2. 3. 2 Cationes y sustancias catiónicas

1. Ión Sodio, Na^+

- a) Características químicas. Solubilidad muy elevada y muy difícil de precipitar. Es afectado fácilmente por el cambio de bases. Suele ir asociado al ión Cl^- , aunque no siempre sucede así. Las aguas naturales con elevados contenidos en Na^+ suele contener contenidos elevados en F^- .
- b) Fuente o causa de origen. Proviene de la disolución de la mayoría de suelos y rocas. Se encuentra también en salmueras, agua de mar, desperdicios industriales y drenajes.
- c) Concentraciones. Entre 1 y 50 ppm en aguas dulces, no siendo raro encontrar contenidos mucho mayores hasta varios miles de ppm.
- d) Nocividad y toxicidad. Las aguas con concentraciones elevadas de sodio son perjudiciales a las plantas al reducir la permeabilidad del suelo, con especies nocivas si las concentraciones de Na y Mg son bajas. Aguas con contenidos elevados en CO_3HNa originan problemas de espumas en las calderas.

2. Ión Potasio, K^+

- a) Características químicas. Solubilidad muy elevada y difícil de precipitar. Esta afectado fácilmente el cambio de bases y es absorbido de forma muy poco reversible por las arcillas en formación (paso de montmorillonita a illita), para formar parte de su estructura, circunstancia que lo diferencia notablemente del Na^+ . Por ello las aguas naturales, a pesar de la mayor abundancia de K en muchas rocas, tienen mucho menos K^+ que Na^+ excepto en las muy diluidas.
- b) Fuente o causa de origen. Proviene de la disolución de la mayoría de suelos y rocas. Se encuentra también en salmueras, agua de mar y en algunos desechos industriales.
- c) Concentraciones. Entre 0.1 y 10 ppm en aguas dulces. Extraordinariamente se pueden tener algunos cientos de ppm y solo muy raramente se puede tener salmueras de hasta 100 000 ppm. El agua de mar tiene alrededor de 400 ppm.
- d) Nocividad y toxicidad. No presenta problemas especiales a las concentraciones habituales y es un elemento vital para las plantas.

3. Ión Calcio, Ca^+

- a) Características químicas. Sales desde moderadamente solubles a muy solubles. Es muy fácil de precipitar como $CaCO_3$. Su química va muy asociada a la de los iones CO_3H^- y CO_3^{2-} en muchas aguas naturales, pudiéndose precipitar y disolver con facilidad al cambiar el pH o la presión parcial de CO_2 .
- b) Fuente o causa de origen. Proviene de casi todo tipo de suelos y rocas pero en especial de la caliza, la dolomita y el yeso. Algunas salmueras contienen grandes cantidades de calcio.
- c) Concentraciones. Entre 10 250 ppm en aguas dulces, pudiendo llegar a 600 ppm en aguas selenitosas. El agua de mar contiene alrededor de 400 ppm.
- d) Nocividad y toxicidad. El mayor inconveniente va asociado al aporte de dureza y producción de incrustaciones.

4. Ión Magnesio, Mg^{++}

- a) Características químicas. Propiedades similares a la del ión calcio pero más soluble y algo más difícil de precipitar.
- b) Fuente o causa de origen. Proviene de la disolución de la mayoría de los suelos y rocas pero especialmente de las dolomitas. Algunas salmueras contienen cantidades abundantes de magnesio.
- c) Concentraciones. Entre 1 y 100 ppm en aguas dulces, pudiendo llegar a veces a algunos miles de ppm en aguas salinas o salmueras. El agua de mar contiene 1200 ppm.
- d) Nocividad y toxicidad. Propiedades laxantes y da sabor amargo al agua de bebida si algunos centenares de ppm. Contribuye a la dureza del agua y además de pH elevado puede dar $Mg(OH)_2$ incrustante.

5. 2. 2. 3. 3 Principales gases disueltos

1. Anhídrido Carbónico CO_2

- a) Características químicas. Es un gas relativamente soluble y que al hidrolizarse produce ácido carbónico parcialmente disociado. Su papel es muy importante ya que determina en gran manera el comportamiento químico de un agua frente a muchos minerales, tales como la calcita, dolomita, feldespato, etc.
- b) Concentraciones. Frecuentemente se sitúa entre 1 y 30 ppm, correspondiendo los valores más bajos a aguas en contacto fácil con la atmósfera. En acuíferos profundos en los que existe generación de CO_2 (oxidación de materia orgánica, aportes volcánicos, etc.) y elevadas presiones, pueden existir aguas con contenidos en CO_2 de hasta 1500 ppm (aguas carbónicas naturales) que se mantiene si esa agua aflora rápidamente. La presión parcial de CO_2 en la atmósfera varía entre 0.00033 y 0.00044.

- c) Nocividad y toxicidad. Las aguas con un exceso de CO_2 son agresivas y las que pierden CO_2 pueden convertirse en incrustantes. Aguas con más de 20 ppm de CO_2 libre pueden ser agresivas para el hormigón.

2. Oxígeno disuelto, O_2

- a) Características químicas. Produce un medio oxidante y juega un papel de gran importancia en la solubilización o insolubilización de iones que cambian con facilidad de valencia así como en la actividad de los microorganismos. Su ausencia produce un medio llamado anaerobio. Se consume con facilidad si existen sustancias oxidables, tales como materias orgánicas, Fe^{++} , NH_4^+ , NO_2^- , etc. En especial por acción biológica.
- b) Concentraciones. La concentración a saturación del oxígeno en el agua en contacto con el aire es del orden de 10 ppm. Previamente a la infiltración, el agua puede estar incluso sobresaturada en oxígeno, pero en el terreno el oxígeno se consume y su renovación es difícil o imposible, la mayoría de las aguas subterráneas tienen entre 0 y 5 ppm, frecuentemente por debajo de 2 ppm.
- c) Nocividad y toxicidad. El mayor problema que presenta el oxígeno disuelto en el empleo del agua es que produce corrosividad. Su ausencia puede ser origen de malos gustos (fermentaciones anaerobias).

5. 2. 2. 4. Aniones y sustancias aniónicas menores más importantes

1. Fluoruro, F^-

- a. Características químicas. Solubilidad en general limitada y al parecer contribuye ligeramente a la alcalinidad del agua pues se hidroliza ligeramente.
- b. Fuentes o causa de origen. Se encuentra diseminado en cantidades muy pequeñas, en casi todo tipo de rocas y suelos.
- c. Concentraciones. Frecuentemente entre 0. 1 y 1 ppm, pudiendo llegar a veces hasta 10 y raramente a 50 en aguas muy sódicas con muy poco calcio. El agua del mar

tiene entre 0. 6 y 0. 7 ppm. Las aguas de zonas áridas pueden tener cantidades elevadas. El calcio limita la concentración en flúor.

- d. Nocividad y toxicidad. Parece jugar un papel muy importante en la conservación de la dentadura, creando problemas cuando está tanto por exceso como por defecto.

2. Bromuro, Br⁻

- a. Características químicas. Su comportamiento es similar al del ión Cl⁻. Tiene interés en el estudio del origen de aguas saladas.
- b. Concentraciones. En general menos de 0. 01 ppm en aguas dulces. El agua del mar tiene 65 ppm.
- c. Nocividad y toxicidad. En las concentraciones usuales no ocasiona ningún problema.

3. Iones derivados del boro

- a. Características químicas. Se encuentra disuelto como BO₃H₃ parcialmente dissociado a BO₃H₂⁻. Contribuye algo a la alcalinidad.
- b. Fuente o causa de origen. Proviene de la disolución de suelos y rocas, en especial de las de origen ígneo. El agua de zonas térmicas y especialmente aquellas que se encuentran en áreas de actividad volcánica por desperdicios, especialmente donde se usan detergentes que contienen boratos.
- c. Concentraciones. En general menos de 0. 1 ppm pero a veces puede llegar a 10 y excepcionalmente a 30. El agua del mar contiene 4. 6 ppm en B. Puede ser elevado en aguas antiguas y termales.
- d. Nocividad y toxicidad. En pequeñas cantidades ya es nocivo para las plantas, pero no en el agua de bebida.

4. Sulfuro y gas sulfhídrico, S⁼ y SH₂

- a. Características químicas. Fácilmente oxidables a S, SO₃⁼ o SO₄⁼ y pueden ser depositados en el terreno ya que forman muchas sales poco solubles.

- b. Concentraciones. Generalmente muy por debajo de 1 ppm, aunque en aguas de medios muy reductores con reducción de sulfato, se puede llegar a veces hasta a 10 ppm.
- c. Nocividad y toxicidad. Comunica muy mal olor, fácilmente detectable incluso a 1 ppm o menos. Es corrosivo en especial para aleaciones de Cu.

5. Fosfato, PO_4^{3-}

- a. Características químicas. Aunque presente sales solubles, la mayoría lo son muy poco y en general se precipita como $(PO_4)_2Ca_3$. Se hidroliza con facilidad y contribuye a la alcalinidad del agua. La presencia de calcio limita su contenido y el CO_2 disuelto lo favorece.
- b. Fuente o causa de origen. Proviene del intemperismo de rocas ígneas y de la lixiviación de suelos que contienen desperdicios orgánicos, fertilizantes, detergentes y drenajes domésticos e industriales.
- c. Concentraciones. En general entre 0.01 y 1 ppm pudiendo llegar a 10 ppm y excepcionalmente a 50.
- d. Nocividad y toxicidad. En las concentraciones usuales, no origina problemas. Es esencial en el ciclo vital de los seres vivientes, pero lo adquieren por otros medios.

5. 2. 2. 5 Evolución geoquímica de las aguas en los acuíferos

5. 2. 2. 5. 1 Adquisición de sales durante la infiltración

El caso más frecuente es que el agua de lluvia alcance el nivel freático a través del suelo mediante una infiltración lenta. En ese suelo se distingue:

- a) El horizonte A o eluvial, donde se produce un lavado de materiales y donde se acumula la materia orgánica procedente de la descomposición de plantas y animales y donde la oxigenación es fácil por efecto de los canalículos creados por las raíces y la acción de los animales del suelo.
- b) El horizonte B o iluvial en el que se produce acumulación de materiales resultantes de ataque a los materiales.

- c) El horizonte C, que está formado por la roca madre disgregada y sin sufrir transporte.
- d) La roca madre intacta.

El tipo de suelo, si éste ha llegado a desarrollarse, depende de la naturaleza de la roca madre y del clima. No siempre existen los 3 horizontes. El horizonte C es el que es capaz de aportar la mayoría de las nuevas sales, aunque los horizontes A y B puedan dar pequeñas aportaciones sobre la del agua de lluvia.

La lluvia aporta sales que pasan al terreno con el agua de infiltración; esta agua ocupa total o parcialmente los poros del suelo y tiene oportunidad de disolver anhídrido carbónico y ácidos húmicos procedentes de la descomposición de la materia orgánica. Simultáneamente la materia orgánica existente consume parcial o totalmente el oxígeno disuelto pudiéndose llegar a producir, en ocasiones un medio reductor que permite la solubilización de hierro.

Si la pluviometría es mayor que la evapotranspiración, existe un lavado continuo del suelo y todas las sales que se aportan pasan a los acuíferos subyacentes, no es el valor de esa diferencia y que depende del tipo del terreno; siempre es mayor que la del agua de lluvia originaria, ya que parte de ésta se ha evaporado.

Si la evapotranspiración real es menor que la pluviometría, el agua de lluvia no alcanza a los acuíferos subyacentes y las sales aportadas por ella misma o tomadas de la parte superior del terreno se acumulan en el mismo pudiendo llegar a formar costras potentes. En realidad, después de lluvias intensas, parte del agua infiltrada puede llegar a eludir la evapotranspiración y alcanza el acuífero, pero con una concentración de sales muy elevada, ya que recoge las solubles aportadas por lluvias anteriores⁵.

Del mismo modo pueden justificarse variaciones en la salinidad del agua de recarga de un año a otro, según sea la pluviometría anual; estas variaciones son más acusadas en clima semidesértico y desértico.

Si entre el horizonte de acumulación y el nivel freático existen varios metros y el material es de permeabilidad moderada, el agua puede tardar algunos meses en alcanzar el nivel saturado y existe un efecto regulador que amortigua las variaciones estacionales de concentración e incluso a veces las anuales. Si el nivel freático está muy alto no hay tiempo a que se produzca este efecto regulador, y si está tan alto que el agua del terreno saturado

puede ser directamente evapotranspirada, existe una acumulación de sales directamente en el acuífero, ya que se evapora el agua y las sales permanecen en él y/ o se quedan en las plantas y vuelven al terreno al morir éstas. La acumulación de sales en las plantas produce también un efecto de volante regulador.

