

UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**EVALUACIÓN DE LA APLICACIÓN DE UN PROTOTIPO DE REACTOR
PASIVO EN LA RECUPERACIÓN DE LAS AGUAS DEL RÍO SAN PEDRO
EN LA ZONA ALEDAÑA AL BARRIO LA VICTORIA.**

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el
título de Ingeniero en Medio Ambiente

Profesor Guía: Ing. Milene Díaz

Autor: Andrea Arias Naranjo

2008
RESUMEN

Las actividades intensificadas del hombre sobre el medio ambiente han provocado un deterioro sobre los recursos naturales, que de una u otra forma permiten la vida de los seres vivos. Una gran parte de la población humana en diferentes países no disponen de servicios básicos notándose sobretodo en zonas rurales o periféricas afectando su condición social, económica y ocasionando graves impactos en la salud. Esta situación promueve la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías de recuperación de los recursos entre ellas el tratamiento de aguas. El presente trabajo está dirigido a evaluar la aplicación de zeolitas sintetizadas para la reutilización de las aguas de los ríos, sistema que resulta más simple y al alcance de todos. Esta alternativa permite eliminar sólidos, turbidez, color, agentes patógenos entre otros compuestos inorgánicos que han sido valorados como contaminantes de las aguas del río San Pedro, alcanzando durante su operación experimental a escala de laboratorio una eficiencia mayor al 80% de remoción. El agua final tratada puede ser utilizada para consumo humano al cumplir con lo establecido en la NTE INEN 1108.

TABLA DE CONTENIDO

TEMA	PÁGINA
Resumen	1
Introducción	6
Planteamiento del Problema	11
Hipótesis	11
Objetivos	12
Alcance	13
1. Contaminación del agua	14
1.1 General	14
1.2 Fuentes de contaminación	15
1.2.1 Contaminación rural	15
1.2.2 Contaminación urbana	17
1.3 Efectos de la contaminación	18
1.3.1 Efectos en la disponibilidad de O ₂	18
1.3.2 Efectos de los sólidos disueltos y suspendidos	21
1.3.3 Efectos de los materiales tóxicos	21
1.3.4 Efectos en la nutrición vegetal	22
1.3.5 Efectos sobre la salud	23
1.3.6 Efectos sobre los cultivos	27
1.4 Principales agentes contaminantes del agua	28
1.4.1 Compuestos químicos orgánico sintéticos	28
1.4.2 Fertilizantes inorgánicos	30
1.4.3 Isótopos radioactivos	31
1.4.4 Metales	32
2. Agentes patógenos del agua	33
2.1 Procedencia de los agentes patógenos	34
2.2 Vías de los agentes patógenos	37
2.3 Persistencia de los agentes patógenos en las aguas	41
2.4 Enfermedades infecciosas	42

2.4.1 Enfermedades transmitidas por el agua	43
2.4.2 Enfermedades vinculadas por la falta de higiene	47
3. Situación de los servicios de agua potable y saneamiento en las Américas	48
3.1 Desigualdades en el acceso y uso de los servicios de agua potable en América Latina y el Caribe	52
3.2 Cobertura y calidad de los servicios en áreas urbanas y rurales	56
3.3 Control y vigilancia de la calidad del agua	57
3.4 Estado de los recursos hídricos	58
3.5 Estado actual de la tecnología	61
3.6 Breve reseña de la cobertura de los servicios básicos en el Ecuador	66
3.6.1 Cobertura de agua potable	66
3.6.2 Abastecimiento de agua	67
3.6.3 Desinfección y vigilancia de la calidad de agua	68
3.6.4 Desigualdades en los servicios	69
4. Desinfección del agua potable	70
4.1 Características deseables de los métodos de desinfección	71
4.2 Eficacia de los desinfectantes	72
4.3 Métodos de desinfección	74
4.3.1 Métodos comunes	74
4.3.1.1 Cloro	74
4.3.1.2 Por acción de la temperatura	75
4.3.2 Métodos especiales	75
4.3.2.1 Desinfección mediante luz	75
4.3.2.2 Desinfección por ozono	76
4.3.2.3 Desinfectantes químicos	77
4.3.2.3.1 Productos químicos oxidantes	77
4.3.2.3.2 Álcalis y ácidos	80
4.3.2.3.3 Productos químicos tensoactivos	80
4.3.2.3.4 Iones metálicos	81

4.4 Subproductos de la desinfección	81
4.4.1 Cloro y sus subproductos	86
4.4.1.1 Cloro	87
4.4.1.2 Trihalometanos	87
4.4.1.3 Ácidos acéticos halogenados	88
4.4.1.4 Acetonitrilos halogenados	88
4.4.1.5 Hidrato de cloral	88
4.4.1.6 Clorofenoles	89
4.4.2 Cloraminas y sus subproductos	89
4.4.3 Dióxido de cloro y sus subproductos	89
4.4.4 Ozono y sus subproductos	90
4.5 Control de subproductos de desinfección	91
4.6 Tecnologías de desinfección actualmente utilizadas en los países de América Latina y el Caribe	93
4.7 Costos de la desinfección de los sistemas de agua comunitarios	94
4.8 Causas de la falta de desinfección	94
5. Tamices moleculares	96
5.1 Tipos	97
5.2 Propiedades químicas	105
5.2.1 Reacciones de Oxido-Reducción y potenciales	105
5.2.2 Intercambio iónico	107
5.2.3 Adsorción	108
5.2.3.1 Isotermas de adsorción	111
5.2.4 Catálisis	112
5.3 Propiedades físicas	113
5.3.1 Porosidad	113
5.3.2 Permeabilidad	114
5.3.3 Granulometría y distribución del tamaño	115
5.3.4 Forma del grano y variación de la forma	115
6. Diseño de los programas de muestreo de caracterización del agua	117
6.1 Tipo de muestras	118
6.1.1 Muestras puntuales	118
6.1.2 Muestras periódicas	118
6.1.2.1 Tomadas a intervalos de tiempo fijo	118

6.1.2.2 Tomadas a intervalos de flujo fijos (dependiente del volumen)	118
6.1.2.3 Tomadas a intervalos de flujo fijos (dependientes del flujo)	118
6.1.3 Muestras combinadas	118
6.1.3.1 Tomadas a flujos fijos	118
6.1.3.2 Tomadas a flujos variables	119
6.1.4 Muestras en serie	119
6.1.4.1 Muestras para establecer perfiles en profundidad	119
6.1.4.2 Muestras para establecer perfiles en áreas	119
6.1.5 Muestras compuestas	119
6.2 Tipos de recipientes para muestras	119
6.2.1 Recipientes normales	119
6.2.2 Recipientes especiales	120
6.2.3 Recipientes para análisis microbiológico	120
6.3 Equipos de muestreo	120
6.3.1 Muestreadores	120
6.4 Manejo y conservación de muestras	120
6.4.1 Adición de preservantes	121
6.4.2 Refrigeración de muestras	121
6.4.3 Identificación y Registro	122
7. Materiales y Métodos	124
7.1 Materiales	124
7.2 Métodos de muestreo del agua cruda del río	124
7.3 Procedimientos	126
7.3.1 Preparación del filtro	126
7.3.2 Pruebas Experimentales	127
7.3.3 Resultados de las pruebas experimentales	130
7.4 Caracterización del material poroso	134
7.4.1 Isotherma de adsorción	134
7.4.2 Capacidad de intercambio catiónico	134
7.4.3 Porosidad	134
7.4.4 Permeabilidad	135
7.4.5 Granulometría	135
7.4.6 Forma del grano	135
7.5 Datos obtenidos de las encuestas	135
7.6 Diseño del sistema	140

7.6.1 Fórmulas	140
7.6.2 Cálculos	140
7.6.3 Costos del sistema	141
7.7 Análisis y discusión de resultados	142
Conclusiones	152
Recomendaciones	154
Bibliografía	155
Glosario	159
Anexos	161

INTRODUCCIÓN

La problemática del agua acrecienta numerosos problemas en muchos países, sobre todo los que están en vías de desarrollo. Desde hace años, solucionar estos problemas ha sido el objetivo de las principales organizaciones mundiales. Según datos recientes de la Organización Mundial de la Salud (OMS), 1,8 millones de personas fallecen cada año a causa de enfermedades diarreicas. Un 90% de ellas son niños menores de cinco años, procedentes principalmente de países en desarrollo. Buena parte de estas muertes son atribuibles a la falta de acceso a agua potable y a servicios de saneamiento. El informe publicado por la OMS y UNICEF en el presente año advierte que más de 2.600 millones de personas (más de un 40% de la población mundial) carecen de acceso a saneamiento básico, y más de 1.000 millones de personas todavía utilizan agua obtenida de fuentes insalubres. De acuerdo a un estudio realizado por la EPA se determinó que la cantidad de población que tenía disponibilidad de agua limpia en África correspondía al 46%, América Latina al 80%, Asia al 80% y en el Oeste de Asia el 88 % mientras que cerca

de un billón de personas no tienen acceso a agua limpia. Tener acceso a agua potable podría prevenir millones de casos de enfermedades cada año en todo el mundo. La mejora del abastecimiento de agua podría reducir entre un 6 y un 25% la morbilidad por diarrea, y la mejora del saneamiento podría disminuir la morbilidad por diarrea en un 32%. Las enfermedades relacionadas con el uso de agua contaminada incluyen aquellas causadas por microorganismos y sustancias químicas. Los brotes provocados por microbios en el agua potable afectan a cientos de miles de personas. No ha sido extraña la detección, tanto en comunidades grandes como pequeñas de países en vías de desarrollo, de brotes provocados por el consumo de agua potable contaminada.¹

En el país se han presentado estas situaciones en diferentes ciudades como el brote de hepatitis ocurrido en Guayaquil y otros casos por el consumo de agua contaminada en Riobamba y Tumbaco. Los recursos hídricos, tanto superficiales como subterráneas, se están volviendo cada vez más escasos como consecuencia mundial del incremento de la población y de la activa intervención del ser humano en el ambiente. En este proceso, los recursos hídricos han sido afectados cada vez más negativamente en su calidad, reservas disponibles y capacidad natural de autopurificación. El impacto más grande de la contaminación del agua sobre la salud pública se da a través del agua que se consume, cuya fuente puede ser degradada por contaminación puntual y no puntual incluyendo las aguas residuales municipales, la escorrentía pluvial, el agua de retorno del riego agrícola y los desperdicios de

¹ www.who.org

procesamiento de alimentos. Los desechos de origen humano y animal también contribuyen, con diversos agentes patógenos de transmisión hídrica, a contaminar las fuentes de agua. Debido a que son muchas las variables asociadas con la contaminación del agua, es conveniente aplicar una serie de tratamientos a las aguas. Es preciso mejorar la protección y el tratamiento del abastecimiento de agua para reducir el enorme riesgo real y de las enfermedades infecciosas transmitidas por el agua. Como consecuencia de la preocupación surgida últimamente por los subproductos de la desinfección (SPD) y sus efectos potenciales sobre la salud humana, algunos han cuestionado el uso de productos químicos para desinfectar el agua. La desinfección del agua desempeña una función fundamental en la prevención del contagio de enfermedades transmitidas por el agua. Los riesgos microbiológicos no deben ser incrementados por tratar de reducir los riesgos químicos potenciales que puedan estar asociados con los SPD. Debemos tener en cuenta la necesidad de equilibrar los riesgos químicos y los microbiológicos. La alta incidencia de enfermedades diarreicas, infecciones gastrointestinales y parasitosis vinculadas con la contaminación del agua y de los alimentos, condiciones deficientes de abastecimiento de agua y de servicios de saneamiento son un reflejo de las desigualdades sociales y económicas que aún persisten en la actualidad y que se evidencian claramente en nuestro país. Básicamente, las personas que más sufren estas enfermedades son las que

tienen menos recursos económicos, por lo que a menudo sólo están a su alcance las soluciones más baratas.²

Una vez que se ha determinado que un recurso hídrico puede satisfacer la máxima demanda diaria de abastecimiento de agua de una comunidad, la siguiente consideración es la calidad del agua y el grado de tratamiento que requiere. El nivel de los contaminantes químicos y de los agentes microbianos en el agua potable, el grado de riesgo para la salud que desean aceptar los usuarios de la comunidad y los reglamentos dictados por los gobiernos determinan los requisitos del tratamiento. Los brotes de origen hídrico se siguen produciendo, cada vez que las fuentes de agua son contaminadas y los sistemas de tratamiento están inadecuadamente diseñados u operados.