5. 2. 2. 5. 2 Agua freática en las zonas de regadío

La infiltración en zonas de regadío presenta pequeñas diferencias con la recarga por el agua de lluvia. El agua utilizada para el riego puede tener orígenes varios y en general será diferente y más salina que el agua de lluvia local; el agua que alcanza el nivel freático es el resultado de una concentración de agua de riego más las sales que se añaden en procesos en el suelo y por los abonos. La salinidad de agua infiltrada depende, pues, de la salinidad del agua de riego aplicada, y también del método de irrigación, de la dotación y del clima; en ocasiones será más salina que la infiltración natural, mientras que otras veces lo será menos. La creación de un manto vegetal en un suelo que lo tenía poco desarrollado puede aumentar la presión parcial de CO₂ en el terreno con el consiguiente aumento de la agresividad del agua; el aporte de abonos orgánicos puede favorecer notablemente este fenómeno.

Como la vegetación retiene parte de las sales del agua para formar sus propios tejidos y ésta es recogida y transportada a otros lugares, existe una cierta eliminación de sales que en general no es muy importante. En cambio, los abonos son una fuente de sales solubles; así el estiércol puede aportar del orden de 1, 5 a 2 g Cl⁻/ m²/ año y el cloruro potásico entre 2 y 4 g Cl⁻/ m² por año³.

Si el agua infiltrada es drenada por un río, éste se va cargando en sales de modo que el riego en las zonas aguas abajo es cada vez con aguas de peor calidad, si la toma se hace en el río.

Si la zona de regadío utiliza el agua del manto freático subyacente, se tiene el siguiente ciclo: extracción- evaporación- concentración- infiltración. Extracción y el agua se va concentrando en sales, con la sola dilución de los aportes de lluvia. Así se pueden

³ M. Schoeller, 1963

formar zonas con una agua de elevada salinidad con altas durezas y con elevados contenidos en sulfatos y en cloruros, si el aporte de agua nueva es precario.

Esta agua de riego que se infiltra se queda en la parte superior del acuífero freático y en ocasiones apenas existe mezcla con el resto del agua subterránea ya que los fenómenos de mezcla por dispersión y difusión molecular son muy lentos. Así se puede crear una estratificación del agua con la más salinizada en la parte superior, parte que debe ser abandonada al establecer captaciones de agua subterránea, buscando aguas algo más profundas, como se ha realizado en el Campo de Tarragona⁴, siempre y cuando en profundidad no aumente la salinidad por otras razones.

5. 2. 2. 5. 3 Movimiento del agua subterránea y su composición química

Cuando el agua circula por un terreno, reapareciendo, en superficie, unas veces con un recorrido relativamente corto (circulación local) y otras con un recorrido de cientos de km (circulación regional). Los tiempos de contacto con los materiales del acuífero son muy variados, tanto mayores cuanto mayor sea la profundidad y menor la permeabilidad, y por eso las aguas profundas suelen ser más salinas que las más próximas a la superficie dado que las oportunidades para disolver sales son mayores. Es de notar que el tiempo de contacto con el terreno de las aguas de circulación regional puede ser de muchos miles de años.

Las sales solubles que pueden ser aportadas por los diferentes tipos de rocas se refieren al caso límite, es decir suponiendo un íntimo contacto entre la roca y el agua durante un tiempo suficientemente largo. La temperatura, presión, tiempo de contacto, grado de porosidad y/ o fracturación de la roca, y el déficit de saturación juegan además un papel esencial. En las rocas permeables por fracturación existe un contacto menos íntimo entre la roca y el agua que cuando la permeabilidad es por porosidad, y por lo tanto la cesión de sales es más lenta. Es de notar que a veces se encuentra agua dulce en yesos fracturados a pesar de ser éste soluble, y es debido al poco tiempo y escasa superficie de contacto.

⁴ Custodio et al., 1968

En las aguas que circulan a gran profundidad no sólo el largo tiempo de contacto favorece la cesión de sales sino también la mayor temperatura y las elevadas presiones⁵.

Con frecuencia las aguas de circulación local apenas interaccionan con el terreno y mantienen la configuración adquirida durante la infiltración, salvo que se produzca concentración por evaporación en zonas muy próximas a la superficie, a menos que encuentren terrenos que puedan aportar sales con gran facilidad, o se mezclen con aguas más profundas.

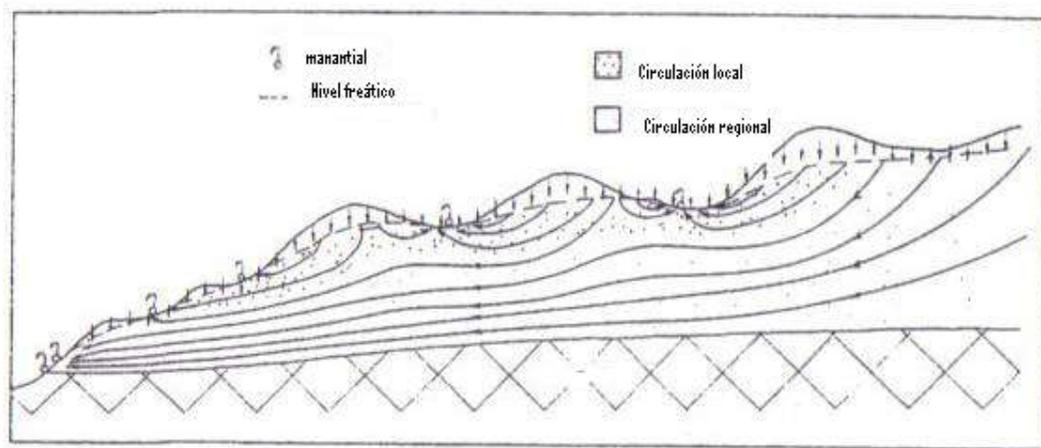


FIGURA 5. 2 Esquema de la circulación del agua en un conjunto de terrenos permeables recargados por la lluvia en los que se establecen circulación local y circulación regional.

5. 2. 2. 5. 4 Relaciones entre geología, litología y composición de las aguas subterráneas

5. 2. 2. 5. 4. 1 Relaciones litología- composición de las aguas subterráneas

Un objetivo perseguido por muchos geoquímicos e hidrogeólogos ha sido el establecer una relación entre facies geológica y composición de las aguas subterráneas o

⁵ Maclay y Winter, 1967

facies hidrogeoquímica. Aunque indudablemente existe una relación, en ella intervienen otros muchos factores como se ha expuesto a lo largo de esta sección, varios de ellos de origen externo, con los correspondientes a la composición iónica del agua de lluvia y a la evaporación y precipitaciones en el suelo. Por ello las relaciones establecidas por algunos autores han tenido un éxito limitado y su aplicabilidad está restringida a las zonas en las que se establecieron.

Las mejores relaciones se obtienen cuando el agua subterránea se ha infiltrado a través de un suelo bien desarrollado sobre el mismo material que forma el acuífero.

Esta semejanza puede ponerse de relieve mediante el estudio de relaciones entre los elementos solubles, tal como se ha esbozado en los.

Dos acuíferos litológicamente semejantes, pero en lugares diferentes pueden contener aguas semejantes o diferentes pero en general es posible encontrar algunos caracteres comunes si se selecciona bien el método de estudio. Así por ejemplo, dos acuíferos en yesos pueden proporcionar agua muy diferente en concentración si uno está en una zona poco lluviosa y es permeable por porosidad y otro está en una zona húmeda y es permeable por fisuración pero posiblemente podrá establecerse una semejanza en la distribución de iones, y aún podrá establecerse una relación mejor con el estudio de iones menores y elementos traza.

Si las aguas circulan por diferentes terrenos, su composición química en un punto determinado no sólo está influida por la litología local, sino por la litología de los terrenos atravesados anteriormente y por los fenómenos de la infiltración. Influencias muy difíciles de borrar aunque los fenómenos modificadores tiendan a enmascararlas.

En general puede decirse que las aguas de terrenos kársticos son bicarbonatadas cálcicas o cálcico- magnésicas, las de terrenos yesosos son sulfatadas cálcicas, las de terrenos formados por granito o granito alterado son bicarbonatadas sódicas y cálcicas con icb negativo, las de terrenos sedimentarios de origen marino algo arcillosos son cloruradas sódicas con escaso calcio y magnesio e icb muy negativo, las de terrenos sedimentarios de origen continental algo arcillosos son bicarbonatadas cálcicas, etc.

5. 2. 2. 5. 4. 2 Relaciones geología- geomorfología- composición de las aguas subterráneas. Tiempo de permanencia

La geología y geomorfología de una zona condicionan la circulación del agua subterránea y la distribución de las áreas de recarga y descarga e incluso el relieve puede condicionar de forma importante la pluviometría y cantidad de agua de recarga profunda⁶.

Todo ello conduce a la creación de sistemas de flujo locales y regionales, con líneas de corriente que difieren unas de otras notablemente en cuanto a recorrido y profundidad, y por lo tanto en tiempo de permanencia del agua en el terreno, temperatura y presión. El resultado es la posibilidad de notables variaciones en la hidrogeoquímica del agua según la zona que se considere. Ello explica que manantiales próximos en un mismo sistema acuífero puedan diferir notablemente en la composición del agua, a pesar de circular por el mismo tipo de roca; pueden existir caracteres comunes que se pueden poner de relieve estudiando algunas relaciones iónicas características convenientemente seleccionadas o mediante el uso de diagramas, pero la observación de un único ion o característica química, o de sólo unos pocos, suele ser insuficiente para poner de relieve esas relaciones, y es frecuente que se consideren como totalmente diferentes aguas del mismo origen, circulando por el mismo acuífero, pero con trayectos distintos.

5. 2. 2. 5. 4. 3 Variación lateral y vertical de la composición química del agua. Estratificación hidroquímica

De lo expuesto en el apartado anterior se deduce que en un acuífero se pueden presentar en ocasiones importantes variaciones en la composición química del agua subterránea. Las variaciones laterales son generalmente debidas a variaciones en las condiciones de recarga, a la explotación y a cambios en la geología, a mezclas de aguas de distintos orígenes y también a cambios en el tiempo de permanencia en el terreno por variaciones en la permeabilidad del medio.

⁶ Dixey, 1962; Kreysing, Lenz y Müller, 1972; Morgan, 1972; Toth, 1972; Custodio, 1974; Fernandopullé, 1974.

Las variaciones verticales, designadas frecuentemente como *estratificación del agua*, pueden tener los mismos orígenes, pero las causas más frecuentes son las variaciones verticales de permeabilidad (estratificación geológica, disminución de la permeabilidad en profundidad, paso de una formación a otra, etc.) o al creciente tiempo de permanencia del agua en el terreno al aumentar la profundidad, que va acompañado de un aumento en la presión y temperatura ambiente, todo lo cual favorece una mayor mineralización. Es frecuente que en acuíferos potentes y homogéneos la salinidad aumente con la profundidad.

En sistemas de flujo complejos, el paso en sentido vertical, de un sistema local a otro de carácter regional puede suponer un rápido cambio de salinidad.

Se considera que lo «normal» es que la salinidad aumente con la profundidad y por ello a las excepciones de la regla tales que al descender la salinidad disminuye permanentemente o localmente, se las llama «inversiones de salinidad». Estas inversiones de salinidad son frecuentemente debidas a la existencia de niveles más permeables con más rápida circulación del agua o a niveles que difícilmente aportan sales al agua que circula por su interior. Excepcionalmente puede tratarse de aguas profundas antiguas recargadas durante el último período pluvial, en lento proceso de expulsión por las mucho más escasas y más salinas aguas de recarga actuales, en clima notablemente más árido, tal como sucede en el Sahara, Norte de África, Arabia, etc. En zonas de mayor latitud este proceso no pudo ocurrir ya que durante la época pluvial de las zonas anteriores, en esos lugares de mayor latitud se tenían condiciones glaciares y suelo helado que impidieron la recarga y las aguas subterráneas son de recarga postglaciar con restos de aguas notablemente salinas preglaciares a causa de la aridez climática durante la época de recarga y la larga permanencia en terreno (tal parece suceder en algunas regiones de Siberia).

Estas inversiones salinas pueden ser también debidas al aporte preferencial de sales sobre la superficie freática, por ejemplo en zonas de regadío o al lavado de depósitos salinos próximos a la superficie, ya sean de desecación de antiguas lagunas, de costras y depósitos de sales de épocas pasadas, cuyo origen no siempre es fácil de explicar. Se supone que en Canadá pueden haberse originado por expulsión de aguas salinas profundas que precipitarían sales al perder presión y temperatura, expulsión debida a la fuerte compresión del terreno por las potentes sobrecargas de hielos glaciares pleistocenos⁷.

⁷ Cherry 1972

5. 2. 2. 5. 4. 4 Interés y significado de los elementos menores y de los elementos traza

Las relaciones geología- litología- aguas subterráneas puede estudiarse también a través de elementos menores y elementos trazas, en ocasiones con mayor garantía de éxito y representatividad que con los iones fundamentales. Sin embargo, en la práctica surgen ciertas dificultades que pueden invalidar el método o por lo menos crear problemas importantes en la interpretación de los hechos.