El agua para riego tiene que estar libre de contaminantes químicos y biológicos. Siendo esto un problema no resuelto en general en nuestro país, por cuanto no existe tratamiento de las aguas residuales, antes de que formen parte de los cursos de agua que después se utilizan para riego, atentando contra la seguridad de los alimentos en especial verduras que crecen a ras del suelo. La turbidez del agua de riego ocasiona daños en las plantas, debido a la insuficiente transparencia que afecta a la fotosíntesis y al recubrimiento de las superficies vegetales. Los impactos causados por la ingestión de alimentos que han sido alterados por agua contaminada son difíciles de determinar y dependen de la concentración y permanencia de los residuos. En el caso del

² OPS. La Calidad del Agua Potable en América Latina, 1996.

Ecuador, debido a una falta de notificación, carencia de investigación e intervenciones, no se puede determinar la verdadera magnitud del impacto en la salud humana de este problema que permita su control y prevención efectiva.³

La mayor parte de los ríos en el Ecuador se encuentran contaminados y en las zonas rurales del Ecuador no existe agua para consumo humano que cumpla las especificaciones de agua potable por lo que generalmente el agua de los ríos es utilizada para la realización de las diferentes actividades humanas, con alto riesgo. Estas aguas no han sido tratadas ya que para esto se requiere utilizar sistemas complejos como floculación o lodos activados, y construir sistemas de transporte desde las fuentes a los lugares de consumo. Ante esta problemática surge la necesidad de desarrollar nuevos métodos y tecnologías de remedio pasivo de aguas contaminadas con el fin de aumentar la calidad de agua llegando a ser un eficaz tratamiento alternativo a los métodos tradicionales de bombeo y plantas de tratamiento. El funcionamiento de reactores pasivos es simple, no requiere de electricidad o equipos complejos y puede ser instalado para tratar el agua que consume o utiliza en riego agrícola una comunidad pequeña y son utilizados actualmente con mucho éxito en los países desarrollados para descontaminar aguas subterráneas y ríos.

³ http://www.caders.gov.ec/docs/PLAN_AMBIENTAL_CADERS.pdf

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Dada la cantidad de sustancias presentes en las aguas que pueden representar un peligro para la salud humana, se plantea la interrogante de la potencial alteración o daño que estas sustancias contaminantes están generando en la población humana así como en los ecosistemas acuíferos, por tanto, surge la necesidad del estudio de minerales y todo lo que se relaciona a su interacción con el ambiente, en condiciones ideales previamente valoradas a

nivel experimental que permitan generar o desarrollar modelos o sistemas tipo filtro que logren disminuir o eliminar las sustancias contaminantes de los ambientes acuáticos, todo bajo la premisa de la preservación de los recursos hídricos, los cuales son sumamente imprescindibles para la vida. En el Ecuador gran parte de la población no tienen acceso a los servicios básicos al no disponer de los recursos necesarios, ya sean éstos técnicos o económicos, en respuesta a ello surge la necesidad de proponer un sistema efectivo para el tratamiento de las aguas del Río San Pedro, que implique una baja inversión económica y que pueda ser fácilmente instalada y operada por la población misma evitando procedimientos complejos.

HIPÓTESIS

Basándose en cuanto al diseño del sistema que tiene la capacidad suficiente para satisfacer la demanda de agua por día para una vivienda de cinco personas es factible la aplicación del reactor pasivo para recuperar las aguas del Río San Pedro ubicada en las coordenadas (X_UTM: 780234 y Y_UTM:9959780).

OBJETIVOS

Objetivo General

- Evaluar la aplicación de un prototipo de reactor pasivo en la recuperación de las aguas del Río San Pedro en la zona aledaña al Barrio La Victoria.

Objetivos específicos

- 1) Determinar la calidad del agua del río San Pedro en el punto de muestreo determinado (X_UTM: 780234 y Y_UTM: 9959780).
- 2) Preparar, caracterizar y evaluar el material seleccionado (zeolita) para la preparación de un reactor pasivo.
- 3) Proponer un método basado en la filtración para la recuperación de cuerpos de agua, que no representen un peligro para el medio ambiente y la salud humana en comparación con los métodos tradicionalmente utilizados.
- 4) Realizar pruebas de laboratorio para evaluar la eficiencia de la composición de un prototipo de reactor pasivo con materiales disponibles en el mercado ecuatoriano.
- 5) Evaluar la viabilidad de la aplicación del prototipo de reactor pasivo propuesto para la eliminación de contaminantes del agua del río San Pedro.
- 6) Comparar condiciones del agua tratada en referencia a las Normas Nacionales de calidad de agua y definir su uso final.
- 7) Definir la gestión y disposición final del filtro así como, de sus posibles aplicaciones posteriores.

ALCANCE

En este trabajo se pretende realizar a escala de laboratorio, la construcción de un reactor pasivo y la evaluación de la eliminación de contaminantes en procesos dinámicos mediante el reactor. De forma complementaria se diseñará el tratamiento de las aguas del Río estudiado utilizando el proceso propuesto.

1. Contaminación del Agua

1.1 General

La contaminación es un producto inevitable de la mayoría de las actividades del hombre, ya sea urbana o rural. El tipo de contaminación producida varía con el

tipo de actividad, mientras que su importancia depende en ambos del tipo y cantidad de contaminantes y también de los usos intencionales de la porción del ambiente al cual entran. Por lo tanto, la contaminación puede ser al mismo tiempo un producto del uso de la tierra y un importante factor en la determinación del uso para el cual el ambiente receptor es adecuado.

El control de la contaminación es por lo tanto, dirigido a la reducción de los impactos de varias actividades en el medio ambiente a través de la limitación de la cantidad de contaminantes los cuales deben ser descargados, a un nivel compatible con todos los usos intencionados. Las principales formas de control están enfocadas a la contaminación del aire, agua y suelo. El objeto de este estudio es la contaminación del agua, se debe tomar en cuenta que tanto el aire como el suelo pueden contribuir significativamente al problema. Los contaminantes del aire pueden entrar directamente a las aguas superficiales por la caída de partículas, por la dilución de gases o indirectamente ser incorporados por precipitación. De forma similar, los materiales depositados en el suelo pueden ser arrastrados a las aguas por las lluvias.

La contaminación del agua puede ser considerada como la alteración de la calidad del cuerpo receptor de agua. También se puede referir más generalmente a cualquier cambio inherente en las características físicas, químicas y biológicas del río causado por la entrada de materiales al agua.

Los objetivos generales del control de la contaminación son proteger la salud de la comunidad y para prevenir la afectación a la vida de animales y plantas que habitan en el agua.

1.2 Fuentes de contaminación

El uso del agua y su contaminación están íntimamente relacionados en todos los aspectos con el uso del suelo y de su entorno.

De las cuales se podría mencionar que existen fuentes de contaminación de agua a nivel rural y a nivel urbano que a continuación serán descritas correspondientemente:

1.2.1 Contaminación Rural

Las principales formas de contaminación en áreas rurales provienen de fuentes no puntuales como las descritas a continuación:

Descomposición de la vegetación: Los detritos vegetales arrastrados a las aguas superficiales, se acumulan en el fondo de las masas de agua consumiendo oxígeno y generando una pérdida de la biodiversidad de la vida acuática. Los detritos vegetales presentan una baja biodegradación en los lechos de agua.

Sedimentos: Son el mayor componente del arrastre superficial a los ríos como consecuencia de la erosión natural o tecnógena debido a la construcción de caminos y carreteras, actividades mineras y la agricultura. La falta de controles

adecuados sobre dichas actividades produce la acumulación de sedimentos en los lechos de los ríos, reduciendo la capacidad de los lechos e incrementando el peligro de inundaciones. En el largo plazo, los sedimentos pueden reducir la capacidad de almacenamiento de los reservorios de agua. ⁴

Contaminación agrícola: Las actividades agrícolas son una importante fuente de contaminación de aguas tanto superficiales como subterráneas. Debido a la variedad de cultivos y técnicas empleadas en la agricultura, el espectro de contaminantes hídricos son diversos, entre los cuales se puede mencionar:

- Residuos de animales (estiércol) con elevadas concentraciones de materia orgánica y de especies inorgánicas reactivas como por ejemplo el amoniaco.
- Productos químicos para la protección de cultivos que poseen compuestos orgánicos sintéticos dichos productos pueden clasificarse como pesticidas, herbicidas, insecticidas y fungicidas.

Irrigación: Las prácticas agrícolas de irrigación pueden ocasionar el arrastre de residuos de los productos que son aplicados a los cultivos los cuales contienen altas cantidades de contaminantes como el alaclor, altrazina, endrín, lindano, etc).⁵

⁴ BARNES, D. Water and Wastewater Engineering Systems, Gran Bretaña, Editorial Pitman Books Limited, 1981.

⁵ BLACK, E, Peter. Watershed Hydrology, Editorial Ann Arbor Press, Michigan, 1996.

1.2.2 Contaminación urbana

Aguas residuales domésticas: La composición de las aguas residuales es del 99.9 % de agua mientras que el 0,1 % restante son varios tipos de sólidos disueltos o suspendidos. La materia suspendida incluye materia orgánica fecal, desechos de comida, detergentes y microorganismos entéricos causantes de muchas enfermedades humanas. Los materiales disueltos incluyen nutrientes para las plantas y microorganismos (tales como nitrógeno y fósforo) que producen la eutroficación de las aguas y la proliferación de algas.

Aguas residuales industriales: Las industrias emiten grandes cantidades de aguas residuales derivadas de los procesos industriales que utilizan el agua para diferentes propósitos. Ésta agua es usualmente alterada conteniendo así contaminantes que degradan la calidad del agua como nutrientes, sólidos, bacterias y en ciertos casos sustancias tóxicas. La diversidad de los procesos utilizados en la industria hace que sea imposible una caracterización general de las descargas industriales. Es así que la carga de contaminantes variará de acuerdo al tipo de industria y a la cantidad de agua que utiliza.

Residuos sólidos urbanos: Son elementos derivados por las actividades de un centro urbano. A su vez, se pueden clasificar en residuos domésticos (residuos de jardines, calles, alimentos, papel, plástico, detergentes, material fecal animal); residuos industriales (químicos, pinturas, aceites, materiales de

construcción); residuos municipales (residuos de mantenimiento de parques, jardines y residuos de centros de faenamiento de animales).

Otra fuente de contaminación urbana son las aguas que se filtran a través de basura en descomposición conduciendo a una alta concentración de materia orgánica putrefacta, nutrientes y materiales tóxicos disueltos como Cadmio, Hierro, Niquel, Cobre, Zinc, Mercurio, Plomo, Estaño, Berilio, Magnesio además de residuos de hidrocarburos entre otros que generan una considerable contaminación.⁶

1.3 Efectos de la contaminación

Los efectos de los diferentes contaminantes mencionados anteriormente pueden ser medidos en términos referentes a cambios en las características físicas, químicas y biológicas del agua.⁷

1.3.1 Efectos en la disponibilidad de O₂

La importancia ambiental del OD (oxígeno disuelto) radica en que en los desechos líquidos el oxígeno disuelto es un parámetro que determina si los cambios biológicos se llevan a cabo por procesos aeróbicos o anaeróbicos. La materia orgánica que proviene de aguas residuales y aguas de desechos domésticos, es usada por microorganismos rápidamente con el fin de obtener energía para construir nuevas células y sostener las actividades vitales.

⁶ CORBITT, A, Robert. Standard Handbook of Environmental Engineering, Editorial McGraw-Hill, New York, 1990.

⁷ BARNES, D. Water and Wastewater Engineering Systems, Gran Bretaña, Editorial Pitman Books Limited, 1981.

La asimilación de nutrientes por parte de los microorganismos puede expresarse mediante la siguiente ecuación:



Como puede verse el oxígeno disuelto presente es básico para sostener la vida de los microorganismos acuáticos. Un déficit muy alto indicará una alta actividad bacteriana anaeróbica, lo que a su vez es señal de contaminación con sustancias orgánicas.⁸

Los principales agentes que influyen sobre el OD en las aguas superficiales son:

- a) Materiales orgánicos los cuales provocan el agotamiento del oxígeno y por ello se asocia la demanda de oxígeno a la biodegradación.
- b) Agentes reductores, los cuales reducen la disponibilidad de oxígeno ya que son oxidados químicamente en el cuerpo receptor.
- c) Aceites y grasas, los cuales forman películas superficiales inhibiendo la transferencia de oxígeno desde la atmósfera al agua.
- d) Surfactantes y otros materiales, los cuales también pueden afectar la transferencia de oxígeno en el agua o alterar la saturación de la concentración de OD.
- e) Grandes cantidades de agua caliente, las cuales incrementan la temperatura del cuerpo receptor reduciendo los recursos de oxígeno

⁸ <http://www.cti.espol.edu.ec>

disponibles y al mismo tiempo incrementando la tasa de la demanda de oxígeno por un aumento de la actividad biológica.

De éstos factores, el más significativo es la biodegradación de la materia orgánica, un hecho que produce un incremento del DBO.

Para satisfacer la demanda utilizada durante los procesos de biodegradación de la materia orgánica, el oxígeno debe estar presente en cantidades suficientes para prevenir que los niveles de OD disminuyan hasta un punto en el cual el agua no pueda soportar el rango normal de la vida acuática. En la saturación (o equilibrio) el oxígeno está presente en proporción a la presión parcial de oxígeno en la atmósfera sobre el agua superficial bajo temperaturas normales, de 8 a 10 mg/l. En aguas superficiales el nivel normal de OD usualmente es menor que el de saturación ya que la materia orgánica se biodegrada aún en ríos relativamente no contaminados. En tales casos, siempre hay un déficit de saturación de oxígeno (que es una diferencia entre la concentración de saturación y la concentración normal) y esto produce que más oxígeno pase a la solución para restaurar el equilibrio entre el OD del agua y el nivel de oxígeno en la atmósfera.

Hay otros factores que afectan el OD en las aguas superficiales como son:

La oxidación de amonio - nitrificación – que puede resultar en grandes demandas de oxígeno en los ríos que reciben efluentes secundarios

especialmente cuando son parcialmente nitrificados en plantas de tratamiento y por lo tanto, poseen un alto número de organismos nitrificantes.

La biofloculación y la sedimentación de sólidos en flujos normales y el proceso inverso de resuspensión también provoca que disminuyan la cantidad de oxígeno disponible.

La fotosíntesis de las plantas acuáticas y algas durante las horas del día y su consumo durante la noche. Las plantas consumen oxígeno en la respiración dando como resultado que los niveles de OD caigan a valores bajos.

La salinidad también es importante en los estuarios y en los océanos porque la saturación de OD es reducida por la alta concentración de sales disueltas.

1.3.2 Efectos de los sólidos disueltos y suspendidos

El mayor problema causado por los sólidos en suspensión y dilución son su desagradable apariencia. La materia flotante es aún más desagradable cuando es de origen residual porque da al agua una turbidez que restringe el paso de la luz, que a su vez, puede reducir la variedad de plantas acuáticas que depende de la luz, así como también reduce la población de todos organismos vivos que viven en el agua. La sedimentación de sólidos suspendidos forma bancos de sedimentos en los ríos, sofocan a los organismos del fondo (especialmente si los sólidos son inertes) o cambiando el nivel de OD en las capas profundas del agua, especialmente si son orgánicos y se biodegradan. Los sólidos disueltos en altas concentraciones reducen la solubilidad de

oxígeno en el agua. En concentraciones mucho menores, éstos pueden afectar los usos del agua para consumo humano y la provisión de agua para irrigación.

1.3.3 Efectos de los materiales tóxicos

Muchos productos de las aguas residuales provenientes de actividades industriales son tóxicos para la vida acuática. Los metales pesados, varios compuestos orgánicos sintéticos y ciertos materiales como pesticidas están implicados en la muerte de peces en los cuerpos receptores de efluentes residuales. De igual manera, la toxicidad puede ocasionar efectos de corto plazo (agudos) o efectos acumulativos a largo plazo (crónicos). Algunos organismos son capaces de adaptarse usando algunas toxinas orgánicas (tales como cianuro) como fuentes de alimento dándoles la oportunidad de climatizarse a esas toxinas por incrementos lentos en la tasa dosimétrica.

Los efectos de los agentes tóxicos se amplifican si los organismos acuáticos son sometidos a condiciones ambientales adversas. Donde más de una sustancia tóxica está presente el efecto combinado puede ser en algunos casos más grave que la suma de los efectos de las toxinas individuales. Este fenómeno es conocido como sinergismo.

1.3.4 Efectos en la nutrición vegetal

Materiales tales como el nitrógeno normalmente está presente en las aguas residuales municipales y en los efluentes tratados en concentraciones entre 20 y 50 mg/l. El fósforo está presente en cantidades equivalentes de 4 a 15 mg/l.

Estos elementos son los responsables del masivo crecimiento de plantas acuáticas y algas. La proliferación de algas microscópicas provoca una coloración y turbidez característica del agua; las plantas acuáticas crecen abundantemente hasta sofocar completamente los canales de agua. La reproducción masiva tiende a ser temporal y cíclica. Un período de crecimiento muy rápido, es seguido por la muerte y descomposición de las plantas. La demanda de oxígeno utilizada para la descomposición de los materiales de las plantas excede los recursos de oxígeno los cuerpos de agua, generando condiciones anaeróbicas que producen malos olores, desarrollando la eutroficación de las aguas.

La eutroficación es más probable de ocurrir, en lagos, reservorios, ríos, arroyos y estuarios donde los nutrientes tienden a acumularse (nitrógeno y fósforo). En arroyos de flujo rápido y estuarios con características de buen desagüe el problema es menos marcado.

La eutroficación en embalses también puede ocurrir en menor grado, el crecimiento de algas microscópicas puede afectar seriamente la calidad del agua para propósitos domésticos a menudo por un olor y sabor desagradables.

También los arroyos que reciben efluentes residuales a menudo presentan el crecimiento de bacterias filamentosas en el fondo del arroyo.

1.3.5 Efectos sobre la salud

Aparte de los aspectos toxicológicos y microbiológicos de la contaminación del agua, la presencia de microorganismos en los cuerpos receptores que suelen ser usados para consumo (como una fuente de abastecimiento de agua doméstica) o para propósitos recreacionales y paisajísticos representan un peligro para la salud.⁹ Por ejemplo, las altas concentraciones de nitratos y nitritos en el agua pueden causar metomoglobinemia. Esta enfermedad, se produce por la alteración del estado de oxidación del Hierro, que pierde su capacidad de transportar oxígeno. De acuerdo a sus concentraciones, del 10-25% produce cianosis, 35-40% dificultades respiratorias y dolor de cabeza, el 60% letargo y estupor y más del 70% ocasiona la muerte.¹⁰

En cuanto a contaminación microbiológica generalmente, se trata de organismos patógenos sobretodo bacterias y virus aunque el mayor número de organismos que normalmente se presenta pertenecen al grupo de las bacterias coliformes. Debido a su gran número, son generalmente las más usadas como indicadores de contaminación biológica.¹¹

Las enfermedades infecciosas causadas por bacterias, virus y parásitos patógenos representan un problema de salud pública, cuya importancia está determinada por la virulencia de las enfermedades relacionadas y la magnitud de la infección, además del grado de exposición de la población. Una mala

⁹ BARNES, D. Water and Wastewater Engineering Systems, Gran Bretaña, Editorial Pitman Books Limited, 1981.

¹⁰ KIELY, G. Ingeniería Ambiental Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión, Madrid, Editorial McGraw-Hill, 2003.

¹¹ BARNES, D. Water and Wastewater Engineering Systems, Gran Bretaña, Editorial Pitman Books Limited, 1981.

gestión del suministro de agua, puede conducir a una contaminación a gran escala y potencialmente a brotes de enfermedades gastrointestinales.¹²

Entre las enfermedades gastrointestinales más severas para la salud humana a nivel mundial, que son las principales causas de mortalidad y morbilidad de los niños más pequeños, se pueden mencionar: la disentería, gastroenteritis, diarrea, cólera, hepatitis A, *Giardia*, fiebre tifoidea. Mientras, que en los adultos el cáncer de vejiga y del recto son las más frecuentes asociadas al consumo prolongado de agua contaminada con heces o vómitos de individuos enfermos.¹³

El abastecimiento de agua potable deficiente y poco segura representa un permanente problema de salud pública para la mayor parte de la población mundial. Casi la mitad de la población de los países en desarrollo padece problemas de salud vinculados con la insuficiencia o contaminación del agua.

Los problemas de salud también son atribuidos a la falta o insuficiencia de desinfección del agua que se suministra. Los estudios epidemiológicos han señalado que el abastecimiento de agua potable es uno de los vínculos más importantes en la transmisión del cólera en América Latina. En América Latina la desinfección inadecuada del agua o el abandono de la desinfección, han sido

¹² www.who.org

¹³ LISTORTI, A, James. Environmental Health components for Water Supply, Sanitation and Urban Projects, 1941.

factores fundamentales en la propagación de muchas enfermedades transmitidas por el agua. ¹⁴

El uso masivo de cloro para la desinfección, en vez de contribuir a la solución del problema, ha ayudado a agudizarlo, debido a los subproductos generados de la cloración (cloraminas, trihalometanos, etc). La ineficiente y poco confiable técnica de desinfección, empobrece la calidad microbiológica de las aguas que afectan a la salud pública.

En el Ecuador las enfermedades infecciosas intestinales son la segunda causa de mortalidad de los niños de 1 a 4 años correspondiendo al 11.2 %, mientras que la diarrea y gastroenteritis de presunto origen infeccioso es la cuarta causa de morbilidad infantil (10,4%). En el 2005, las tasas notificadas por casos de salmonelosis fue de 65,16 por 100000 habitantes, por fiebre tifoidea se notificaron 6381 casos lo que corresponde a una tasa nacional de 48,3 y se registraron 143 casos de *teniasis* equivalente a una tasa de 1,08. Es importante considerar que existe un alto subregistro de este tipo de patologías en todo el país, lo que resalta la extrema importancia que tienen los servicios de salud, en la reducción de éste tipo de enfermedades que son más asentadas en el sector rural. ¹⁵

¹⁴ OPS. La Calidad del Agua Potable en América Latina, 1996.

¹⁵ Ministerio de Salud Pública. Situación de Salud, Quito, 2006.

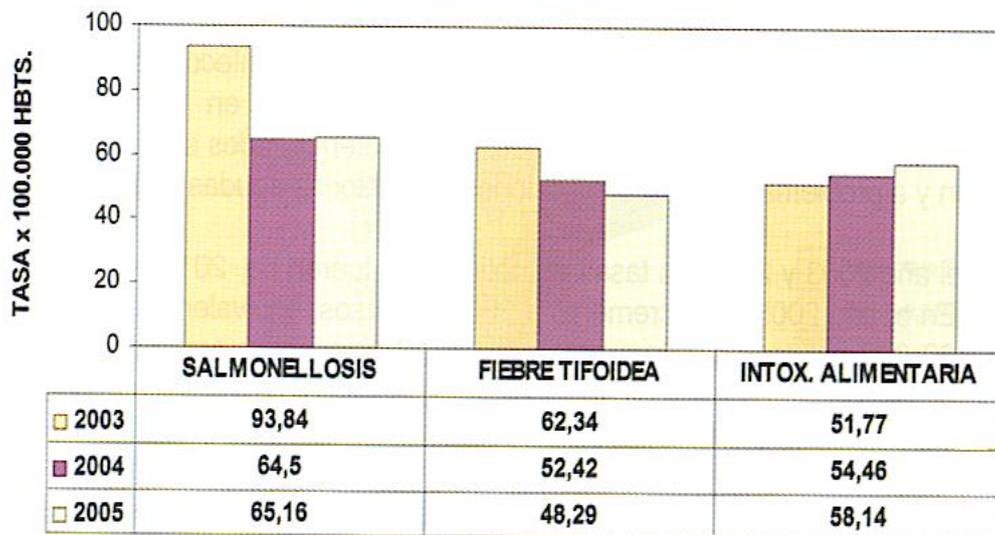


Figura 1.1. Tasas de enfermedades transmitidas por agua y alimentos contaminados. (Ecuador 2005).