En primer lugar cabe considerar que el comportamiento y estabilidad química de muchos de esos elementos traza es mal conocida y que están sometidos a disolución y precipitación rápida a causa de cambios en las condiciones del medio y de la muestra, de modo que en ocasiones un cambio en el pH o en el potencial redox pueden producir alteraciones sustanciales. Otras veces pueden estar complejados con otros iones más abundantes o con sustancias orgánicas, ya sea de forma estable, ya sea de forma muy lábil.

En segundo lugar deben considerarse las dificultades y errores analíticos debidos a las bajas concentraciones e interferencias con otras sustancias disueltas. Muchos iones metálicos pueden determinarse por absorción atómica con razonable aproximación si su concentración es superior al umbral de determinación. En cambio otros iones más frecuentes y abundantes presentan notables dificultades de determinación, como el Br^- , lo que en ocasiones es un serio desafío a su utilización.

En tercer lugar es preciso evitar la aparición de ciertos elementos traza a consecuencia de contaminación por ataque a tuberías, depósitos, estructuras, bombas, herramientas de perforación, etc.

Sin embargo, a pesar de lo expuesto el interés del estudio de los elementos menores y traza es rápidamente creciente, y su conocimiento y técnicas de muestreo y análisis se han mejorado espectacularmente en los últimos años y es de esperar que aún mejoren notablemente.

Muchos elementos, tales como el Hg, Co, V, etc., que hasta hace poco se consideraban no detectables en muchas aguas por no poseer técnicas analíticas o de muestreo apropiadas, hoy se hallan y miden frecuentemente.

Por ahora las principales aplicaciones de estas técnicas son a la prospección minera, habiéndose desarrollado de un modo especial la del uranio, en parte facilitadas por sus peculiares características químicas.

5. 2. 2. 5. 5 Variaciones temporales en la composición del agua subterránea

En general los acuíferos se caracterizan por tener una composición del agua en un determinado punto que no varía o que en todo caso varía muy poco con el tiempo; ello es consecuencia de la existencia de un estado cuasiestacionario de evolución química, de la lentitud del movimiento del agua y de la mezcla producida por dispersión y difusión en un gran volumen de agua.

Las excepciones pueden ser debidas a varias causas. En acuíferos kársticos, con muy rápida circulación, no existe tiempo de homogenizar el agua de recarga y por lo tanto se puede apreciar, aunque amortiguada, las variaciones en la composición de la misma; aún si existe un volumen de agua subterránea importante se pueden tener variaciones, puesto que si se tiene una fuente y el acuífero funciona en régimen libre, en época de fuerte recarga gran parte de la descarga corresponde al agua aportada en ese período, mientras que en épocas de vaciado del embalse corresponde a una mezcla de aguas de períodos anteriores.

En pozos en acuíferos cualesquiera próximos a las áreas de recarga se pueden apreciar las variaciones en la misma, como por ejemplo las variaciones estacionales de calidad del agua de lluvia infiltrada o del río que recarga. Estas variaciones pueden producirse en pocos días o con varios años de retraso⁸.

Muchas veces esta variabilidad es señal de proximidad a esas zonas de recarga. Si existe una tendencia definida indica cambios notables en la composición media de la misma como puede suceder cuando en un río que recarga se establecen vertidos salinos (por ejemplo el Llobregat en Barcelona) o zonas de regadío.

En zonas de intrusión marina se pueden tener cambios rápidos de composición si el pozo está próximo a la zona de interfase y ésta fluctúa o si se sitúa sobre la propia cuña de agua salada.

⁸ Custodio, 1966 b, 1968 b

No hay que confundir las variaciones de composición del agua del acuífero en un determinado punto con las variaciones de composición del agua suministrada por un pozo construido en el mismo, ya que en este último caso influyen además otros factores. Los pozos alteran el régimen de flujo de un acuífero y así pueden inducir recarga de agua superficial o de otros acuíferos o niveles de modo que a medida que ésta se produce se va teniendo una más o menos lenta evolución de composición; si el pozo funciona de forma intermitente, es decir sólo unos ciertos períodos del año, y aún de forma variable de año a año, varía la forma de influencia en el acuífero y por lo tanto puede introducir fluctuaciones de composición.

Si se considera el pozo incompleto de la figura 5. 11, construido en un acuífero con dos niveles de permeabilidad y composición del agua diferente y que penetra sólo la parte alta del nivel superior, en explotación se tienen las líneas de corriente indicadas, cuya distribución varía poco con el tiempo. Al iniciarse el bombeo el pozo sólo recibe agua del nivel superior, empezará a recibir agua del acuífero inferior cuando haya pasado el suficiente tiempo como para que la partícula B haya llegado a la composición A. A partir de este momento llegará cada vez mayor proporción de agua del acuífero inferior hasta un cierto límite que depende del espesor y permeabilidad de cada nivel, ya que a una cierta distancia del pozo el flujo es horizontal. Si Q es el caudal del pozo y Q_1 y Q_2 , T_1 y T_2 son respectivamente los caudales aportados y transmisividades de cada nivel se debe cumplir en el caso límite que:

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2} = \frac{Q}{T_1 + T_2}$$

que permite calcular la mezcla máxima.

Si el pozo funciona en régimen variable, la composición del agua extraída también lo será sin que ello suponga una variación temporal en la composición del acuífero.

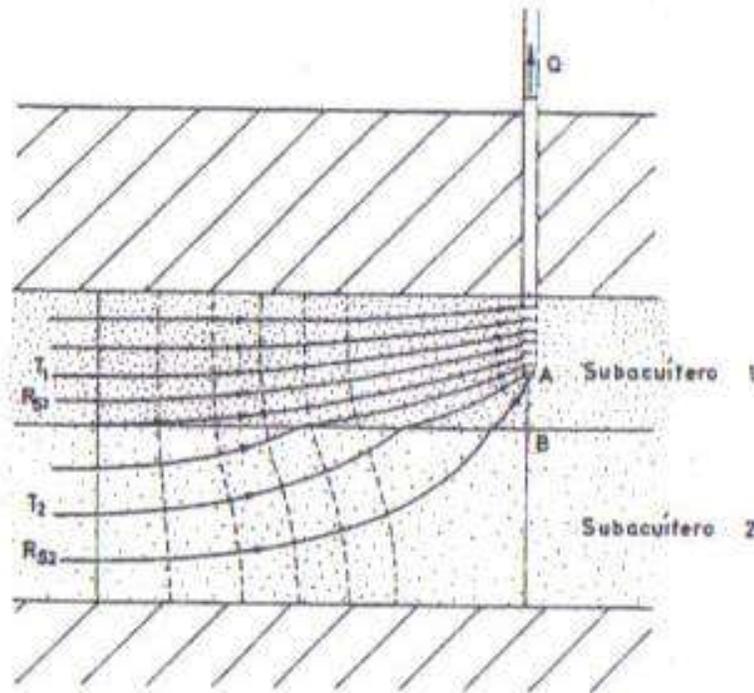


FIGURA 5. 11 Líneas de corriente hacia un pozo parcialmente penetrante en un acuífero con dos niveles de diferente transmisividad. Es un dibujo esquema.

A igual volumen de agua extraída, la composición y variabilidad varía con la penetración del pozo; los pozos completos extraen directamente la composición límite y no presentan variaciones ya que crean un flujo radial a su alrededor.

Otras causas de variación en la calidad del agua extraída de un pozo tienen su origen en diferencias constructivas o en roturas. Sea por ejemplo un pozo ranurado en un acuífero cautivo en una zona en la que existe un acuífero superficial a mayor potencial y con aguas salobres; si el aislamiento entre ambos acuíferos no es bueno debido a una deficiente construcción o a que se ha corroído la parte superior del entubado, mientras el pozo está en reposo pasa agua salobre del acuífero superior al inferior por el exterior o por el interior del mismo; al iniciarse el bombeo se extrae primero la posible agua residual dulce que queda en el pozo, después el agua salobre infiltrada y luego el agua del acuífero cautivo con algo de aportación del acuífero superior. Estas variaciones se producen muchas veces en escasos minutos, y al final se obtiene un agua de composición casi constante, pero que es en cierta forma función del caudal extraído.

5. 2. 2. 5. 6 Clasificación de las aguas subterráneas por su origen y tiempo de contacto con el acuífero. Origen de las salmueras naturales

a) Aguas vadasas o meteóricas o recientes

Son las incluidas en el ciclo del agua en la hidrosfera- litosfera- atmósfera. Se las puede caracterizar fácilmente por poseer algunos radio isótopos de vida no muy larga (tritio, radiosilicio, etc.) de origen atmosférico y una composición isotópica similar a la del agua de lluvia.

En realidad, prácticamente toda el agua de la tierra es meteórica pero sólo se considera como tal la que actualmente interviene en el ciclo y no la que accidentalmente ha sido separada del mismo.

Su composición está influida principalmente por la del agua de infiltración y la del material del acuífero.

b) Aguas marinas

Son las aguas del mar que han invadido recientemente sedimentos costeros. Son similares en composición a la del mar, quizás con mayor dureza y composición isotópica similar.

c) Aguas fósiles

Son aguas atrapadas en terreno y que permanecen en él durante de miles de años. No es preciso que sean estacionarias sino que basta con que el movimiento sea lento y el recorrido largo. Son aguas en general muy salinas pues el contacto con el terreno y es muy prolongado. Muchas aguas fósiles son en realidad una mezcla de verdaderas aguas fósiles y aguas meteóricas. El término aguas fósiles es en ocasiones utilizado impropiaemente y se confunde con aguas meteóricas de elevada salinidad.

d) Aguas congénitas

Son las aguas atrapadas en el momento de la formación de los sedimento. Esta agua atrapada es expulsada después de la consolidación, pero si la roca final es aún porosa puede quedar parte del agua de imbibición en ella, que es el agua congénita. Con frecuencia estas

agua congénitas son desplazadas y se acumulan en otros materiales donde pueden sufrir una mezcla mayor o menor con aguas valdosas; en este caso no se trata de aguas congénitas de la formación sino de aguas emigradas. Las aguas congénitas no son necesariamente aguas fósiles, pues pueden corresponder a sedimentos muy recientes. Las aguas congénitas, y también las fósiles y las emigradas, suelen ser fuertemente cloruradas y pueden estar, en relación con el agua de mar de otras épocas, enriquecidas en Γ , B, SiO_2 , NO_3^- o NH_4^+ y Ca^{++} y empobrecidas en SO_4^- y Mg^{++} . El contenido en deuterio es igual o menor que en el agua del mar y el contenido en O- 18 es mayor. En ocasiones pueden ser de temperatura superior a lo normal.

El agua de los yacimientos de petróleo ha sido interpretada con frecuencia como agua congénita, pero es más adecuado considerarla en muchos casos como agua estancada emigrada.

e) Aguas juveniles, metamórficas, magmáticas y volcánicas

Las aguas *juveniles* son aquellas que proceden del interior de la tierra sin haber estado antes en superficie y su interés es limitado. Muchas aguas consideradas juveniles son metamórficas, por lo menos en su mayor parte, como lo demuestra la presencia de tritio en ellas.

Las aguas *metamórficas* son las desprendidas de sedimentos en proceso de metamorfismo, suelen tener contenidos elevados en CO_2 , CO_3H^- y B, algo elevado en Γ y pueden ser menos cloruradas que el agua del mar, aunque el valor absoluto sea elevado; su contenido en deuterio es menor o igual que el del agua marina y el contenido en O- 18 es mayor. A veces tienen temperaturas elevadas si ganan rápidamente la superficie del terreno. Las de origen *magmático* y las *volcánicas* se desprenden de las emisiones de lava, gases volcánicos, etc., y suelen ser de tipo clorurado sódico y tienen contenidos anormalmente elevados de Li^+ , F^- , SiO_2 , B, S^- , CO_2 , y bajos en Γ , Br^- , Ca^{++} y NO_3^- o NH_4 . En principio contienen menos deuterio y más O- 18 que el agua del mar y suelen ser de elevada temperatura.

Los gases procedentes de erupciones volcánicas basálticas tienen la siguiente composición, en % en volumen⁹:

H ₂ O	70,75	H ₂	0,33
CO ₂	14,07	A	0,18
SO ₂	6,40	S ₂	0,10
N ₂	5,45	Cl ₂	0,05
SO ₃	1,95	Otros	0,35
CO	0,40		

En realidad es difícil distinguir entre estos tipos de agua y su interés es muy limitado, salvo que se relacionen con áreas geotérmicas importantes. Con frecuencia llevan mezcladas cantidades importantes de agua meteórica.

f) Aguas minerales

Son aguas de composición química muy variada, pero que se caracterizan por poseer elementos en disolución en cantidad notable o grande, que las aguas vadasas normales no poseen. Suelen estar relacionadas con fenómenos volcánicos y orogénicos y muchas veces son termales. Otras veces son simplemente el resultado de circular el agua por terrenos que pueden aportar grandes cantidades de sales solubles.

g) Aguas saladas y salmueras naturales

En la naturaleza son frecuentes las formaciones que contienen agua salada y salmueras naturales. El problema de su origen ha sido causa de múltiples hipótesis; en general se aceptó en un principio que se trataba simplemente de aguas marinas mezcladas con otras aguas continentales que las diluían. Sin embargo no es raro encontrar aguas subterráneas

⁹ Según Zumberge y Nelson (1965)

cuya mineralización supera notablemente a la actual del agua marina, para las cuales se debe encontrar otro origen (Craig, 1970).