Fuente: Ministerio de Salud Pública-Vigilancia Epidemiológica.

Por otro lado, los registros hospitalarios muestran como cuarta causa de ingreso hospitalario las enfermedades diarreicas y gastroentéricas de origen infeccioso correspondiente al 3.3 %.¹⁶

Posteriormente se dedicará un capítulo completo enfocado más detalladamente a los agentes patógenos transmitidos por el agua así como las enfermedades infecciosas derivadas de este problema.

1.3.6 Efectos sobre los cultivos

El exceso de sales, es una de las mayores preocupaciones en la reutilización del agua para fines agrícolas ya que supone un aporte de sales adicional al suelo, afectando la productividad de los cultivos, degradando la estructura del suelo y generando problemas de contaminación en las aguas subterráneas.

¹⁶ OPS. Situación de Salud Ecuador, 2006.

No obstante, en algunas zonas afectadas por la disminución de los recursos hídricos, es práctica común utilizarlas como aguas de riego.¹⁷

La permeabilidad y la infiltración de los suelos pueden verse afectadas por su composición química y su distribución en las partículas del suelo o la disposición de las partículas del suelo. Si el suelo tiene altas cantidades de Na^+ y la conductividad eléctrica es baja, la permeabilidad, la conductividad hidráulica y la tasa de infiltración son reducidas, debido a la dispersión de las partículas. Las tasas de infiltración del suelo son inicialmente altas, si el suelo está seco para luego disminuir hasta un punto estable. Esta expansión causa que los poros del suelo se vuelvan más pequeños reduciéndose el número de macroporos a través de los cuales el agua puede fluir ocasionando un taponamiento de los poros. La conductividad eléctrica y la permeabilidad disminuyen mientras que el porcentaje de sodio intercambiable aumenta y la concentración de sales disminuye. Si el agua de riego contiene altos niveles de sales solubles de Na, B y otros elementos, puede provocar serios efectos sobre el crecimiento de cultivos y sobre los animales.¹⁸

1.4 Principales agentes contaminantes del agua

1.4.1 Compuestos químicos orgánicos sintéticos

Los compuestos orgánicos son sustancias formadas por grandes moléculas de carbono. Muchos compuestos orgánicos son unidades estructurales de los

¹⁷ <http://www.lenntech.com/espanol/FAQ-contaminacion-agua.htm>

¹⁸ SPARKS, L, Donald. Environmental Soil Chemistry, San Diego, Editorial Academic Press, 1995.

organismos vivos. Estas moléculas están formadas por carbono e hidrógeno; son apolares, no son solubles en agua o son poco solubles teniendo de poca a ninguna carga eléctrica. Su comportamiento depende de su estructura molecular, tamaño, forma y de la presencia de grupos funcionales que son responsables de su toxicidad. Es importante conocer la estructura de los compuestos orgánicos, con el objeto de predecir su destino en los organismos vivos y en el medio ambiente sobretodo por ser considerados altamente peligrosos para la salud.

Existen muchos tipos diferentes de contaminantes orgánicos, algunos de los cuales se puede mencionar a continuación:

Los hidrocarburos, son compuestos orgánicos conformados por Carbono e Hidrógeno y unidos mediante enlaces covalentes. Se los clasifica en tres grupos de acuerdo a su estructura molecular.

- 1) Alifáticos o alicíclicos: Los átomos de carbono están dispuestos en cadena y sin ramificaciones como el propano, alcanos, alquinos y alquenos.
- 2) Aromáticos: Contienen seis anillos de carbono en sus moléculas y cada átomo de carbono está unido a un Hidrógeno o Carbono como por ejemplo el benceno y el tolueno.

3) Alicíclicos: Contienen una estructura de anillo con seis átomos de Carbono como por ejemplo el ciclohexano.¹⁹

Los policlorobifenilos (PCB's), son fluidos estables, insolubles en agua y no reactivos, son utilizados como fluidos hidráulicos, fluidos refrigerantes o de aislamiento en transformadores y plastificadores de pinturas.²⁰

Los detergentes, son compuestos cuya disolución actúa como agente limpiador de la suciedad y de sustancias en superficies contaminadas. Sus constituyentes suelen denominarse agentes de superficie activa o surfactantes, pues actúan sobre una superficie. Una propiedad común de los detergentes es que están formados de moléculas relativamente grandes (de una masa molecular superior a 200 gr.). Una parte de la molécula es soluble en materiales orgánicos y la otra en agua.²¹

Los pesticidas, tales como herbicidas, fungicidas, insecticidas son usados para controlar malezas, insectos y hongos. Los pesticidas fueron por primera vez usados en la producción agrícola en la segunda mitad del siglo diecinueve con gran éxito para el control de insectos y enfermedades de cultivos. Su uso masivo y su aparición en suelos, aguas y alimentos ha generado una generalizada preocupación social, por sus efectos negativos en la salud humana y animal.

¹⁹ KIELY, Gerard. Ingeniería Ambiental Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión, Editorial McGraw-Hill, Madrid, 1999.

²⁰ <http://www.lenntech.com/espanol/FAQ-contaminacion-agua.htm>

²¹ MICROSOFT CORPORATION. Enciclopedia Encarta, 2006.

1.4.2 Fertilizantes inorgánicos

Los elementos de mayor preocupación en las aguas superficiales y subterráneas son los fosfatos y nitratos. La contaminación de las aguas superficiales por fosfatos puede resultar del uso intensivo de fertilizantes fosforados así como por la aplicación de residuos orgánicos industriales y agrícolas. Los fosfatos pueden contaminar los ríos y lagos ya que la lluvia puede arrastrar el suelo hacia las aguas. Tal contaminación puede ocasionar eutroficación y la muerte de la vida acuática. Mientras que la fuente de los nitratos son los fertilizantes inorgánicos, descargas residuales, estiércol de corrales y tanques sépticos. Los nitratos son débilmente retenidos por los suelos siendo un problema mayor en aquellas áreas que tienen suelos arenosos llegando fácilmente a las aguas superficiales por el arrastre de residuos agrícolas o por la nitrificación biológica en los ríos.²²

Algunos contaminantes inorgánicos no son particularmente tóxicos, pero aún así son un peligro para el medio ambiente porque son usados extensivamente.

1.4.3 Isótopos radioactivos

Un 87% de la dosis de radiación que recibimos proviene de fuentes naturales mientras que el resto de la radiación proviene de las actividades humanas. La inspección de soldaduras, la detección de grietas en metal forjado o fundido, el alumbrado de emergencia, la datación de antigüedades y la preservación de alimentos son algunas de las numerosas aplicaciones de estos isótopos.

²² SPARKS, L, Donald. Environmental Soil Chemistry, San Diego, Editorial Academic Press, 1995.

Algunas de las formas en las que llega la radioactividad a los cuerpos hídricos como los océanos, son a través de pruebas con armas nucleares, residuos de centrales de energía nuclear y plantas de reprocesado de combustible. Pueden afectar a las redes tróficas y a los peces así como a la población humana mediante el consumo de productos de mar o por medio de los sedimentos radioactivos depositados en las playas. La vida media y las formas de descomposición de los isótopos radiactivos determinan su peligrosidad para los humanos pudiendo ser cancerígenos, mutagénicos y teratogénicos. Entre algunos de los radioisótopos que existen se podrían mencionar: Uranio (^{235}U y ^{238}U), Torio (^{234}Th y ^{232}Th), Radio (^{226}Ra y ^{228}Ra), Radón (^{222}Rn), etc.

1.4.4 Metales

Se los pueden encontrar en aguas superficiales en sus formas iónicas estables. Los metales artificiales como por ejemplo el Plutonio (^{239}Pu y ^{241}Pu), Curio (^{242}Cm y ^{244}Cm), Cesio (^{134}Cs , ^{135}Cs y ^{137}Cs), Rutenio (^{106}Ru) pueden ser muy peligrosos, porque a menudo provienen de reacciones nucleares provocadas por el hombre y pueden ser fuertemente radiactivos. Los metales pesados, pueden unirse a macromoléculas de interés biológico como proteínas y ADN, generando su denaturación, cáncer, efectos teratogénicos, problemas de bioacumulación y persistencia ambiental.²³

²³ <http://www.lenntech.com/espanol/FAQ-contaminacion-agua.htm>

De igual manera, estos elementos se encuentran en materiales naturales de la litósfera, en una cantidad menor del 1%, si sus concentraciones son suficientemente altas, pueden ser tóxicos para los organismos vivientes. Los metales se consideran pesados si poseen densidades mayores a 5.0 g/cm³. Algunos ejemplos de estos elementos son: Arsénico, Cadmio, Cromo, Cobre, Plomo, Mercurio y Níquel.

Sus principales fuentes son: rocas, fertilizantes comerciales, materiales limosos, lodos residuales, aguas de irrigación, residuos de la combustión de carbón, industrias fundidoras de metal, emisiones de autos y otros.²⁴

2. Agentes patógenos del agua

Se han encontrado numerosos agentes patógenos en las aguas sometidas a tratamiento para abastecimiento público. La gravedad y naturaleza de la presencia de agentes patógenos en aguas residuales y las consecuencias de las deficiencias del tratamiento de abastecimiento de agua pueden apreciarse a continuación:

Tabla 2.1: Principales agentes infecciosos encontrados en agua potable contaminada en el mundo.

Bacterias	Virus	Protozoarios	Helmintos
Campylobacter jejuni	Adenovirus (31 tipos)	Balantidium coli	Ancylostoma duodenale

²⁴ SPARKS, L, Donald. Environmental Soil Chemistry, San Diego, Editorial Academic Press, 1995.

Escherichia coli enteropatógenas	Enterovirus (71 tipos)	Entamoeba histolytica	Ascaris lumbricoides
Salmonella (1700 especies)	Hepatitis A	Giardia lamblia	Echinococcus granulosus
Shigella (4 especies)	Agente Norwalk	Cryptosporidium	Necator americanus
Vibrio cholera	Reovirus		Fasciolopsis buski
Yersinia enterocolítica	Virus Cocksackie		Strongyloides stercoralis
	Rotavirus		Taenia solium Trichuris trichiura

Fuente: OMS. La Calidad del Agua Potable en América Latina, 1996.

Todos estos microorganismos pueden clasificarse en cuatro grandes grupos: bacterias, virus, protozoos y helmintos (tabla 2.1) que constituyen un riesgo potencial para los operadores de las plantas de tratamiento de aguas residuales, para los peones agrícolas que trabajan en irrigación agrícola o para las familias campesinas que usan los pozos para recoger escorrentía superficial para uso doméstico.²⁵

En la tabla 2.2 se puede observar que la mayor cantidad de agentes patógenos expelidos por los seres humanos corresponde al grupo de las bacterias al igual que la respectiva dosis infectante que provoca síntomas clínicos en la mitad de los individuos examinados.

Tabla 2.2: Vías de acceso de agentes patógenos procedentes de heces transportadas por aguas residuales que contaminan el agua potable.

Agentes patógenos	Cantidad excretada por individuos infectados/g/heces	Máxima supervivencia en el agua (en días)	Dosis infectante
-------------------	--	---	------------------

²⁵ OPS. La Calidad del Agua Potable en América Latina, 1996. Pág. 27.

Bacterias			
E. coli toxigena	10 ⁶	90	10 ² – 10 ⁹
Salmonella	10 ⁶	60-90	10 ⁶⁻⁷
Shigella	10 ⁶	30	10 ²
Campylobacter	10 ⁷	7	10 ⁶
Vibrio cholerae	10 ⁶	30	10 ⁸
Yersinia enterocolitica	10 ⁵	90	10 ⁹
Aeromonas	–	90	10 ⁸
Leptospira	–	–	3
Virus			
Enterovirus	10 ⁷	90	1-72
Hepatitis A	10 ⁶	5-27	1-10
Rotavirus	10 ⁶	5-27	1-10
Norwalk	–	5-27	–
Protozoarios			
Entamoeba	10 ⁷	25	10-100
Giardia	10 ⁵	25	1-10
Cryptosporidium	10 ²	–	1-30
Balantidium coli	–	20	25-100
Helmintos			
Echinococcus	–	–	–
Ascaris	10 ⁻³	365	2-5
Taenia	10 ³	270	1

Fuente: OMS. La Calidad del Agua Potable en América Latina, 1996.

2.1 Procedencia de los agentes patógenos

La principal fuente de agentes patógenos en aguas residuales son los desechos fecales de los animales de sangre caliente (seres humanos, animales domésticos, ganado y fauna silvestre) que llegan al agua y el suelo, directa e indirectamente por infiltración de los rellenos sanitarios, efluentes de aguas residuales mal procesadas, funcionamiento de tanques sépticos, y por descargas directas a lechos de agua de dichos residuos de corrales y servicios higiénicos.

La tabla mostrada a continuación indica que los seres humanos y la fauna silvestre son los mayores excretores de *Vibrio cholera* eltor y de *Leptospira*

correspondientemente. Por otro lado, los cerdos, perros, gatos y ganado vacuno son los que excretan los mayores porcentajes de *Cryptosporidium*.²⁶

Tabla 2.3: Porcentaje de animales de sangre caliente que excretan agentes patógenos.

Agentes patógenos	Excretadores (%)						
	Seres humanos	Ganado vacuno	Ovejas	Cerdos	Perros	Gatos	Fauna silvestre
Bacterias							
Salmonella	1-3,9	13	3,7-15	7-22	1-5	—	1-21,3
Shigella	0,33-2,4	—	—	—	—	—	—
Leptospira	<1-3,0	2,3	—	2,5	26,6	—	5,9-33
Campylobacter	3,0	—	—	—	—	—	—
Escherichia coli patógenas	1,2-15,5	3,5	2,0	1,5-9	—	—	—
Vibrio cholera	1,9-9,0	—	—	—	—	—	—
V. cholera eltor (Asia)	9,5-25,0	—	—	—	—	—	—
Yersinia	—	—	—	1-10	—	—	1-10
Parásitos							
Entamoeba histolytica	10-17	—	—	—	—	—	—
Cryptosporidium	0,6 – 4,3	16-100	40	95	80	87	1-68
Giardia	7,4	10	33	—	13	2,5	6
Virus							
Enterovirus	0,88	—	—	—	—	—	—

Fuente: OMS. La Calidad del Agua Potable en América Latina, 1996.

Algunos otros agentes patógenos significativos tales como *Legionella* y *Naegleria*, se encuentran en el ambiente (microorganismos de vida libre) y comprenden cepas tanto patógenas como no patógenas. Estas cepas pueden llegar a invadir el cuerpo humano en situaciones de estrés, sistema inmunitario débil o por la degeneración física general del cuerpo asociada con la edad avanzada.

El grado y frecuencia de la exposición a agentes patógenos se ven agravados por la expansión de la población humana en el mundo. La aglomeración tanto en ciudades antiguas como modernas sumado a un desarrollo no ordenado en

²⁶ OPS. La Calidad del Agua Potable en América Latina, 1996. Pág. 28.

las comunidades ejerce una presión excesiva sobre las infraestructuras de saneamiento (abastecimiento y distribución de agua, recolección y tratamiento de aguas residuales, disposición de residuos sólidos). Se agrega a estos problemas la movilidad de las personas a escala internacional, y resulta evidente que las enfermedades pueden alcanzar rápidamente proporciones epidémicas en sitios muy alejados los unos de los otros.

Algunos agentes patógenos de animales domésticos como *Salmonella*, *E.coli* 0157:H7, *Cryptosporidium*, *Leptospira interrogans* (del ganado bovino) y *Balantidium coli* (del ganado porcino) lo son también para el ser humano. A menos que se eliminen en forma adecuada los desechos animales en rellenos sanitarios, la materia fecal en la escorrentía pluvial de los corrales de engorde y las explotaciones avícolas se convierten en una importante fuente de contaminación fecal de las cuencas rurales que contaminan arroyos y lagos.²⁷

Los refugios de vida silvestre son otra fuente importante de contaminación fecal, a menudo según la estación muchos de éstos animales migran estacionalmente en busca de alimento. La mayor amenaza de agentes patógenos expelidos por la fauna silvestre proviene de los animales de sangre caliente, que residen permanentemente en cuencas que sirven como fuentes de abastecimiento de agua. Estos animales son reservorios para *Giardia*, *Cryptosporidium*, *Salmonella*, *Campylobacter* y *Yersinia* aportando una severa contaminación por escorrentía pluvial.

²⁷ OPS. La Calidad del Agua Potable en América Latina, 1996. Pág. 31.

En consecuencia, las políticas de manejo de cuencas deben incluir un programa anual destinado a evaluar la amenaza de agentes patógenos potenciales e identificar a los portadores en la población de fauna silvestre.²⁸

Para el caso, del Distrito Metropolitano de Quito en el año 2003 mediante la firma del convenio de mancomunidad entre el Municipio Metropolitano de Quito y los municipios de los cantones Mejía y Rumiñahui se concretó un Plan de Manejo Ambiental Integral de las Cuencas Hidrográficas que conforman dicho distrito de las cuales se puede mencionar el Río Pita y San Pedro.²⁹

2.2 Vías de ingreso de los agentes patógenos a los cuerpos de agua

La densidad y variedad de los agentes patógenos humanos que se descargan en las aguas están relacionadas con la población atendida por el sistema de recolección de aguas residuales, las modalidades estacionales de ciertas enfermedades y el grado de las infecciones de la comunidad en un momento dado. Es preciso llevar a cabo estudios epidemiológicos para determinar la aparición de agentes patógenos en aguas residuales y la incidencia de enfermedades en comunidades de diversa condición demográfica y socio-económica. Así se obtendría información sobre el uso de aguas residuales que serviría para la prevención de posibles brotes y epidemias en la comunidad.³⁰

²⁸ OMS. La Calidad del Agua Potable en América Latina, 1996.

²⁹ DMMA. Plan de Manejo de la Calidad del Agua, Quito, 2005.

³⁰ OMS. La Calidad del Agua Potable en América Latina, 1996.

El desarrollo de estudios e investigaciones que vinculan el deterioro de la salud de grupos vulnerables originados a partir de la contaminación del agua fundamentan la adopción de medidas oportunas de intervención en las áreas críticas de salud y ambiente que permiten fortalecer la toma de decisiones y la identificación de los modos de afectación a la salud y sus fuentes de generación orientados, especialmente, a la dotación de agua potable y alcantarillado.

Por lo tanto, el Municipio del Distrito Metropolitano de Quito ha planteado que para el año 2008 se alcance una cobertura del 95% de la Red Epidemiológica Ambiental la misma que dispondrá de indicadores de vigilancia epidemiológica ambiental.³¹

Aunque la documentación sobre contaminación general de la calidad del agua superficial en los países en desarrollo es un tanto escasa, es conocido que esta contaminación representa una amenaza importante, porque el tratamiento de los desechos domésticos y del procesamiento de alimentos es a menudo mínimo o inexistente.

La escorrentía pluvial de las zonas urbanas puede ser un importante factor en la calidad fluctuante de las aguas superficiales. En las ciudades que recogen los desechos tanto pluviales como domésticos en un mismo sistema de tuberías, la capacidad de tratamiento se convierte en un problema fundamental,

³¹ DMMA. Plan de Manejo de la Calidad del Agua, Quito, 2005.

mientras que para los sistemas separados el inconveniente radica en que a menudo el desagüe pluvial se descarga en las aguas receptoras sin ningún tratamiento.

Las inundaciones, las aguas residuales y las aguas pluviales no solo contaminan los sistemas de aguas superficiales sino también los sistemas de aguas subterráneas. Muchos pozos particulares pueden convertirse en abastecimientos inseguros de agua potable. En el transcurso de los años, diversos brotes de enfermedades transmitidas por el agua han sido atribuidos a pozos y manantiales contaminados mal protegidos de la escorrentía superficial y de las descargas de aguas residuales. Entre las bacterias patógenas específicas que se han aislado de las aguas de pozos figuran *E.coli*, *V. Cholera*, *Shigella flexneri*, *Shigella sonnei*, *Salmonella typhimurium*, *Yersinia enterocolítica* y *Campylobacter*.³²

El agente patógeno, *Vibrio cholera* serogrupo 01, biotipo eltor, fue detectado por primera vez en Indonesia en 1934. Este agente patógeno siguió apareciendo como pandemia regional en el sudeste asiático hasta el decenio de 1960, cuando se manifestó en varios países del cercano Oriente. En 1970 fue detectado en brotes registrados en Rusia y Corea del Sur. Repentinamente, en 1991 se identificaron los primeros casos de cólera eltor en la ciudad de Lima y a los pocos días la enfermedad se había propagado hacia las ciudades

³² OPS. La Calidad del Agua Potable en América Latina, 1996. Pág. 33.

costeras del norte de éste país y rápidamente a los países vecinos hasta llegar inclusivamente a Centroamérica.

El agente patógeno se diseminó rápidamente como consecuencia de las malas prácticas de saneamiento, y apareció en las aguas subterráneas utilizadas para abastecimiento público. No se implantó ninguna cuarentena en las fronteras para reconocer a las personas enfermas, ni se inspeccionaron los equipajes personales con el fin de detectar la presencia de productos contaminados. Como consecuencia, se comprobó que los casos aislados de cólera que se registraron en los Estados Unidos se debieron al consumo de moluscos y crustáceos crudos traídos por viajeros desde lugares de América del Sur donde se habían producido los brotes.³³

Las aplicaciones en el suelo de aguas residuales con un tratamiento mínimo pueden contaminar las aguas subterráneas en zonas donde hay infiltración rápida de los suelos (altas tasas de percolación). En estas condiciones, los procesos naturales de autopurificación (desección, contacto con el suelo ácido, exposición a la luz solar, competencia, antagonismo y depredación de microorganismos del suelo), se tornan imposibles o ineficaces. Los rellenos sanitarios indebidamente ubicados o mal diseñados que reciben desechos animales, lodos de las plantas de tratamiento de agua y basura también pueden contribuir con una descarga significativa de agentes patógenos a las aguas subterráneas y superficiales. Los residuos sólidos urbanos no solo

³³ OPS. La Calidad del Agua Potable en América Latina, 1996. Pág. 37.

contienen desperdicios de alimentos, plásticos, telas, cartón sino también materia fecal.

Se ha observado que el dragado de los cauces de los ríos, también contribuye a la recirculación de agentes patógenos que se acumulan en los bancos de lodos de las aguas residuales.

2.3 Persistencia de los agentes patógenos en las aguas

Una vez que los agentes patógenos se descargan en los cursos de agua su persistencia es variable y está determinada por muchos factores. Los agentes patógenos tienen tiempos de supervivencia en el agua que van de periodos cortos a moderados. Entre algunos de los ejemplos que se pueden señalar se encuentran: *Eschericia coli* y *Salmonella* que sobreviven 90 días, *Shigella* y *Vibrio cholerae* 30 días y *Campylobacter* 7 días (para mayor referencia observar tabla 2.2).

La excesiva demanda bioquímica de oxígeno (DBO) o carbono orgánico total (COT), las bajas temperaturas de los cursos de agua disminuyen los procesos de autopurificación del curso de agua.

La sedimentación es uno de los factores naturales de autopurificación que puede desplazar rápidamente agentes patógenos del agua desde la superficie hasta el fondo del cuerpo de agua donde se concentrarán los microorganismos que han sido adsorbidos por la arena, arcilla y las partículas de los sedimentos.

Esta acción se produce en los sectores tranquilos de un curso de agua, o durante períodos de prolongada retención en los lagos y embalses.

2.4 Enfermedades infecciosas

El agua es esencial para todas las formas de vida. De esto se desprende que la disponibilidad de agua apta para el consumo, la preparación de alimentos, la higiene personal y doméstica, la agricultura o la producción de energía es esencial para garantizar la salud y el bienestar de los seres humanos.