En general se acepta actualmente el origen marino de muchas de esas aguas saladas y salmueras pero es preciso admitir que en su larga permanencia en el terreno, con frecuencia de millones de años, han sufrido procesos modificadores que pueden haber alterado su facies original. Entre los posibles procesos modificadores que conducen a un incremento de la salinidad cabe destacar la ultrafiltración, proceso mediante el que un agua forzada a pasar a través de niveles arcillosos continuos, puede dejar atrás gran parte de sus sales; el agua salada o salmuera así originada puede permanecer donde se formó o bien emigrar hacia otras formaciones a merced de la evolución geológica y geohidrológica de los terrenos. En otros casos, no tan frecuentes, es posible asociar esas aguas saladas y salmueras a aguas infiltradas de mares interiores en proceso de desecación, o bien a la disolución de las rocas evaporitas que se encontraban entre los sedimentos. En cualquier caso, el largo tiempo de permanencia en el terreno junto con las elevadas presiones y temperaturas en áreas profundas, es un factor que debe ser tenido en cuenta, aunque sea difícil de valorar en el estado actual de conocimientos.

Localmente pueden originarse aguas saladas y salmueras en áreas geotérmicas que pierden vapor de agua al exterior y más raramente en zonas muy frías en las que la congelación progresiva del agua del terremoto; produce la separación de hielo por un lado y salmuera por otro; dicho fenómeno sólo es potencialmente interesante en acuíferos poco profundos y que contienen agua marina.

Es frecuente que las aguas saladas y salmueras naturales correspondan a aguas profundas pero no siempre es así, en especial cuando existen niveles permeables profundos con circulación, en cuyo caso en estos niveles se produce un desplazamiento del agua original y un lavado, mientras los niveles menos permeables intermedios siguen reteniendo el agua original.

5. 2. 2. 6 Temperatura de las aguas subterráneas

5. 2. 2. 6. 1 Origen

El agua de lluvia que recarga a los acuíferos tiene una temperatura algo inferior a la temperatura ambiente local y si el agua que se infiltra es agua de río normalmente tiene una temperatura sólo ligeramente diferente a aquella.

Una vez el agua en el terreno, intercambia calor con el mismo. En este proceso, el elevado calor específico del agua (1 cal/ g) frente al del terreno seco (alrededor de 0,2 cal/ g) juega un papel muy importante ya que actúa como un importante regulador de la temperatura. El terreno recibe calor solar y calor interno además de algunas contribuciones menores muy poco importantes, tales como las reacciones de ataque que en él se producen o la desintegración de sustancias radioactivas. El agua a su vez puede recibir también calor procedente de otras fuentes, tales como algunas reacciones químicas (oxidación de sulfuros y materia orgánica, etc.) pero cuyo aporte es en general muy pequeño; otros aportes o cesiones tales como el calentamiento por pérdida de carga en la circulación, los cambios entálpicos por expansión o compresión, las reacciones con el suelo y la disolución de sales carecen por lo general de interés práctico.

Mientras que el aporte de calor interno (por gradiente geotérmico) es prácticamente durante muy largos períodos de tiempo, el aporte de calor solar está sometido a un ciclo diurno y un ciclo anual más unas acciones irregulares que dependen de la secuencias de días despejados y días cubiertos. El aporte medio de calor solar depende no sólo de la latitud sino también de la insolación, del grado de la absorción del terreno (mayor en zonas desnudas sin suelo) y de la orientación (si la zona es montañosa recibe más calor la solana que la umbría). Así, fuentes en el lado de la solana pueden mostrar temperaturas hasta 1 o 2 °C superiores a las equivalentes en el lado de la umbría en una zona montañosa, y las fuentes en zonas boscosas pueden tener temperaturas de 0, 1 a 0, 8 °C inferiores a fuentes equivalentes en terreno con escasa vegetación.

El sol envía sobre la tierra un flujo calorífico de 0, 0323 cal/ cm²/ seg, emitiendo la misma cantidad. Al terreno llegan entre 0, 5 y 0, 8 de este valor si está expuesto normalmente a los rayos solares. En la superficie del ecuador se reciben alrededor de 130 000 cal/ cm²/ año y en una latitud similar a la de Barcelona (41 ° N) alrededor de 70 000.

5. 2. 2. 6. 2 Fluctuación en la temperatura del agua

Debido a la variabilidad del aporte del calor solar a lo largo del día y a lo largo del año el terreno se calienta y se enfría, y el agua, por su mayor poder calorífico, toma o cede calor para tratar de compensar estos efectos, los cuales son tanto más notables cuanto más próxima está de la superficie. Si una variación de $\pm 0, 1^{\circ}\text{C}$ no es apreciable, pueden admitirse que el efecto de variaciones en el aporte de calor solar son insensibles a profundidades del orden de 25 m. El grado de saturación influye, siendo las variaciones menores en terreno saturado; en terreno no saturado existe un flujo convectivo de vapor, ascendente en invierno o durante la noche, y descendente en verano o durante el día que tiende a aumentar las fluctuaciones.

La necesidad de establecer un transporte de calor ascendente o descendente en el terreno hace que las fluctuaciones de temperatura en el mismo, además de estar amortiguadas, sigan con retraso las fluctuaciones de la temperatura ambiente. Si se admite que la temperatura del aire en su ciclo diario o anual sigue una ley sinusoidal, puede establecerse que las fluctuaciones vienen dadas por:

$$\Delta\theta_x = \Delta\theta_s \exp\left(-\frac{\pi x^2}{aT}\right) \quad a = \frac{K}{c \cdot \delta}$$

en la que:

$\Delta\theta_x$ = fluctuación de temperatura en el suelo a profundidad x ($^{\circ}\text{C}$)

$\Delta\theta_s$ = fluctuación de temperatura en la superficie del terreno ($^{\circ}\text{C}$)

x = profundidad (cm)

a = difusividad térmica del medio (cm^2/seg)

T = período (86 400 seg para las diarias y $31, 5 \cdot 10^6$ seg para las anuales)

K = conductividad del material ($\text{cal}/\text{cm}/\text{seg } ^{\circ}\text{C}$, valiendo entre $2 \cdot 10^{-3}$ y $7 \cdot 10^{-3}$)

c = calor específico del terreno húmedo ($\text{cal}/\text{g}/^{\circ}\text{C}$)

δ = densidad del terreno saturado (g/cm^3)

La variación de temperatura vendrá dada por:

$$\theta_x - \theta_x^* = (\theta_s - \theta_s^*) \exp\left(-\frac{\pi x^2}{aT}\right) \text{sen}\left(2\pi \frac{t - \tau}{T}\right)$$
$$\tau = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{T}{\pi a}}$$

en la que:

Θ = temperatura en el instante t

Θ^* = valor medio de la temperatura

t = tiempo contado a partir de un momento en que $\Theta_s = \Theta_s^*$

τ = retraso en segundos

5. 3 ESTÁNDARES DE CALIDAD DEL AGUA

El agua contiene diversas sustancias químicas, físicas y biológicas disueltas o suspendidas en ella. Desde el momento en que se condensa en forma de lluvia, el agua disuelve los componentes químicos de sus alrededores a medida que cae a través de la atmósfera, corre sobre la superficie del suelo y se filtra a través del mismo. Además, el agua contiene organismos vivos que reaccionan con sus elementos físicos químicos. Por estas razones puede ser necesario tratarla a fin de hacerla adecuada para su uso. El agua que contiene ciertas sustancias químicas u organismos microscópicos puede ser perjudicial para determinados procesos industriales y al mismo tiempo perfectamente idónea para otros. Los microorganismos causantes de enfermedades (patógenos) del agua la hacen peligrosa para consumo humano. Las aguas subterráneas de áreas con piedra caliza pueden contener un alto contenido de bicarbonato de calcio (dureza) y requerir ablandamiento previo a su uso.

Los requisitos de la calidad del agua se establecen de acuerdo al uso que se destina para el uso de la misma. Por lo común su calidad se juzga como el grado en el cual el agua se ajusta a los estándares físicos, químicos y biológicos que fija el usuario. La calidad no es tan fácil medir como la cantidad de agua en virtud de las múltiples pruebas que se necesitan para verificar que se alcanzan estos estándares. Es importante reconocer los requisitos de calidad para cada uso a fin de determinar si se requiere un tratamiento del agua y, de ser así,

que procesos se deben aplicar para alcanzar la calidad deseada. Los estándares de calidad del agua también son fundamentales para vigilar los procesos de tratamiento.

El agua se evalúa en cuanto a calidad en términos de sus propiedades físicas, químicas y microbiológicas. Es necesario que las pruebas que se utilicen para analizarla en relación con cada una de estas propiedades produzcan resultados congruentes y tenga aceptación universal, a fin de que sean posibles las comparaciones significativas con los estándares de calidad del agua. Los Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA) por sus siglas en inglés, constituyen un compendio de métodos analíticos que se siguen en Estados Unidos, Canadá y la Organización Mundial de la Salud, para establecer los límites permisibles para diversos contaminantes del agua potable. Las sustancias que se encuentran o enumeran bajo el título de “estética” se han limitado, como se indica, por que causan sabores, olores y colores indeseables, y a menos que se encuentren en exceso rara vez constituyen una amenaza para la salud. Los límites sugeridos se pueden extender en ciertas áreas en donde el tratamiento es difícil y los usuarios del agua se han acostumbrado a un sabor u olor específico. De las categorías que se enumeran bajo el término “Salud” se sabe que afectan de manera adversa a los humanos; el hecho de que se excedan los límites especificados puede ser razón suficiente para rechazar el abasto de agua. En enero de 1994, existían 84 estándares primarios (6 microbiológicos, 17 para sustancias químicas inorgánicas y 61 para sustancias químicas orgánicas sintéticas) y 15 estándares secundarios. De acuerdo con la enmienda 1986 a la Safe Drinking Water Act (Ley para el agua potable segura), la EPA está obligada a promulgar estándares para 25 contaminantes nuevos cada tres años. Como reflejo del énfasis actual en las sustancias tóxicas en el control de la contaminación del agua, los nuevos estándares para el agua potable se concentraran probablemente en sustancias químicas orgánicas sintéticas y radionúclidos.

TABLA 5. 2 ESTÁNDARES PARA AGUA POTABLE

Contaminante	Estados Unidos (U. S. EPA, 1993)	Canadá (NHW, 1993)	Internacional (WHO, 1984)
ESTÁNDARES PRIMARIOS^a (salud) MCL			
Coliformes totales	≤5 % de muestras positivas	0/ 100 mL	0
<i>Giardia lamblia</i>	TT ^b		
<i>Legionella</i> , recuento normal en placa, virus	TT (SW) ^b	—	—
Turbidez (NTU, unidades de turbidez nefelométrica)	0.5 – 1.0 NTU	1.0 NTU	1.0 NTU
Sustancias químicas inorgánicas (µg/ L)			
Antimonio	6	—	—
Arsénico	50 ^c	25 ^c	50
Asbesto (fibras de > 10 µm de longitud)	7 x 10 ⁶ / L	—	—
Bario	2000	1000	—
Berilio	4	—	—
Cadmio	5	5	5
Cromo	100	50	50
Cobre	TT ^b	—	
Flúor	4000 ^c	1500	1500
Plomo	TT ^b	10	50
Mercurio	2 (inorgánico)	1	1
Níquel	100	—	—
Nitrato + nitrito	10,000	10,000	10,000
Selenio	50	10	10
Talio	2	—	—
Sustancias químicas orgánicas seleccionadas^d (µg/ L)			
Endrín	2	—	—
Lindano	0.2	4	3
Metoxiclor	40	900	30
Toxafeno	3	—	—
2,4 – D	70	100 ^c	100
2,4,5 – TP	50	—	—
Trihalometanos (total)	100 (1995)	350 (1995)	—
	80 ^c	100 ^c	

ESTÁNDARES SECUNDARIOS ^c (estética)			
Aluminio	0.5 – 0.20 mg/ L	—	0.2 mg/ L
Cloruro	250 mg/ L	250 mg/ L	250 mg/ L
Color	15 unidades de color	15 unidades de color	15 unidades de color
Cobre	1.0 mg/ L	1.0 mg/ L	1.0 mg/ L
Corrosividad	No corrosivo	—	—
Flúor	2.0 mg/ L ^c	—	—
Agentes espumantes	0.5 mg/ L	—	—
Hierro	0.3 mg/ L	0.3 mg/ L	0.3 mg/ L
Manganeso	0.05 mg/ L	0.05 mg/ L	0.1 mg/ L
Olor	3 TON	No ofensivo	—
pH	6.5 – 8.5	6.5 – 8.5	6.5 – 8.5
Plata	0.1 mg/ L	—	—
Sulfato	250 mg/ L	500 mg/ L	400 mg/ L
Sólidos disueltos totales	500 mg/ L	500 mg/ L	1000 mg/ L
Zinc	5.0 mg/ L	5.0 mg/ L	5.0 mg/ L

^a Los estándares primarios de EUA, llamados *Maximum Contaminant Levels* (MCL, niveles máximos de contaminante), se deben respetar por ley.

^b Estándares basados en los requisitos mínimos de *Treatment Technique* (TT, técnica de tratamiento) o TT(SW) para aguas superficiales.

^c En revisión (EUA) o pauta provisional (Canadá).

^d Lista parcial. Hay MCL promulgados para 61 sustancias orgánicas sintéticas y 16 “propuestos” (U. S. EPA, 1993).

^e Los estándares secundarios de EUA, llamados *Secondary MCLs* (MCL secundarios), *no* son de observancia obligatoria por ley.

5. 3. 1 Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO)

El agua para consumo humano no debe ser un vehículo de transmisión de enfermedades, por lo que es importante establecer parámetros y sus límites máximos permisibles para garantizar que sea sanitariamente segura.

Esta norma tiene por objeto establecer los requisitos físicos, químicos y microbiológicos que debe cumplir el agua potable para proteger la salud pública.

Esta norma aplica en todo el territorio nacional y considera todos los servicios públicos, municipales y privados sea cual fuere el sistema o red de distribución, en lo relativo a la prevención y control de la contaminación de las aguas, cualquiera que sea su estado físico.

5. 3. 1. 1 Requisitos de calidad microbiológicos

TABLA 5. 3 LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA CALIDAD MICROBIOLÓGICA DEL AGUA

PARAMETRO	LIMITE MAXIMO PERMISIBLE		
	TECNICAS		
	FILTRACION POR MEMBRANA	TUBOS MULTIPLES	PLACA VERTIDA
Bacterias coliformes totales	0 UFC/100ml	<1.1 NMP/100ml	----
Bacterias coliformes fecales o termo tolerantes	0 UFC/100ml	<1.1 NMP/100ml	----
Scherichia Coli	0 UFC/100ml	<1.1 NMP/100ml	----
Conteo de bacterias heterótrofas y aerobias mesófilas	100 UFC/ml	----	100 UFC/ml
Organismos patógenos	AUSENCIA		

Cuando en una muestra se presentan organismos coliformes totales fuera de la norma, según la Tabla 5. 3 se deben aplicar medidas correctivas y se deben tomar inmediatamente muestras diarias del mismo punto de muestreo y se les debe examinar hasta que los resultados que se obtengan, cuando al menos en dos muestras consecutivas demuestren que el agua es de una calidad que reúne los requisitos exigidos por la Tabla 5. 3.

Un número mayor de 100 microorganismos por ml en el recuento total de bacterias heterotróficas, es señal de que deben tomarse medidas correctivas e indica la necesidad de una inspección sanitaria completa del sistema de abastecimiento para determinar cualquier fuente de contaminación.

En cada técnica se pueden usar los sustratos tradicionales o sustratos-enzimas. Debidamente aprobadas por una entidad internacional debidamente reconocida relacionada con la calidad del agua potable.

5.3.1.2 Requisitos de calidad fisicoquímicos

TABLA 5.4 LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y ORGANOLÉPTICAS

PARÁMETRO	UNIDAD	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
Color verdadero	Pt-Co	15
Olor	---	NO RECHAZABLE
pH	---	8.1 ¹⁾
Sabor	---	NO RECHAZABLE
Sólidos totales disueltos	Mg / L	1000 ²⁾
Turbidez	UNT	5 ³⁾
Temperatura	°C	NO RECHAZABLE

¹⁾ Límite Máximo Permisible 6.0 Unidades

²⁾ Por las condiciones propias del país.

³⁾ Para el agua tratada en la salida de planta de tratamiento de aguas superficiales, el Límite Máximo Permisible es 1.

TABLAS 5.5- 5.6 VALORES PARA SUSTANCIAS QUÍMICAS

PARÁMETRO	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE (mg/L)
Aluminio	0.2
Antimonio	0.006
Cobre	1.3
Dureza Total como (CaCO ₃)	500
Fluoruros	1.00
Hierro Total	0.30 ¹⁾

PARÁMETRO	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE (mg/L)
Manganeso	0.1 ¹⁾
Plata	0.07
Sodio	200.00
Sulfatos	400.00
Zinc	5.00

¹⁾ Cuando los valores de hierro y manganeso superen el límite máximo permisible establecido en esta norma y no sobrepasen los valores máximos sanitariamente aceptables de 0.2 mg/L para el hierro y de 0.05 mg/L para el manganeso se permitirá el uso de quelantes para evitar los problemas estéticos de color, turbidez y sabor que se genera.

TABLAS 5. 7- 5. 8 VALORES PARA SUSTANCIAS QUÍMICAS DE TIPO INORGÁNICAS DE ALTO RIESGO PARA LA SALUD

PARAMETRO	LIMITE MÁXIMO PERMISIBLE (mg/L)¹	PARAMETRO	LIMITE MÁXIMO PERMISIBLE (mg/L)¹
Arsénico	0.01	Cianuros	0.05
Bario	0.70	Cromo (Cr ⁺⁶)	0.05
Boro	0.30	Selenio	0.01
Cadmio	0.003		

PARAMETRO	LIMITE MÁXIMO PERMISIBLE (mg/L) ¹
Mercurio	0.001
Niquel	0.02
Nitrato (NO ₃) ²⁾	45.0
Nitrito (medido como Nitrógeno)	1.00
Molibdeno	0.07
Plomo	0.01

¹⁾ Sujeto a mayores restricciones.

²⁾ Dado que los nitratos y los nitritos pueden estar simultáneamente presentes en el agua de bebida, la suma de las razones de cada uno de ellos y su respectivo límite máximo permisible no debe superar la unidad, es decir:

$$\frac{NO_3}{LMP.NO_3} + \frac{NO_2}{LMP.NO_2} \leq 1$$

TABLAS 5. 9- 5. 10 VALORES PARA SUSTANCIAS QUÍMICAS DE RIESGO PARA LA SALUD

PARAMETRO	*LIMITE MAXIMO PERMISIBLE (µm/ L)	PARAMETRO	*LIMITE MAXIMO PERMISIBLE (µm/ L)
Aceites y grasas	Ausencia	1,4-Dioxano	50
Bencenos	10	Acido edetico (EDTA)	600
Tetracloruro de carbono	4	Etilbenceno	300
2-etilexilafталato	8	Hexaclorobutadieno	0.6
1,2-diclorobenceno	1000	Estireno	20
1,4-diclorobenceno	300	Tetracloroeteno	40
1,2-dicloroetano	4	Tolueno	700
1,1-dicloroeteno	30	Tricloroeteno	70
1,2-dicloroeteno	50	Xilenos	500
Diclorometano	20	Pentaclorofenol	9
Acido Nitrilo Triacetico (NTA)	200		

TABLAS 5. 11- 5. 12 VALORES PARA RESIDUOS DE PLAGUICIDAS

PARAMETRO	*LIMITE MAXIMO PERMISIBLE (µm/ L)	PARAMETRO	*LIMITE MAXIMO PERMISIBLE (µm/ L)
Alaclor	20	Dicloropropeno	100
Aldicarb	10	Dimetoato	6
Aldrin/Dieldrin	0.03	Endrín	0.6
Atrazine	2	Fenoprop	9
Carbofuran	7	Hexaclorobenceno	1
Clordane	0.2	Isoproturon	9
Clorotoluron	30	Lindano	0.3
Cyanacine	0.6	MCPA(4-Cloro-2-Metilfenoxi) Acido acético	2
2,4-D(2,4-acidodiclorofenoacetico)	30	Mecoprop	10
2,4-DB(4-(2,4-diclorofenoxi) Acido butirico)	90	Metoxyclo	20
1,2-dibromo-3-cloropropano	1	Metolacloro	10
1,2-dibromometano	15	Molinato	6
1,2-dicloropropano(1,2-DCP)	40	Pendimetalin	20
1,3-dicloropropeno	20	Pentaclorofenol	9
Simazine	2	Trifluralín	20
2,4,5-T Acido acético(2,4,5-Triclorofenoxi)	9	Terbutilazina	7

TABLAS 5. 13- 5. 14 VALORES PARA DESINFECTANTES Y SUBPRODUCTOS DE LA DESINFECCIÓN

PARAMETRO	*LIMITE MAXIMO PERMISIBLE µm/ L	PARAMETRO	*LIMITE MAXIMO PERMISIBLE µm/ L
Bromato	10	Dibromoacetnitrilo	70
Bromodiclortometano	60	Dibromoclorometano	100
Bromoformo	100	Dicloroacético	40
Hidrato de coral (tricloroacetaldehído)	10	Dicloroacetnitrilo	20
Clorato	700	Formaldehído	900
Clorito	700	Monocloroacetato	20
Cloroformo	200	Tricloroacético	200
Cloruro de Cianógeno	70	2,4,6-Triclorofenol	200
Trihalometanos totales	100		

* La sumatoria de la relación de la concentración con sus límites máximos permisibles no debe exceder a $\sum C/LMP \leq 1$

TABLA 5. 15 VALORES PARA CLORO RESIDUAL

PARAMETRO	LIMITE MAXIMO PERMISIBLE
Cloro residual libre	1.1 mg/L ¹⁾

¹⁾ **Mínimo:** 0.3 mg/L para condiciones en las que no haya brotes de enfermedades por consumo de agua contaminada.

El límite recomendable seguro y deseable de cloro residual libre en la primera vivienda más próxima al punto de inyección al sistema de abastecimiento de agua con cloro es de 1.1 mg/L y en los puntos más alejados del sistema de distribución es de 0.3 mg/L, después de 30 minutos de contacto, con el propósito principal de reducir al 99.99% de patógenos entéricos.

En ocasiones en que amenacen o prevalezcan brotes de enfermedades de origen hídrico el residual de cloro debe mantenerse un límite máximo permisible de 1.5 mg/L y un límite mínimo permisible de 0.6 mg/L en todas las partes del sistema de distribución, haciendo caso omiso de los olores y sabores en el agua de consumo. Deben tomarse medidas similares en los casos de interrupciones o bajas en la eficiencia de los tratamientos para potabilizar el agua.

Los valores recomendados y el valor máximo admisible de estas especificaciones están sujetos a modificarse cuando se pueda emplear un método analítico sencillo pero

preciso y exacto para determinar la presencia de las sustancias denominadas “Trihalometanos Totales” (THM) en el agua de consumo, siempre que no sobrepase el límite de 100 mg/L.

TABLA 5. 16 LIMITES DE LOS PARÁMETROS RADIATIVOS PARA EL AGUA POTABLE
(RADIONÚCLIDOS)

PARAMETRO	LIMITE MAXIMO PERMISIBLE
Alpha global	15 (pCi/L) ¹⁾ equivalente a dosis anual
Actividad partícula beta y fotones	4 (mrem ²⁾ / año) equivalente a dosis anua
Radio 226 y 228	5 (pCi/L) ¹⁾ equivalente a dosis anual
Uranio	30 ug/L

¹⁾ (pCi/1) = picocuries/ L

²⁾ mrem = milirem

5. 4 ÍNDICES DE CALIDAD DEL AGUA

Los índices pueden generarse utilizando ciertos elementos básicos en función de los usos del agua, el “ICA”, define la aptitud del cuerpo de agua respecto a los usos prioritarios que este pueda tener. Estos Índices son llamados de “Usos Específicos”.

El Índice de calidad de agua propuesto por Brown es una versión modificada del “WQI” que fue desarrollada por La Fundación de Sanidad Nacional de EE.UU. (NSF), que en un esfuerzo por idear un sistema para comparar ríos en varios lugares del país, creo y diseño un índice estándar llamado WQI (Water Quality Index) que en español se conoce como: INDICE DE CALIDAD DEL AGUA (ICA).

Este índice es ampliamente utilizado entre todos los índices de calidad de agua existentes siendo diseñado en 1970, y puede ser utilizado para medir los cambios en la calidad del agua en tramos particulares de los ríos a través del tiempo, comparando la calidad del agua de diferentes tramos del mismo río además de comparar lo con la calidad de agua de diferentes ríos alrededor del mundo. Los resultados pueden ser utilizados para determinar si un tramo particular de dicho río es saludable o no.