La disponibilidad de agua permite establecer un medio higiénico que evita o limita la propagación de muchas enfermedades infecciosas tanto entre los seres humanos como en los animales. Sin embargo, el agua es, así mismo un importante vínculo de transmisión de muchas enfermedades que han afectado a los seres humanos durante siglos. Tanto su escasez como su calidad deficiente, afectan a la salud y el bienestar de las personas.³⁴

Desde el punto de vista del tipo de enfermedades que conciernen a este estudio se las ha dividido en dos grupos:

2.4.1 Enfermedades transmitidas por el agua

Las enfermedades de este grupo son la razón principal de que se desinfecten los abastecimientos de agua. Se transmiten por la ingestión de agua que ha sido contaminada por microorganismos patógenos, principalmente a través de

³⁴ OPS. La Calidad del Agua Potable en América Latina, 1996. Pág. 43.

heces humanas. La ingestión puede ser directa, por el agua, o indirecta, con alimentos o bebidas que han sido procesados o alterados con agua contaminada. Al igual que, pueden ser transmitidas por prácticas higiénicas deficientes. La contaminación fecal de los abastecimientos de agua aumenta muchísimo las probabilidades de transmisión de numerosas enfermedades infecciosas. El agua puede ser contaminada en la fuente, durante su distribución, o en los tanques o depósitos comúnmente empleados para almacenarla.

Tras la ingestión, la mayor parte de estos microorganismos se multiplica en el tubo digestivo y se excreta en gran número en las heces. Muchos de estos microorganismos pueden sobrevivir durante períodos prolongados fuera del cuerpo humano, en particular en un medio acuático y ocasionalmente en el suelo, desde donde contaminan el agua potable y los alimentos. Pocos de los microorganismos resistentes en el medio ambiente pueden ser transmitidos por moscas, dedos contaminados con heces y vómitos.

Las enfermedades pertenecientes a este grupo, se encuentran entre las enfermedades que producen efectos más profundos en la salud humana. Casi la mitad de la población de los países en desarrollo padece enfermedades transmitidas por el agua. Entre las enfermedades transmitidas por el agua, el grupo de las enfermedades diarreicas es la causa principal de mortalidad y morbilidad infantil en países en desarrollo y afectando también a otros grupos de edad. Se calcula que del total de defunciones mundiales vinculadas con la

diarrea, más del 90 % ocurren en niños de menos de cinco años de edad. Las enfermedades son una carga económica para los países en desarrollo. Las enfermedades diarreicas constituyen una de las más graves amenazas para la salud que enfrenta la población infantil de América Latina y el Caribe, al ser consideradas dentro de las cinco causas principales de muerte en los niños de menos de un año de edad y en muchos países como la primera causa de muerte en los niños de 1 a 4 años. Los niños de menos de dos años tienen la morbilidad y la mortalidad más alta; se calcula que aproximadamente de 80 a 90% de las defunciones por diarrea ocurren en este grupo de edad. La principal causa de muerte es la deshidratación, como resultado de la pérdida de líquidos y electrolitos.³⁵

La enfermedad diarreica puede producir otros efectos nocivos par la salud. Se considera que los ataques reiterados de diarrea son la causa principal y más importante de malnutrición, no sólo porque el paciente come menos sino también por la reducción de la capacidad de absorción intestinal. Al mismo tiempo, los requisitos nutricionales aumentan como resultado del proceso infeccioso. Cada episodio de diarrea contribuye a reducir el estado de nutrición; cuando los episodios son frecuentes y prolongados, pueden frenar en gran medida el crecimiento y obstaculizar el desarrollo mental.

En América Latina y el Caribe, el *rotavirus*, *Escherichia coli* enterotóxigena, *Shigella*, *Campylobacter jejuni* y *Cryptosporidium parvum* se encuentran entre

³⁵ OPS. La Calidad del Agua Potable en América Latina, 1996. Pág. 48.

los agentes causales más importantes de las enfermedades diarreicas y la deshidratación.

Entre los efectos más importantes de la disentería están la anorexia, la rápida pérdida de peso y daños en la mucosa intestinal. La mayor parte de las disenterías agudas en los niños son causadas por cepas de *Shigella*, *Campylobacter jejuni* y, con menor frecuencia, *Escherichia coli enteroinvasora* (ECEI) y *Salmonella*. La *Entamoeba histolytica* puede causar disentería grave en jóvenes y adultos, pero rara vez produce disentería en los niños.

Los pacientes con disentería causada por el tipo 1 (bacilo de Siga) de *Shigella dysenteriae* están a menudo clínicamente muy enfermos. El síndrome clínico casi siempre comprende fiebre alta, síntomas tóxicos y calambres abdominales, además de tenesmo intenso.

La diarrea persistente se caracteriza por un inicio agudo de la diarrea que persiste durante 14 o más días, acompañada con frecuencia por una marcada pérdida de peso. No hay un único agente causal, sino varios como *Escherichia coli* enteroagregativa, *Shigella* y *Cryptosporidium*.³⁶

La mayor parte de las infecciones entéricas son asintomáticas y, en proporción, aumentan en los niños de más de dos años de edad como consecuencia del desarrollo de una inmunidad activa que suprime las manifestaciones clínicas. Los sujetos con infecciones asintomáticas, expelen virus, bacterias o quistes de

³⁶ OPS. La Calidad del Agua Potable en América Latina, 1996. Pág. 52.

protozoarios en sus heces. Se ha calculado que más de 90 % de las personas infectadas por el vibrón colérico eltor son asintomáticas.

Actualmente, el *V. Cholerae* 01 es una causa muy importante de diarrea en América Latina, por ejemplo en las zonas donde el cólera es endémico, esta enfermedad causa entre 5 y 10 % de los casos de diarrea. Otros agentes patógenos comprenden los virus *Norwalk* y el adenovirus entérico, las bacterias *Aeromonas hydrophila*, *Plesiomonas shigelloides*, *Vibrio parahaemolyticus* y *Yersinia enterocolítica*, y los protozoarios *Isospora belli*.

También se pueden identificar agentes patógenos entéricos en aproximadamente 30 % de los niños sanos sin diarrea, lo que hace difícil determinar si un agente patógeno identificado en un niño con diarrea es realmente la causa de la enfermedad. Esto ocurre especialmente con la *Giardia lamblia*, cuyos quistes se identifican con la misma frecuencia en los niños sanos y en los niños con diarrea, y con los aislamientos de ECEP o *C. jejuni* en niños de más de un año de edad.

En América Latina, y en cualquier otro sitio, el cólera ha sido una enfermedad casi exclusivamente de los pobres. A diferencia de las epidemias de cólera del siglo XIX, el cólera en los últimos años ha sido predominantemente en zonas rurales. A pesar de las epidemias explosivas en zonas urbanas como

Guayaquil, la población rural pobre ha sido la más afectada por la falta de abastecimiento de agua segura y un saneamiento adecuado.³⁷

2.4.2 Enfermedades vinculadas por la falta de higiene

Las enfermedades vinculadas con la falta de higiene se caracterizan por la escasez o la inaccesibilidad del agua para la higiene personal y doméstica. Y en general, se podría decir que afecta sobretodo a las niñas. Dondequiera que ocurra esto hay siempre una alta incidencia de enfermedades diarreicas y de enfermedades cutáneas tales como la tiña, el impétigo y la septicemia cutánea, y de enfermedades oculares tales como el tracoma y la conjuntivitis.³⁸

³⁷ OPS. La Calidad del Agua Potable en América Latina, 1996. Pág. 50.

³⁸ OMS. La Calidad del Agua Potable en América Latina, 1996. Pág. 52.

3. Situación de los servicios de Agua Potable y Saneamiento en las Américas

En América Latina y el Caribe aún persisten grandes desafíos relacionados con el mejoramiento de la eficiencia y calidad de la prestación de los servicios de saneamiento, situación que merece una mayor atención ya que dichos servicios constituyen un elemento clave para la salud y para una mejor condición de vida de las poblaciones.

El cuadro presentado a continuación muestra los datos y estadísticas de los indicadores básicos de América Latina y el Caribe del 2004, que reflejan una real desigualdad en el acceso. Del total de la población urbana el 4% no dispone de servicio de agua mientras que del total de la población rural el 27% no cuenta con el servicio.

Tabla 3.1: Población con abastecimiento de agua en el 2004 (en miles de habitantes).

	Total	Con	Sin servicio	% con	% con conexión
--	--------------	------------	---------------------	--------------	-----------------------

		servicio		servicio	domiciliaria
Urbana	427'861	411'091	16'770	96	90
Rural	125'864	92'260	33'604	73	45
Total	553'725	503'374	50'374	91	80

Los problemas de provisión de servicios son más graves en las zonas rurales, principalmente en los cinturones de pobreza que se están incrementando alrededor de las grandes y medianas ciudades de América Latina y el Caribe, debido a una migración rural que es bastante significativa.

En las zonas rurales de América Latina y el Caribe, las soluciones en materia de suministro de agua potable todavía son dirigidas casi exclusivamente hacia problemas de ingeniería y a la selección y uso de tecnología apropiada en el medio.³⁹

En términos de la universalización de la cobertura de agua potable, los números absolutos son preocupantes. El 90% de la población total de América Latina y el Caribe utiliza fuentes mejoradas de agua potable, del cual el 96% corresponde al área urbana y el 71% al área rural. Es decir, que alrededor de 89,363 millones de personas (29%) se abastecen a través de sistemas definidos como “fácil acceso”. Éstos son métodos que por ser de bajo costo representan el único medio de provisión de agua al alcance de personas de limitados recursos económicos, representando en la gran mayoría de los casos,

³⁹ OPS. Situación de salud en las Américas, Washington, 2007.

un riesgo significativo para la salud, principalmente para las poblaciones más vulnerables, tales como los niños y ancianos.⁴⁰

Generalmente éstos son sistemas donde el control, la vigilancia sanitaria y la certificación de su calidad son casi inexistentes, encerrando un peligro latente para los usuarios de estos sistemas. Se observa que la población servida por sistemas ineficientes en el suministro de agua, se encuentran bajo constantes intervenciones por parte de los servicios de atención médica, en materia de combate a enfermedades diarreicas y entre otras anteriormente mencionadas.

Aunque la desinfección de los sistemas de agua potable ha progresado, quedan aún muchos problemas por resolver entre los que se destacan la discontinuidad del suministro de cloro a escala local, la operación y el mantenimiento inadecuado de los sistemas, los cuales han sido, y siguen siendo, obstáculos para asegurar agua de calidad para todas las poblaciones de manera permanente.

Se estima además que 124,876 millones de personas (23 %) de la población total de América Latina y el Caribe no disponen de servicios de saneamiento, del cual el 4 % corresponde a la población urbana y el 51 % a la población rural.⁴¹

El gran reto de distintas organizaciones internacionales está relacionado con las necesidades de incremento de la cobertura de los servicios de saneamiento

⁴⁰ OPS. Health in Americas, 2007.

⁴¹ OMS. Informe sobre la salud en el Mundo (Indicadores básicos), 2007.

y con el mejoramiento de la eficiencia de los sistemas de saneamiento y de los modelos tecnológicos alternativos de solución "in situ".⁴²

Lamentablemente, como consecuencia de la situación económica de los países en desarrollo, los procesos de desinfección y tratamiento alternativos para reducir los riesgos microbiológicos y químicos del agua son caros y no constituyen una opción viable, por lo que frecuentemente la única medida es la cloración o ninguna desinfección en absoluto.

Debido a su eficacia y bajo costo, el uso del cloro como desinfectante sigue desempeñando una función esencial en la reducción y control de enfermedades transmitidas por el agua en América Latina y el Caribe. Lo recomendable en todos los casos, es que el agua superficial que se suministra, después de un apropiado pre-tratamiento se aplique un desinfectante eficaz. Lamentablemente esto no se hace en muchas comunidades pobres, y entonces la cloración es la única medida disponible para el agua superficial. También debemos recordar que la adopción de una tecnología determinada depende tanto de la capacidad técnica existente en el país como la capacidad de pago de la población.⁴³

Es evidente que la situación merece una atención muy especial, por las serias amenazas que representan para la salud humana y para la preservación ambiental sobretodo en aquellas regiones donde persisten altos niveles de

⁴² OMS. Informe Regional sobre la Evaluación 2000 en la Región de las Américas, 2000.

⁴³ OPS. La Calidad del Agua Potable en América Latina, 1996.

incidencia de enfermedades gastrointestinales, así como por un incremento de sustancias tóxicas en los residuos industriales y el uso intensificado de agroquímicos. A todo esto se agrega el problema de deficiencias que se observan en el aspecto de tratamiento de aguas residuales y en la operación y mantenimiento de los sistemas de saneamiento. Las causas de éste problema se identifican por varios temas críticos todavía no resueltos, entre los que se destacan: el insuficiente apoyo político de los gobiernos a las instituciones sectoriales pertinentes, la falta de conciencia sanitaria en la población, la necesidad de cambiar las metodologías, los criterios usados para financiar las instalaciones para tratar las aguas residuales, la inadecuación de las políticas ambientales, las deficiencias institucionales y la necesidad de formular normas tecnológicas y de ingeniería apropiadas para la eliminación de desechos.