Para la determinación del “ICA” interviene 9 parámetros, los cuales son:

- Coliformes Fecales (en NMP/ 100 mL)

- pH (en unidades de pH)
- Demanda Bioquímica de Oxígeno en 5 días (DBO5 en mg/ L)
- Nitratos (NO3 en mg/L)
- Fosfatos (PO4 en mg/L)
- Cambio de la Temperatura (en °C)
- Turbidez (en FAU)
- Sólidos disueltos totales (en mg/ L)
- Oxígeno disuelto (OD en % saturación)

5. 4. 1 Estimación del Índice de Calidad de Agua General “ICA”

El “ICA” adopta para condiciones óptimas un valor máximo determinado de 100, que va disminuyendo con el aumento de la contaminación el curso de agua en estudio. Posteriormente al cálculo el índice de calidad de agua de tipo “General” se clasifica la calidad del agua con base a la siguiente tabla:

TABLA 5. 17 CLASIFICACION DEL “ICA” PROPUESTO POR BROWN
CALIDAD DE AGUA COLOR VALOR

Excelente	91 a 100
Buena	71 a 90
Regular	51 a 70
Mala	26 a 50
Pésima	0 a 25

Fuente: Lobos, José. Evaluación de los Contaminantes del Embalse del Cerrón Grande PAES 2002.

Las aguas con “ICA” mayor que 90 son capaces de poseer una alta diversidad de la vida acuática. Además, el agua también sería conveniente para todas las formas de contacto directo con ella.

Las aguas con un “ICA” de categoría “Regular” tienen generalmente menos diversidad de organismos acuáticos y han aumentado con frecuencia el crecimiento de las algas.

Las aguas con un “ICA” de categoría “Mala” pueden solamente apoyar una diversidad baja de la vida acuática y están experimentando probablemente problemas con la contaminación.

Las aguas con un “ICA” que caen en categoría “Pésima” pueden solamente poder apoyar un número limitado de las formas acuáticas de la vida, presentan problemas abundantes y normalmente no sería considerado aceptable para las actividades que implican el contacto directo con ella, tal como natación.

Para determinar el valor del “ICA” en un punto deseado es necesario que se tengan las mediciones de los 9 parámetros implicados en el cálculo del Índice los cuales son: Coliformes Fecales, pH, (DBO₅), Nitratos, Fosfatos, Cambio de la Temperatura, Turbidez, Sólidos disueltos Totales, Oxígeno disuelto.

La evaluación numérica del “ICA”, con técnicas multiplicativas y ponderadas con la asignación de pesos específicos se debe a Brown.

Para calcular el Índice de Brown se puede utilizar una suma lineal ponderada de los subíndices (ICA_a) o una función ponderada multiplicativa (ICA_m). Estas agregaciones se expresan matemáticamente como sigue:

$$ICA_a = \sum_{i=1}^9 (Sub_i * w_i)$$

$$ICA_m = \prod_{i=1}^9 (Sub_i^{w_i})$$

Donde:

w_i: Pesos relativos asignados a cada parámetro (Sub_i), y ponderados entre 0 y 1, de tal forma que se cumpla que la sumatoria sea igual a uno.

Sub_i: Subíndice del parámetro i.

Otros autores (Landwehr y Denninger, 1976), demostraron que el cálculo de los “ICA” mediante técnicas multiplicativas es superior a las aritméticas, es decir que son mucho más sensibles a la variación de los parámetros, reflejando con mayor precisión un cambio de calidad. Es por esta razón que la técnica que se aplicará en este estudio es la multiplicativa.

Para determinar el valor del “ICA” es necesario sustituir los datos en la ecuación 2 obteniendo los Sub_i de distintas graficas como se explicará a continuación, dicho valor se eleva por sus respectivos w_i de la Tabla 2 y se multiplican los 9 resultados obteniendo de esta manera el “ICA”.

Los pesos de los diversos parámetros son:

TABLA 5. 18 PESOS RELATIVOS PARA CADA PARÁMETRO DEL “ICA”

i	Sub_i	w_i	i	Sub_i	w_i
1	Coliformes Fecales	0.15	6	Temperatura	0.10
2	pH	0.12	7	Turbidez	0.8
3	DBO ₅	0.10	8	Sólidos disueltos Totales	0.8
4	Nitratos	0.10	9	Oxigeno Disuelto	0.17
5	Fosfatos	0.10			

6. METODOLOGIA

6.1 METODOLOGIA DE CAMPO

En general, para establecer e identificar de manera adecuada los puntos de muestreo, el proceso metodológico se desarrolló en las siguientes etapas:

6.1.1 Visitas a instituciones relacionadas con el proyecto de investigación:

Con el propósito de recopilar información sustentable y de valor teórico, se coordinarán algunas visitas con entidades relacionadas al proyecto de investigación. Entre las instituciones que se contactaron y visitaron están:

Asociación Comunal Fuente de Bendición (ACOFUBEN): con el fin de poder obtener información de primera mano que nos sirvió como punto de referencia de la zona delimitada del proyecto.

Sistema Nacional de Estudios Territoriales (SNET): sirvió para poder establecer si se ha realizado algún tipo de estudio al recurso hídrico de la zona.

Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN): fue de gran ayuda para la recopilación de información acerca del tipo de protección que este ente gubernamental está proporcionando a este tipo de recurso hídrico.

Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA): la visita a esta institución fue con el fin de obtener un respaldo, para que el grupo investigador pudiera llevar a cabo la realización de los análisis de los parámetros establecidos en el proyecto de investigación.

Centro Nacional de Registros (CNR): con el propósito de obtener los diversos mapas de la zona de investigación.

6. 1. 2 Criterios de Selección del número de puntos a muestrear:

El número de muestras se estableció en base a dos criterios:

1- DE ACUERDO AL NUMERO DE POZOS:

TABLA 6. 1 Cantidad de Pozos a Muestrear

Tamaño del Lote de Pozos (No. De Pozos)	Cantidad de Pozos a muestrear (No. De Pozos)
2 a 15	2
16 a 25	3
26 a 90	5
91 a 150	8
151 a 280	13
281 a 500	20

FUENTE: Norma Regional Armonizada CAPRE (Comité Coordinador de Instituciones de Agua Potable y Saneamiento de Centroamérica, Panamá y República Dominicana)

2- DE ACUERDO AL NUMERO DE HABITANTES DE LA ZONA:

TABLA 6. 2 NÚMERO DE MUESTRAS Y FRECUENCIA DE MUESTREO PARA ANALISIS FISICOQUIMICOS Y MICROBIOLÓGICOS

TAMAÑO DE POBLACIÓN (HABITANTES)	MÍNIMO	NORMAL	COMPLETO
< 25, 000	1 muestra mensual	1 muestra bimensual	1 muestra anual
25, 000 a 100, 000	1 muestra/ 5, 000 El total de muestras distribuidas en dos muestreos quincenales	1 muestra bimensual/ 50, 000 usuarios	1 muestra semestral/ 50, 000 usuarios
100, 001 a 300, 000	1 muestra/ 10, 000 más 5 adicionales. (El total de muestras distribuidas en cuatro muestreos mensuales)	1 muestra mensual/ 50, 000 usuarios	1 muestra trimestral/ 50, 000 usuarios

FUENTE: Norma Salvadoreña Obligatoria Para Agua Potable (NSO)

Mediante la visita e inspección a la zona de estudio del proyecto de investigación, se determinó y estableció el número de pozos artesanales existentes en la zona. Se clasificaron todos los pozos artesanales en base al número de habitantes que los utilizan para actividades agrícolas, ganaderas y domésticos; un criterio importante es el nivel freático que estos presentan.

Se realizó además un sondeo para determinar cuántos hogares de la zona de investigación, cuentan con servicio de agua potable, la cual es extraída de los mantos

acuíferos y suministrada a través de una red de abastecimiento, dicha agua es tratada y administrada por los mismos habitantes de la zona.

TABLA 6. 3 CARACTERISTICAS DE LOS PUNTOS DE MUESTREO IDENTIFICADOS EN EL TRABAJO DE INVESTIGACION

PUNTOS DE MUESTREO	PROFUNDIDAD	GEOREFERENCIACION		ALTURA	PROCEDENCIA
		LATITUD	LONGITUD		
1	16.15 m	14°02' 10''	0.89°30'49''	547 m	Pozo con nivel freático alto
2	3.60 m	14°02'03''	0.89°30'49''	538 m	Pozo con nivel freático bajo
3	-----	14°01'27''	0.89°30'14''	516 m	Afloramiento de agua superficial aledaño al tanque de captación
4	-----	-----	-----	-----	Grifo de casa de la casa más cercana al tanque de captación

El diseño metodológico de muestreo aplicado para cada punto, en cada uno de ellos se llevaron a cabo seis mediciones con el fin de obtener confiabilidad y sustentabilidad estadística.

Con el establecimiento y la determinación de los puntos de muestreo, se abarco tanto fuentes de agua subterráneas como superficiales, lo cual ayudó a determinar inferencias estadísticas, que permitieron establecer la existencia de contaminación.

Una vez establecidos todos los puntos de muestreo, se procedió a ubicarlos en el mapa de la zona a escala 1: 25000 para tener referencia geográfica y poder identificarlos fácilmente. A la vez servirá para analizar la distribución de los puntos por toda la zona delimitada del proyecto de investigación.

Obtenidos los respectivos permisos por parte de los habitantes que viven en cada una de las casas dentro de las cuales se tomaron las muestras respectivas, de igual manera se tramitó el permiso respectivo de ACOFUBEN para la toma de muestras en la bomba de captación.

6. 2 METODOLOGÍA DE LABORATORIO

Las muestras recolectadas fueron preservadas y transportadas debidamente a los laboratorios donde se realizaron los análisis fisicoquímicos y microbiológicos.

El trabajo de laboratorio se realizó en los Laboratorios de Control de Calidad y Control de Contaminantes en el Agua de ANDA; quienes se rigen por métodos oficiales y a su vez para cumplir la Norma Salvadoreña Obligatoria para la calidad del agua.

A continuación se presentan los parámetros determinados en la matriz del agua del sector donde se desarrollo el proyecto de la investigación.

TABLA 6. 4 PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS ANALIZADOS PARA CARACTERIZAR LAS FUENTES DE AGUA

Parámetro	Método
Bacterias Coliformes Totales	Tubos Múltiples
Bacterias Coliformes Fecales	Tubos Múltiples
Escherichia Coli	Tubos Múltiples
Turbidez	Nefelométrico
pH	Electrométrico
Olor	Tabla
Color Verdadero	Espectrofotométrico
Sólidos Totales Disueltos	Electrométrico
Aluminio	Espectrofotométrico
Hierro Total	Fenantrolina, 3500- Fe B
Manganeso Total	Persulfato 3500- Mn B
Sulfatos	Turbidimétrico, 4500- SO_4^{2-} E
Dureza Total	EDTA Titulométrico
Zinc	Espectrofotométrico
Cloro Residual	Colorimétrico
Plaguicidas Órgano Colorados	Cromatográfico, EPA
Plaguicidas Órgano Fosforados	Cromatpográfico, EPA

6. 3 METODOLOGIA ESTADISTICA

La metodología estadística que se implementó en el proyecto de investigación fue la prueba “t de Student”, la cual nos permitió establecer y demostrar la diferencia significativa de cada parámetro analizado entre cada uno de los pozos artesanales, así como en la red de distribución de agua potable. Además, se comparó la carga microbiológica y fisicoquímica

con la Norma Salvadoreña Obligatoria. Diario Oficial (NSO) 13,35.01:05 San Salvador 2 de febrero del 2006, del afloramiento de agua y también de la red de distribución de agua potable del cantón de Cutumay Camones. Asimismo se midieron los Índices de Calidad del Agua (ICA) en el afloramiento de agua.

Se tomó un valor de nivel de significancia del 95% ($t = 0.05$), el cual permitió dar una respuesta concreta de la variación de los datos obtenidos en diferentes puntos de muestreo, ya que con este nivel de significancia, el grupo investigador tiene el 95% de seguridad para generalizar sin equivocarse y 5% de generalizar y cometer un error. Cuanto menor sea la posibilidad de error, mayor será la certeza en los resultados.

6.3.1 EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DEL AFLORAMIENTO DE AGUA PARA SER UTILIZADO COMO AGUA DE CONSUMO HUMANO Y MEDICIÓN DE LOS ÍNDICES DE CALIDAD

Se evaluó cada parámetro analizado contra su correspondiente valor de la Norma Salvadoreña Obligatoria. Diario Oficial (NSO) 13,35.01:05 San Salvador 2 de febrero del 2006, para detectar cuales parámetros se comportaron dentro de los criterios de la NSO, e inferir en la calidad del agua para consumo humano, y además se estableció un perfil de los Índices de Calidad (ICA) para esa fuente de agua (Afloramiento).

6.3.2 COMPARACIÓN DE LA CALIDAD MICROBIOLÓGICA Y FISICOQUÍMICA DE LOS POZOS ARTESANALES Y LOS REQUERIMIENTOS DE LA NORMA SALVADOREÑA OBLIGATORIA (NSO).

Se realizó una evaluación de los parámetros analizados contra la Norma Salvadoreña Obligatoria. Diario Oficial (NSO) 13,35.01:05 San Salvador 2 de febrero del 2006, de igual manera se estableció la diferencia significativa entre los pozos artesanales, para lo cual se aplicó el análisis estadístico “t de student” con la siguiente ecuación:

$$t = (\bar{x}_1 - \bar{x}_2) \sqrt{\frac{n(n-1)}{\sum x_1^2 + \sum x_2^2}}$$

En donde:

= Media de la muestra del parámetro en el punto de muestreo de referencia.

= Media de la muestra del parámetro en un punto determinado de muestreo.

x_1^2 = Desviación de la muestra del parámetro en el punto de muestreo de referencia elevada al cuadrado.

x_2^2 = Desviación de la muestra del parámetro en un punto determinado de muestreo elevado al cuadrado.

n = Número de muestras en el punto de referencia y en el punto de muestreo determinado respectivamente.

Para la aplicación de este método de comparación de la prueba “t de student”, se utilizará la siguiente fórmula para calcular los grados de libertad:

$$GL = 2(n - 1)$$

Donde n= número de muestras o población total.

6. 3. 3 EVALUACIÓN CALIDAD MICROBIOLÓGICA Y FISICOQUÍMICA DEL AGUA DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN Y COMPARACIÓN CON LA NORMA SALVADOREÑA OBLIGATORIA DE LA CALIDAD MICROBIOLÓGICA Y FISICOQUÍMICA

Por medio de la evaluación a la red de distribución de agua potable, se evaluó el potencial de potabilización del agua de consumo humano de la comunidad, y se realizó una comparación que sirvió para establecer y determinar si existe diferencia significativa en los resultados de la red de distribución de agua potable, para lo cual se aplicó el análisis

estadístico “t de student” para muestras independientes (datos no apareados) por medio de la siguiente ecuación:

$$t = \frac{(\bar{x} - \mu)}{S_{\bar{x}}}$$

En donde:

\bar{x} = Media de la muestra del parámetro en un punto determinado de muestreo

μ = Valor de la Norma salvadoreña Obligatoria (NSO)

$S_{\bar{x}}$ = Error estándar

Para la aplicación de este método de comparación de la prueba “t de student”, se utilizó la siguiente fórmula para calcular los grados de libertad:

Grados de Libertad: n – 1

Los puntos de muestreo para los tres métodos de comparaciones y las correspondientes aplicaciones de la prueba “t de student” utilizaron los siguientes puntos de muestreo que se detallan a continuación:

TABLA 6. 5 PUNTOS DE MUESTREO EN EL PROYECTO DE INVESTIGACION.

PUNTOS DE MUESTREO
POZO CON NIVEL FREATICO ALTO
POZO CON NIVEL FREATICO BAJO
AFLORAMIENTO DE AGUA SUPERFICIAL ALEDAÑO AL TANQUE DE CAPTACIÓN
GRIFO DE CASA DE LA CASA MAS CERCANA AL TANQUE DE CAPTACION

Una vez se calculó el valor de “t”, los grados de libertad, y se eligió el nivel de significancia, se comparó el valor obtenido, el t experimental, contra el valor que le correspondería, el t teórico.

7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

TABLA 7. 1 Calidad Microbiológica y Físicoquímica del Afloramiento de agua (Nacimiento Mazacúa)

PARÁMETRO	VALOR x DETERMINADO	VALOR DE LA NORMA	CUMPLE CON LA NORMA	FUERA DE LA NORMA
Turbiedad	1.26	5 NTU	X	
Bacterias coliformes totales	30000	<1.1 NMP/ 100 ml		X
Bacterias coliformes fecales	300	<1.1 NMP/ 100 ml		X
Escherichia coli	300	<1.1 NMP/ 100 ml		X
pH	6.16	6.0 – 8.5	X	
Color verdadero	3	15 UPt – Co	X	
Solidos totales disueltos	153	1000 mg / L	X	
Aluminio	0.00	0.2 mg / L	X	
Hierro	0.031	0.3 mg / L	X	
Manganeso total	0.030	0.1 mg / L	X	
Sulfatos	23.5	400 mg / L	X	
Dureza total	91.87	500 mg / L	X	
Zinc	0.379	5.0 mg / L	X	
DBO ₅	1.29	150 mg / L	X	
Nitratos	7.368	45 mg / L	X	
Fosfatos	0.38			
Oxígeno disuelto	3.77	-----		

La tabla 7. 1, muestra los resultados obtenidos en el punto denominado “Afloramiento de Agua”, y nos demuestra que los requisitos de la calidad microbiológica de agua sobrepasan los límites permisibles establecidos por Diario Oficial (NSO) 13,35.01:05 San Salvador 2 de febrero del 2006., no así los parámetros físicoquímicos, los cuales no sobrepasan los límites permisibles establecidos por dicha Norma; las alteraciones que se presentan en los parámetros microbiológicos pueden ser causados por diversos factores tales como: el cambio climático, la escorrentía, y otras contaminaciones antropogénicas. La presencia de Coliformes totales es normal en una muestra cruda, ya que son bacterias del entorno normal, pero la presencia de bacterias Coliformes fecales y Escherichia coli, son un indicador de contaminación fecal, lo cual podría mejorarse con la implementación de criterios sanitarios de protección de la fuente en el punto de toma de agua.

**Tabla 7. 2 Determinación del ICA en el afloramiento de agua
(Método multiplicativo)**

PARAMETRO		VALOR	UNIDADES	Sub _i	w _i	TOTAL
1	Coliformes Fecales	300	NMP/ 100 ml	40	0.15	6
2	pH	6.16	-----	58	0.12	7
3	DBO ₅	1.29	mg / L	85	0.10	9
4	Nitratos	7.368	mg / L	58	0.10	6
5	Fosfatos	0.38	mg / L	73	0.10	7
6	Turbidez	1.26	NTU	96	0.08	8
7	Cambio de la temperatura	27 °C *	°C	85	0.10	9
8	Sólidos totales disueltos	153	mg / L	78	0.08	6
9	Oxigeno Disuelto	3.77	% saturación	4	0.17	1

*Temperatura ambiental 28°C

Tabla 7. 3 TABLA PARA LA CLASIFICACIÓN DEL CUERPO DE AGUA SEGÚN EL INDICE DE CALIDAD DE AGUA POR EL METODO MULTIPLICATIVO.

CALIDAD DEL AGUA	VALOR
EXCELENTE	91 a 100
BUENA	71 a 90
REGULAR	51 a 70
MALA	26 a 50
PÉSIMA	0 a 25

FUENTE: LOBOS, JOSÉ. Evaluación de los contaminantes del embalse del cerrón grande 2002.

La tabla 7. 2 hace referencia al Índice de Calidad del Agua por el método multiplicativo de los cuerpos de agua del sector estudiado en el proyecto, los cuales obtuvieron un valor que según la clasificación que nos muestra la tabla 7. 3, “REGULAR”, lo que nos indica que es aceptable para consumo humano, no obstante necesita de una intervención sanitaria para poder recuperar y preservar la fuente de abastecimiento ya que está en un punto crítico, como lo señala el ICA.

TABLA 7. 4 Evaluación de la calidad Microbiológica y Físicoquímica del Pozo Artesanal de mayor nivel freático

Parámetro	Promedio Pozo N° 1 Valor determinado	t	Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO)	t _{0.05}	Diferencia Significativa
Turbiedad	20. 8 NTU	438. 9	5 NTU	4. 773	*
Bacterias Coliformes Totales	16, 000 NMP/ 100 ml	27. 71	< 1. 1 NMP/ 100 ml	4. 773	*
Bacterias Coliformes Fecales	220 NMP/ 100 ml	486. 44	< 1. 1 NMP/ 100 ml	4. 773	*
Escherichia coli	220 NMP/ 100 ml	486. 44	< 1. 1 NMP/ 100 ml	4. 773	*
pH	6. 76	131. 03	6. 0 - 8. 5	4. 773	*
Color Verdadero	190 U pt- Co	135. 66	15 U pt- Co	4. 773	*
Sólidos Totales Disueltos	206 mg/ l	- 1526. 92	1000 mg/ l	4. 773	*
Aluminio	0. 01 mg/ l	- 527. 8	0. 2 mg/ l	4. 773	*
Hierro Total	0. 790 mg/ l	1088. 89	0. 3 mg/ l	4. 773	*
Manganeso Total	0. 022 mg/ l	- 213. 69	0. 1 mg/ l	4. 773	*
Sulfatos	37. 667 mg/ l	- 805184. 44	400 mg/ l	4. 773	*
Dureza	111. 01 mg/ l	- 149611. 54	500 mg/ l	4. 773	*
Zinc	0. 200 mg/ l	- 10666. 67	5. 0 mg/ l	4. 773	*

* Diferencia significativa

En la tabla 7. 4 se presentan todos los parámetros microbiológicos y físicoquímicos estudiados en el pozo artesanal de mayor nivel freático del sector donde se desarrolló el proyecto, el cual tiene una profundidad de 16. 15 m., y de acuerdo a la Norma Salvadoreña Obligatoria. Diario Oficial (NSO) 13,35.01:05 San Salvador 2 de febrero del 2006., los parámetros microbiológicos no cumplen los requisitos establecidos por la NSO; las variaciones que se presentan en los parámetros microbiológicos pueden ser causados por diversos, ya que se observa presencia de ganado cerca de los pozos, además el cambio climático y otras contaminaciones antropogénicas, las cuales pueden ser controladas con un tratamiento adecuado de potabilización, mientras los parámetros físicoquímicos, Turbiedad, Color Verdadero y Hierro Total sobrepasan los requisitos establecidos por la NSO.

TABLA 7. 5 Evaluación de la calidad Microbiológica y Fisicoquímica del Pozo Artesanal de Menor nivel freático

Parámetro	Promedio Pozo N° 2 Valor determinado	t	Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO)	t _{0.05}	Diferencia Significativa
Turbiedad	18. 5 NTU	254. 7	5 NTU	4. 773	*
Bacterias Coliformes Totales	14, 000 NMP/ 100 ml	242. 49	< 1. 1 NMP/ 100 ml	4. 773	*
Bacterias Coliformes Fecales	200 NMP/ 100 ml	34. 453	< 1. 1 NMP/ 100 ml	4. 773	*
Escherichia coli	190 NMP/ 100 ml	32. 72	< 1. 1 NMP/ 100 ml	4. 773	*
pH	6. 14	14. 29	6. 0 - 8. 5	4. 773	*
Color Verdadero	158 U pt- Co	275	15 U pt- Co	4. 773	*
Sólidos Totales Disueltos	200 mg/ l	- 155. 04	1000 mg/ l	4. 773	*
Aluminio	0. 02 mg/ l	- 73. 47	0. 2 mg/ l	4. 773	*
Hierro Total	0. 740 mg/ l	179. 6	0. 3 mg/ l	4. 773	*
Manganeso Total	0. 019 mg/ l	- 202. 5	0. 1 mg/ l	4. 773	*
Sulfatos	37. 229 mg/ l	- 181385. 5	400 mg/ l	4. 773	*
Dureza	110. 90 mg/ l	- 21616. 7	500 mg/ l	4. 773	*
Zinc	0. 210 mg/ l	1995. 8	5. 0 mg/ l	4. 773	*

* Diferencia significativa

En la tabla 7. 5 se presentan todos los parámetros microbiológicos y fisicoquímicos estudiados en el pozo artesanal de menor nivel freático del sector donde se desarrolló el proyecto, el cual tiene una profundidad de 3. 60 m., y de acuerdo a la Norma Salvadoreña Obligatoria. Diario Oficial (NSO) 13,35.01:05 San Salvador 2 de febrero del 2006., los parámetros microbiológicos no cumplen los requisitos establecidos por la NSO, las variaciones que se presentan en los parámetros microbiológicos pueden ser producidos por diversos, ya que se observa presencia de ganado cerca de los pozos, además el cambio climático y otras contaminaciones antropogénicas, las cuales pueden ser controlados bajo un tratamiento adecuado de potabilización, mientras los parámetros fisicoquímicos,

Turbiedad, Color Verdadero y Hierro Total sobrepasan los requisitos establecidos por la NSO.