En la Región de América Latina y el Caribe, el aumento de la cobertura de abastecimiento de agua y de saneamiento en las áreas urbanas implica necesariamente la ampliación de la infraestructura y el mejoramiento de las instalaciones existentes. En muchos casos las instalaciones para abastecimiento de agua, líneas de conducción, estaciones de bombeo, plantas de tratamiento y redes de distribución necesitan rehabilitación y ampliación.

Estos trabajos de ampliación y rehabilitación, están condicionados a la disponibilidad de recursos financieros y a la capacidad operativa para su planificación y ejecución.

Todavía en los países de la Región existen serias diferencias en la operación y mantenimiento de las instalaciones y equipos ocasionando interrupciones en el servicio, pérdidas en los sistemas de distribución, fallas en la desinfección, comprometiendo así la eficiencia del servicio y la calidad del agua puesta a disposición de los usuarios.

3.1 Desigualdades en el acceso y uso de los servicios de agua potable en América Latina y el Caribe.

Uno de los aspectos que en la actualidad produce mayor preocupación es la desigualdad que enfrentan determinados grupos de población en la provisión de servicios básicos, entre los que se destaca el abastecimiento de agua potable.

Utilizando ampliamente datos de encuestas de hogares, se llevó a cabo, de forma complementaria el proceso de Evaluación 2000, un estudio sobre las condiciones generales de las viviendas y las desigualdades en el suministro, uso y gasto del agua en once países de América Latina y el Caribe: Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Ecuador, El Salvador, Jamaica, Nicaragua, Panamá, Paraguay y Perú.⁴⁴

La Evaluación 2000, fue efectuada por conducto del Programa Conjunto OMS/UNICEF de Monitoreo del Abastecimiento de Agua y del Saneamiento.

⁴⁴ OMS. Informe Regional sobre la Evaluación 2000 en la Región de las Américas, 2000.

Esta evaluación abarca a todo el mundo al presentar datos de seis regiones: África, Asia, Europa, América Latina y el Caribe, América del Norte y Oceanía.

El Consejo de Colaboración para el Abastecimiento de Agua y el Saneamiento preparó metas indicativas para la cobertura con abastecimiento de agua y saneamiento como parte del proceso que desembocó en el Segundo Foro Mundial sobre el Agua, celebrado en La Haya del 17 al 22 de marzo de 2000. Las metas fueron presentadas en el informe VISIÓN 21: una visión común en pro de la higiene, el saneamiento y el abastecimiento de agua y un marco para la acción; entre las metas planteadas se encuentran:

- Reducir a la mitad antes del 2015 la proporción de personas sin acceso a sistemas de saneamiento higiénicos.
- Reducir a la mitad antes del 2015 la proporción de personas sin acceso a cantidades suficientes de agua segura y a un costo accesible.
- Proveer a todos de agua, saneamiento e higiene antes del 2025.

Dichas metas son útiles para evaluar la magnitud de la tarea que supondrá atender las necesidades de agua y saneamiento de los pobres. Se basan en la meta de la cobertura universal establecida para el Decenio Internacional del Agua Potable y del Saneamiento Ambiental (1981-1990), que fue adoptada nuevamente como meta para el año 2000 en la Cumbre Mundial en favor de la Infancia en 1990.

El informe de la Evaluación 2000 representa un primer paso hacia un desglose en función de los medios de prestación de servicios básicos, además de la estimación global de cifras de cobertura.⁴⁵

De acuerdo al estudio se destacan las siguientes consideraciones generales de la Evaluación del Abastecimiento y el Saneamiento en el Mundo en el 2000:

- Las desigualdades en el acceso y uso de los servicios de agua potable para las familias están relacionadas a las desigualdades en los niveles de gasto/ingreso de las mismas. En diversos países analizados, el acceso y uso de los servicios de agua potable con conexión domiciliaria aumentan en la medida que se consideran grupos de población con mayores niveles de gasto/ingreso per cápita.
- En los servicios con conexión domiciliaria, se encontró en todos los países analizados que en las áreas rurales es menor la proporción de personas que cuentan con este tipo de acceso a agua. En parte, estas diferencias podrían explicarse por la baja densidad poblacional de las zonas rurales que no permiten afrontar costos fijos propios de la inversión en sistemas de redes públicas o la menor capacidad de estas zonas en captar la atención de las autoridades y los fondos de inversión pública.
- En los países donde ha sido posible conocer la situación de los sistemas, respecto a la regularidad en el suministro de agua, se

⁴⁵ http://www.who.int/water_sanitation_health/monitoring/2000globs1.pdf

encuentra asociado a la calidad de la prestación del servicio, con la posible existencia de restricciones de oferta del recurso hídrico y de la operación y mantenimiento deficiente de los sistemas.

- Las familias que no cuentan con conexión domiciliaria de agua potable, tienen que recorrer cierta distancia para poder abastecerse y se considera que por lo general son familias, de bajos ingresos y el no disponer de acceso con conexión domiciliaria les impone costos adicionales.
- Con relación al tema de la desinfección domiciliaria del agua para consumo humano, deben tenerse en cuenta dos factores. Primero, que la desinfección domiciliaria debe depender siempre de la calidad del servicio, puesto que si es considerado lo suficientemente buena por los usuarios, no se les dará desinfección alguna. Segundo, el desinfectar el agua implica costos en los que debe incurrir el hogar y en la medida que los ingresos sean muy bajos es posible que sea más difícil afrontarlos.
- Las familias donde el tipo de acceso y uso de los servicios es mayor, la incidencia de enfermedades infecciosas es menor.
- Adicionalmente, se encuentra que es común que en áreas urbanas el gasto en agua sea mayor que en las zonas rurales, aún cuando se comparan familias de similar situación económica. Esto, puede estar asociado a diferencias en las tarifas pagadas lo que a su vez puede reflejar diferencias en los tipos de acceso entre zonas.

- En diversos países, al analizar el gasto con respecto al servicio de agua potable por tipo de suministro, se encuentra que existe un grupo de familias, generalmente de bajos ingresos, que por no disponer de conexión domiciliaria, deben gastar para abastecerse con agua potable un monto similar al que gastan familias en mejor situación económica.

La equidad de éstos servicios es un tema complejo que no tiene soluciones inmediatas; sin embargo, para lograr la igualdad de los servicios de agua potable es necesario examinar las posibles estrategias relacionadas con la oferta nacional de los servicios y analizar cómo las organizaciones de cooperación técnica y financiera podrían apoyar o promover inversiones en este aspecto, así como estimular el establecimiento de políticas sectoriales de financiamiento para la expansión, mejoramiento de la infraestructura y de la operación de los servicios y la promoción de la reducción del crecimiento poblacional.⁴⁶

3.2 Cobertura y calidad de los Servicios en áreas urbanas y rurales.

La Evaluación 2000 demostró claramente que pese a los progresos observados en América Latina y el Caribe, aún continua el fuerte contraste entre la cobertura y calidad del servicio en abastecimiento de agua entre las áreas

⁴⁶ OMS. Informe Regional sobre la Evaluación 2000 en la Región de las Américas, 2000.

urbanas y rurales. Esto implica que se debe continuar dando especial atención a las áreas rurales y reforzar los mecanismos de apoyo.

La información disponible indica que en muchos de los países hay todavía una parte de la población que no cuenta con las condiciones mínimas para satisfacer las necesidades básicas de abastecimiento de agua, es decir, la disponibilidad y fácil acceso a agua de buena calidad, de por lo menos 30 litros por persona por día.

Esas inequidades necesitan ser corregidas, a través de cambios de actitud, de procedimientos y de prioridades, complementados con una efectiva movilización social y una mayor participación de la comunidad organizada y de la empresa privada en la prestación de estos servicios.

3.3 Control y vigilancia de la calidad del Agua.

A pesar de los progresos hechos en los últimos años, en América Latina y el Caribe todavía se pueden observar problemas de calidad del agua en la mayoría de los países, en general como consecuencia de las deficiencias en la operación y mantenimiento de los servicios. Entre las causas posibles podemos mencionar:

- Deterioro de la infraestructura y la calidad de los servicios tales
- Intermittencia del servicio
- Plantas de tratamiento poco eficientes

- Ausencia o problemas con la desinfección
- Redes de distribución y conexiones domiciliarias en condiciones precarias.

La falta de orientación inversionista de las principales entidades públicas del sector constituye una importante limitación del sector en la Región.

Sólo el 24 % de la población de América Latina y el Caribe dispone de algún tipo de sistema de vigilancia y control de la calidad de agua. La población protegida por sistemas adecuados de vigilancia es muy limitada en las zonas urbanas e insignificantes en las zonas rurales. Esta realidad se refleja en los datos estadísticos de las enfermedades de origen hídrico.

Las nuevas guías de calidad de agua potable desarrolladas por el Organismo Mundial de la Salud (OMS) pretenden facilitar herramientas para que las autoridades nacionales y locales mejoren la calidad del agua.⁴⁷

3.4 Estado de los Recursos Hídricos en América Latina y el Caribe

La contaminación de los recursos hídricos constituye uno de los problemas ambientales más importantes, representando un alto riesgo para la salud humana y serios daños al medio ambiente en general.

⁴⁷ UNESCO. Water for people, water for life: The United Nations World Water development Report, 2004.

En casi todos los países de la Región de América Latina el deterioro gradual del recurso hídrico se ha dado como consecuencia del crecimiento poblacional, del desarrollo económico y de la urbanización. En la mayoría de los casos la principal causa es la disposición inadecuada de los desechos domésticos, agropecuarios e industriales.

El problema se agrava aún más por el mal uso de los recursos naturales, la utilización indiscriminada de agroquímicos, la descarga en los ríos de desechos industriales, todo lo cual está comprometiendo la sostenibilidad de los recursos hídricos y de su capacidad para servir como fuente de abastecimiento.

Políticas y decisiones gubernamentales ineficientes y un pobre manejo del agua han empeorado y reducido la disponibilidad de agua alrededor del mundo.

La disponibilidad del recurso está llegando a niveles críticos para muchos países de América Latina, ya sea por la cantidad de consumo y por la contaminación de los cuerpos de agua, lo que genera serios problemas de escasez de agua, problema que se podría agravar en los años de sequía, inundaciones y avalanchas.⁴⁸

En la región de América Latina y el Caribe el tema del agua es de especial importancia para el desarrollo. A pesar de contar con el 30% de los recursos hídricos del mundo, están distribuidos de una manera muy irregular e inequitativa. Una gran parte de estos recursos, se encuentran en regiones con

⁴⁸ PNUMA. Informe anual y Situación de la Red Mundial del Programa GEMS/Agua del PNUMA, 2004. Pág. 5.

baja densidad poblacional. Mientras que en las zonas donde vive una gran parte de la población, existe una escasez constante de agua, tanto en términos cuantitativos como cualitativos.

La demanda de agua varía según el usuario final y también según el país en la figura 3.1 se puede apreciar la diferencia entre la disponibilidad de agua en $m^3/\text{capita}\cdot\text{año}$ y la intensidad de uso en porcentaje que existe en cada uno de los países de América Latina así como en los países desarrollados y a nivel mundial.