TABLA 7. 6 Evaluación de la calidad Microbiológica y Físicoquímica del Pozo Artesanal de Mayor nivel freático contra el Pozo Artesanal de Menor nivel freático

Parámetro	Promedio Pozo N° 1 Valor determinado	Promedio Pozo N° 2 Valor determinado	t	Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO)	t _{0.05}	Diferencia Significativa
Turbiedad	20. 8 NTU	18. 5 NTU	26. 92	5 NTU	4. 773	*
Bacterias Coliformes Totales	16, 000 NMP/ 100 ml	14, 000 NMP/ 100 ml	393. 78	< 1. 1 NMP/ 100 ml	4. 773	*
Bacterias Coliformes Fecales	220 NMP/ 100 ml	200 NMP/ 100 ml	28. 1	< 1. 1 NMP/ 100 ml	4. 773	*
Escherichia coli	220 NMP/ 100 ml	190 NMP/ 100 ml	42. 10	< 1. 1 NMP/ 100 ml	4. 773	*
pH	6. 76	6. 14	17. 42	6. 0 - 8. 5	4. 773	*
Color Verdadero	190 U pt- Co	158 U pt- Co	107. 16	15 U pt- Co	4. 773	*
Sólidos Totales Disueltos	206 mg/ l	200 mg/ l	8. 81	1000 mg/ l	4. 773	*
Aluminio	0. 01 mg/ l	0. 02 mg/ l	- 0. 66	0. 2 mg/ l	4. 773	
Hierro Total	0. 790 mg/ l	0. 740 mg/ l	3. 3	0. 3 mg/ l	4. 773	
Manganeso Total	0. 022 mg/ l	0. 019 mg/ l	0. 39	0. 1 mg/ l	4. 773	
Sulfatos	37. 667 mg/ l	37. 229 mg/ l	33. 76	400 mg/ l	4. 773	*
Dureza	111. 01 mg/ l	110. 90 mg/ l	2. 65	500 mg/ l	4. 773	
Zinc	0. 200 mg/ l	0. 210 mg/ l	- 0. 66	5. 0 mg/ l	4. 773	

* Diferencia significativa

Según la tabla 7. 6, observamos que existe diferencia significativa entre el pozo de mayor nivel freático y el pozo de menor nivel freático en todos los parámetros microbiológicos, y en los parámetros físicoquímicos solamente en Turbiedad, pH, Color verdadero, Sólidos Totales Disueltos y Sulfatos.

TABLA 7. 7 Evaluación de la calidad Microbiológica y Físicoquímica de la Red de distribución

Parámetro	Valor determinado	t	Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO)	Cumplimiento de la Norma	
				Cumple NSO	No Cumple NSO
Turbiedad	0. 6 NTU	- 628. 57	5 NTU	X	
Bacterias Coliformes Totales	9, 000 NMP/ 100 ml	201. 23	< 1. 1 NMP/ 100 ml		X
Bacterias Coliformes Fecales	900 NMP/ 100 ml	80. 40	< 1. 1 NMP/ 100 ml		X
Escherichia coli	900 NMP/ 100 ml	62. 29	< 1. 1 NMP/ 100 ml		X
pH	6. 59	159. 46	6. 0 - 8. 5	X	
Color Verdadero	2 U pt- Co	- 288. 89	15 U pt- Co	X	
Sólidos Totales Disueltos	173 mg/ l	- 1602. 71	1000 mg/ l	X	
Aluminio	0. 00 mg/ l	- 262. 37	0. 2 mg/ l	X	
Hierro Total	0. 056 mg/ l		0. 3 mg/ l	X	
Manganeso Total	< 0. 030 mg/ l	- 120. 69	0. 1 mg/ l	X	
Sulfatos	4. 667 mg/ l	- 681608. 62	400 mg/ l	X	
Dureza	97. 61 mg/ l	- 67197. 78	500 mg/ l	X	
Zinc	0. 239 mg/ l	- 10580	5. 0 mg/ l	X	

La tabla 7. 7, exhibe los resultados obtenidos en el punto denominado “Red de Distribución”, y nos demuestra que los requisitos de la calidad microbiológica de agua sobrepasan los límites permisibles establecidos por Diario Oficial (NSO) 13,35.01:05 San Salvador 2 de febrero del 2006., no así los parámetros físicoquímicos, los cuales no sobrepasan los límites permisibles establecidos por dicha Norma; las alteraciones presentadas en los parámetros microbiológicos pueden ser causados por un incorrecto tratamiento de potabilización en la planta.

8. CONCLUSIONES

- Se ha determinado que los niveles de los parámetros fisicoquímicos en el afloramiento de agua no sobrepasan los niveles establecidos por la Norma Salvadoreña Obligatoria. Diario Oficial (NSO) 13,35.01:05 San Salvador 2 de febrero del 2006., y que los niveles de los parámetros microbiológicos sobrepasan los niveles establecidos, por lo que es evidente que las aguas de este punto necesitan ser potabilizadas para un posterior consumo humano.

- Se establece que según los Índices de Calidad del Agua (ICA), la clasificación del agua del sector es “regular”, lo cual indica que son aptas para su consumo humano, mas sin embargo es importante recalcar que es necesario dar un seguimiento monitoreando constantemente los parámetros que involucran los índices de calidad de estos cuerpos de agua.

- Se comprueba que el pozo con mayor nivel freático los parámetros microbiológicos y los siguientes parámetros fisicoquímicos: la turbidez, Color verdadero y Hierro total, sobrepasan los niveles establecidos por la Norma Salvadoreña Obligatoria. Diario Oficial (NSO) 13,35.01:05 San Salvador 2 de febrero del 2006., por lo tanto es importante para poder potabilizar, aplicar un sistema convencional de tratamiento (Sedimentación, Floculación, Filtración y aplicación de Cloro como desinfectante según demanda de cloro del agua a la salida de los filtros).

- Se observa que el pozo con menor nivel freático los parámetros microbiológicos y los siguientes parámetros fisicoquímicos: la turbidez, Color verdadero y Hierro total sobrepasan los niveles establecidos por la Norma Salvadoreña Obligatoria. Diario Oficial (NSO) 13,35.01:05 San Salvador 2 de febrero del 2006., por lo que es importante para poder potabilizar, aplicar un sistema convencional de tratamiento (Sedimentación,

Floculación, Filtración y aplicación de Cloro como desinfectante según demanda de cloro del agua a la salida de los filtros).

- En base al análisis estadístico realizado, se observa que tanto el pozo con mayor y menor nivel freático, presentan una diferencia significativa estadísticamente.

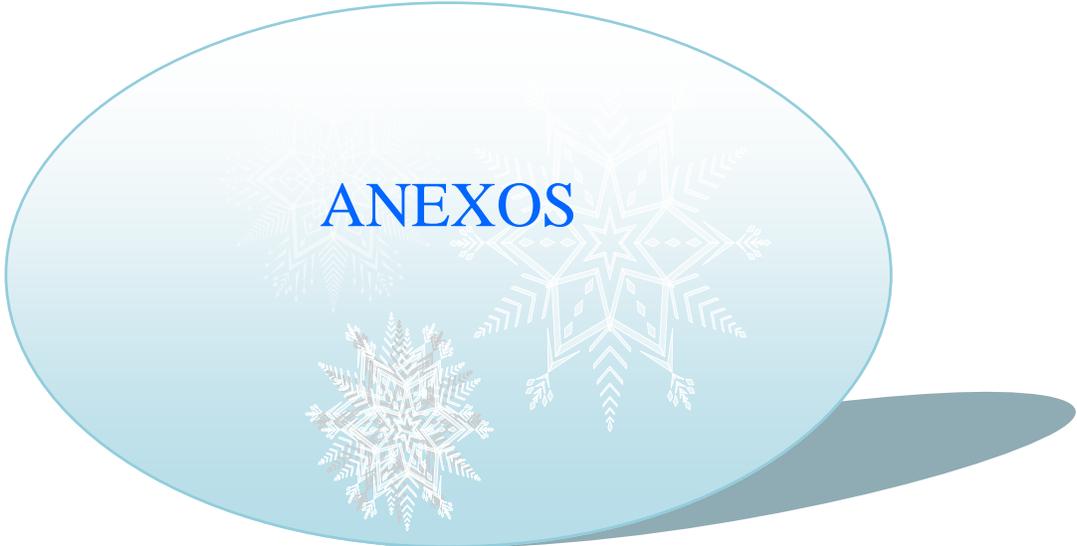
- En forma general, es evidente que las aguas del Cantón de Cutumay Camones no cumple con los requisitos sanitarios establecidos por la Norma Salvadoreña Obligatoria. Diario Oficial (NSO) 13,35.01:05 San Salvador 2 de febrero del 2006., para consumo humano, no obstante los Índices de Calidad del Agua (ICA), la reconocen como aguas aptas para consumo humano.

9. RECOMENDACIONES

- Dar seguimiento al estudio realizado en este proyecto de investigación, para poder determinar mediante los Índices de Calidad del Agua (ICA), todas las posibles fuentes de contaminación, con el objeto de prevenir todo tipo de daño ecológico.
- Realizar un estudio amplio del uso de pesticidas utilizados por los agricultores del sector, para determinar posibles focos de contaminación por el uso inadecuado.
- Fomentar la utilización de abonos orgánicos y otros productos biodegradables, con el propósito de garantizar un ambiente propio para el desarrollo humano.
- Después de determinar las causas de contaminación, sería apropiado educar a las personas que inciden en la contaminación de todas las fuentes en el sector.
- Por el alto índice poblacional que consume estas aguas y por la carga de Bacterias Coliformes Totales, Bacterias Coliformes Fecales y Echerichia coli presente en la matriz del agua, es recomendable que se determine la demanda de cloro del agua con el objeto de determinar la concentración de cloro a aplicar y garantizar que el agua sea clorada antes de su consumo o distribución.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Ingeniería Ambiental G. Henry Cáp. 10 Recursos hidráulicos. Pág.341-342,346-351. Cáp. 11 Abastecimiento de agua. Pág.389-394,415-416,431-432. Cáp. 14 Residuos sólidos Pág.567- 578, 596- 612.
- Clair N. Sawyer. Perry L. McCarty. Gene F. Parkin. Química para ingeniería ambiental “cuarta edición” Editorial McGraw-Hill. 2001.
- Guía didáctica III “El medio ambiente y la comunidad” 1º edición 1997 San Salvador, El Salvador.
- [www. El Salvador turismo.gob.sv/](http://www.ElSalvador.turismo.gob.sv/)
- W.A Hardenbergh, Ingeniería Sanitaria, Octava impresión, Cía. editorial Continental, S.A de C.V, México DF.
- Norma Salvadoreña Obligatoria. Diario Oficial (NSO) 13,35.01:05 San Salvador 2 de febrero del 2006.
- Bioestadística Aplicada Agronomía. Biología. Química. Editorial Trillas S. A. de C. V. 1980
Pedro Reyes Castañeda.



ANEXO N° 1

Para llevar a cabo la recolección de las muestras para los análisis fisicoquímicos y microbiológicos en los pozos, el tanque de captación y el grifo seleccionado, se utilizó un muestreador de volumen de 1 litro.

TABLA 6. 4 RECIPIENTES PARA MUESTREO Y PRESERVACIÓN DE MUESTRAS

Parámetros	Recipientes	Persevantes	Tiempo de almacenamiento recomendado/ obligado	Volumen mínimo de muestra (ml)
Cloro residual	Polietileno-vidrio	Analizar inmediatamente	0.5 horas / inmediato	500
Color verdadero	Polietileno-vidrio	Enfriar a 4°C	48 horas	500
Dureza	Polietileno-vidrio	2 ml Conc. HNO ₃ / L muestra, pH<2	6 meses	100
Hierro total	Polietileno-vidrio	2 ml Conc. HNO ₃ / L muestra, pH<2	6 meses	1,000
Manganeso	Polietileno(A)- Vidrio(A)	2 ml Conc. HNO ₃ / L muestra, pH<2	6 meses	1,000
Plaguicidas órgano clorados	Vidrio color ámbar	Enfriar a 4°C	Preferible extraer inmediatamente	2,500

(A) = Lavado con HNO₃ 1:1

ANEXO N° 2

REQUISITOS DE CALIDAD MICROBIOLÓGICA Y FÍSICOQUÍMICA DEL AGUA.

- Límites máximos permisibles para la calidad microbiológica conforme a la Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO).

Cuadro: A-2

Parámetro	Límite máximo permisible		
	Filtración por Membranas	Tubos Múltiples	Placa Vertida
Bacterias Coliformes Totales	0 UFC/100 ml	<1.1 NHP/100 ml	
Bacterias Coliformes Fecales	0 UFC/100 ml	<1.1 NHP/100 ml	
Conteo de bacterias heterótrofas y Aerobias Mezofilas	0 UFC/100 ml		100 UFC/ml
E.Coli	0 UFC/100 ml	<1.1 NHP/100 ml	

- Límites permisibles de características físicas y Organolépticos

Cuadro: A-3

Parámetro	Unidades	Límite máximo permisible
Color Verdadero	Pt-Co	15
Olor	-	No rechazable
pH	-	8.5
Sabor	-	No rechazable
Sólidos totales disueltos	Mg/l	1000
Turbidez	Unt	S
Temperatura	°C	No rechazable

- Límites permisibles para sustancias Químicas.

Cuadro: A-4

Parámetro	Límite máximo permisible mg/l
Aluminio	0.2
Antimonio	0.006
Cobre	1.3
Dureza total como (CaCO ₃)	500
Fluoruros	1.00
Hierro total	0.30
Manganeso	0.1
Plata	0.07
Sodio	200.00
Sulfatos	400.00
Zinc	5.00
Arsénico	0.01
Bario	0.70
Boro	0.30
Cadmio	0.003
Cianuros	0.05
Cromo ⁺⁶	0.05
Mercurio	0.001
Níquel	0.02
Nitrato	45.00
Nitrito	1.00
Molibdeno	0.07
Plomo	0.01
Selenio	0.01

ANEXO N° 3

MAPA DEL SECTOR DE CUTUMAY CAMONES, DONDE SE REALIZÓ EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.