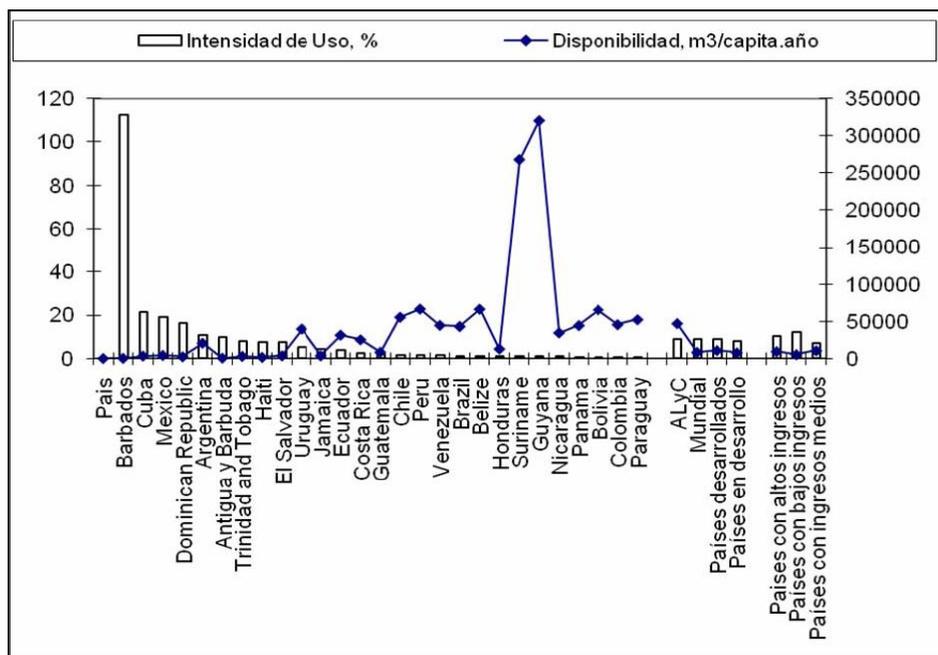


Fig. 3.1: Intensidad de Uso y Disponibilidad de agua por país (2005).
Fuente: Organización de las Naciones Unidas.

En cuanto a los usos del agua también existe una notoria discrepancia, el 74 % se emplea para el riego agrícola, el 17 % para uso municipal (servicios de dotación de agua para uso doméstico) y el 9% para la industria.⁴⁹

La condición de los recursos hídricos actualmente se caracteriza por grandes carencias en cuanto a instrumentos políticos, económicos e institucionales.

De acuerdo a las proyecciones realizadas por el Sistema de Vigilancia del Medio Ambiente Mundial se calcula que en los próximos seis años la demanda del agua aumentará en un 70% como resultado de las razones mencionadas anteriormente, indicando que se debe establecer lo más pronto posible una gestión orientada al manejo del agua para cada actividad.

La nueva visión de la gestión del agua debe incorporar leyes, principios y conceptos en cuanto a la administración y derechos de agua. De tal manera, que se convierta en la base para una adecuada asignación del agua y para asegurar el acceso de todos los interesados para fines de consumo y productivos.⁵⁰

3.5 Estado actual de la Tecnología para el tratamiento de aguas

Los países de América Latina y el Caribe se han interesado mucho en la aplicación de nuevas tecnologías, tales como el aprovechamiento de aguas

⁴⁹ CEPAL. Recursos Hídricos en América Latina y el Caribe, México, 2005.

⁵⁰ PNUMA. Informe anual y Situación de la Red Mundial del Programa GEMS/Agua del PNUMA, 2004. Pág. 7.

subterráneas, plantas potabilizadoras simplificadas, desinfección del agua con agentes oxidantes generados “in situ”, lagunas de estabilización y reactores anaeróbicos de flujo ascendente para el tratamiento de aguas residuales, etc.⁵¹

La percepción social y política de los riesgos sobre la salud humana por el consumo de agua que no ha sido desinfectada adecuadamente ha impulsado la tendencia a reemplazar la desinfección con cloro por otros métodos más complejos y costosos. Aunque esta estrategia puede ser tecnológica y económicamente factible en países ricos y científicamente avanzados, no es necesariamente apropiada en América Latina y el Caribe. Aunque con el apoyo de ciertas organizaciones internacionales tales como la OPS, algunos países están trabajando para desarrollar alternativas que estén a su alcance económico y tecnológico.⁵²

Entre las principales tecnologías que existen para el tratamiento de agua se pueden indicar las siguientes:

3.5.1 Reactores Pasivos

Los reactores pasivos o también conocidos como barreras reactivas es un sistema tipo filtro que sirve para el tratamiento de la contaminación de aguas superficiales y subterráneas.

⁵¹ OMS. Informe Regional sobre la Evaluación 2000 en la Región de las Américas, 2000.

⁵² OPS. La Calidad del Agua Potable en América Latina, 1996.

El principio fundamental es que por medio de materiales reactivos se pueda degradar, disminuir o inmovilizar los contaminantes mediante procesos biogeoquímicos mientras el agua pasa a través del filtro.

Se pueden diferenciar cinco diferentes tipos de reacciones:

1. pH-Redox: Cuando se obtiene una variación del pH y del potencial Redox del agua tratada.
2. Floculación: Los contaminantes que están en la solución son floculados y separados del agua.
3. Adsorción: Se separan los contaminantes por medio de procesos de adsorción.
4. Liberación de nutrientes: La presencia de nutrientes en el reactor da lugar a la descomposición microbiana que destruye los contaminantes existentes.
5. Procesos físicos: En este reactor la eliminación de los contaminantes ocurre cuando son fijados a un medio.⁵³

La clase de reacción que se produce dentro del reactor depende del material reactivo seleccionado por lo que debe estar en función a los tipos de contaminantes que se deseen tratar. Desde los años noventa se han desarrollado reactores pasivos con una amplia gama de materiales que han tenido gran éxito en Norteamérica y en los países de Europa en materia del control de la contaminación del agua. En la siguiente tabla se describe varios

⁵³ GAVASKAR, A, Gupta. Final Design Guidance for Application of Permeable Reactive Barriers for Groundwater Remediation, Ohio, 2000.

de estos materiales, el contaminante que sirve para tratar y el proceso que tiene lugar en el reactor.

Tabla 3.2: Materiales utilizados en los reactores pasivos con las respectivas reacciones.⁵⁴

Material del reactor	Contaminante tratado	Proceso que tiene lugar
Fe ⁰ , Fe ⁰ /Al, Fe ⁰ /Pd Fe ⁰ /Pirita	Hidrocarburos organoclorados, Hidrocarburos organofluorclorados, Hidrocarburos aromaticos clorados	Deshalogenación abiótica- reductiva
Fe ⁰ y bacterias metanotrópicas	Hidrocarburos organoclorados	Deshalogenación abiótica reductiva y descomposición bacteriana
Zeolitas y bacterias metanotrópicas	Tricloroetileno	Adsorción y descomposición bacteriana
Compuestos para generación de oxígeno (oxygen releasing compounds).	BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xilenos)	Descomposición por oxidación, descomposición bacteriana
Carbón activado	Hidrocarburos aromáticos policíclicos	Adsorción con posible descomposición microbiológica
Fe ⁰	CrO ₄ ⁻²	Reducción y floculación
Hidroxy-apatita	Pb ²⁺	Floculación
Hidroxy-apatita	Zn ²⁺	Adsorción y floculación
Hidroxy-apatita	Cd ²⁺	Floculación
Cal, ceniza volcánica	UO ₂ ²⁺	Floculación
Fe ⁰	UO ₂ ²⁺	Reducción y floculación
Fe ⁰	TcO ₄ ⁻	Reducción y floculación
Turba, Oxido de Hierro	MoO ₄ ²⁻	Adsorción y floculación
Zeolita	⁹⁰ Si ²⁺	Adsorción
Fe ⁰	NO ₃ ⁻	Reducción
Biruta de Hierro	NO ₃ ⁻	Reducción

3.5.2 Procesos de Membrana

Son procesos usados para separar moléculas de acuerdo con su tamaño y masa molecular mediante el uso de membranas diferencialmente permeables. Por lo tanto, actúan como barreras para toda clase de sales disueltas, moléculas inorgánicas y orgánicas, pirógenos, materias coloidales,

⁵⁴ TEUTSCH, G, Schüth. Reaktive Wände: Stand der Technik, Planung, Implementierung, 1999.

virus y bacterias. Existen tres procesos de membrana de los cuales cada uno requiere de una presión para que ocurra la transferencia de masa del soluto.

Diálisis: Esto ocurre cuando las moléculas más pequeñas pasan a través de una membrana semipermeable mientras que las más grandes son retenidas debido al tamaño relativo de las aberturas de los poros de la membrana.

Electrodiálisis: En este proceso la membrana es cargada eléctricamente y así los iones se transfieren desde una solución menos concentrada hacia una solución más concentrada. El flujo de agua pura es tangencial a la membrana mientras que el de iones es transversal.

Osmosis inversa: La ósmosis es la difusión natural de moléculas a través de una membrana semipermeable. La presión osmótica es la presión que hay que aplicar a la solución más concentrada para que se detenga el flujo de agua a través de la membrana. En la ósmosis inversa el solvente (agua) pasa de la solución más concentrada a la solución más diluida.⁵⁵

3.5.3 Métodos biológicos

Consiste en la utilización de microorganismos para transformar los contaminantes orgánicos biodegradables en otras sustancias como dióxido de carbono, agua y sales minerales. Este tipo de métodos permite reducir el

⁵⁵ KIELY, Gerard. Ingeniería Ambiental Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión, Editorial McGraw-Hill, Madrid, 1999.

contenido de materia orgánica de las aguas, contenido en nutrientes, y eliminar agentes patógenos siempre y cuando los microorganismos sean mantenidos bajo condiciones adecuadas de temperatura, pH y nutrientes. Existen diferentes tipos de procesos biológicos: aerobios (presencia de oxígeno) o anaerobios (ausencia de oxígeno), en régimen mesófilo o termófilo, que se aplican según la complejidad y naturaleza del agua a tratar.

3.5.4 Filtros de tierra diatomeas

Las tierra diatomeas o más conocidas como diatomitas son esqueletos fosilizados de plantas marinas microscópicas unicelulares (algas) que extraen sílice del agua y la usan para construir esqueletos duros. Las partículas varían en tamaño de 0.01 mm a 0.2 mm y dependiendo de la cantidad de sílice pueden ser rígidos y fuertes. Generalmente han sido usadas para retener bacterias, protozoos y partículas muy pequeñas.⁵⁶

Es evidente que cada tecnología varía de acuerdo a su eficiencia, confiabilidad y costo pero se podría decir que el estado actual de la tecnología es bueno. Sin embargo, la falta de inversión de fondos públicos en el sector ocasiona que los servicios se vuelvan ineficientes e inaccesibles sobretodo para los países en desarrollo. Por lo que la cooperación internacional tanto técnica como económica juega un rol importante para que este tipo de tecnologías puedan ser aplicadas en los países de América Latina y el Caribe.

⁵⁶ CORBITT, A, Robert. Standard Handbook of Environmental Engineering, Editorial McGraw-Hill, New York, 1990.

3.6 Breve reseña de la cobertura de los servicios básicos en el Ecuador

3.6.1 Cobertura de Agua Potable

En el año 2004 los niveles de cobertura de servicios de agua y saneamiento presentaron los siguientes índices: agua 82% en zonas urbanas y 39% en el área rural.

En cuanto a la calidad del agua entregada a la población existen datos, pero la Evaluación 2000 de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado, indicaba que en el área urbana, solo el 60% de los sistemas usaban desinfección y que en la zona rural era sumamente probable que la gran mayoría de los habitantes recibiera agua sin desinfección y por tanto insegura, factores que no han mejorado hasta la fecha.

Según el MIDUVI, para el año 2005, el 95% de los sistemas de agua proveían agua intermitentemente, lo cual incrementaba el riesgo de ingreso de contaminación a las tuberías.⁵⁷

La cobertura de agua potable para el año 2005 se incrementó al 67 %, pero de este porcentaje el 51 % es deficiente, debido a la discontinuidad del servicio, mala calidad del agua, mala operación y mantenimiento de los sistemas. Se

⁵⁷ OPS. Situación de Salud Ecuador, 2006.

estima que en el Ecuador, cuatro millones de habitantes no disponen del servicio.

3.6.2 Abastecimiento de Agua

Según la publicación de indicadores Básicos de Salud del 2003, el total de la población que recibe el abastecimiento de agua es 61,8 %, mientras que el 38,9 % no tiene este servicio. La realidad en la zona rural es diferente apenas el 10% de esta población cuenta con un abastecimiento de agua quedando el 90% sin este servicio (Fig. 3.2). El 60% de los sistemas urbanos cuentan con desinfección, pero un 95% de estos sistemas trabajan de forma intermitente.

Son diferentes los medios de provisión de agua; a través de la red pública se abastecen en mayor grado la zona urbana que la zona rural con el 83,7% y 39,9% respectivamente; de igual forma sucede en los diferentes tipos de abastecimiento como son los pozos, ríos, acequias, carro repartidor y otros medios.

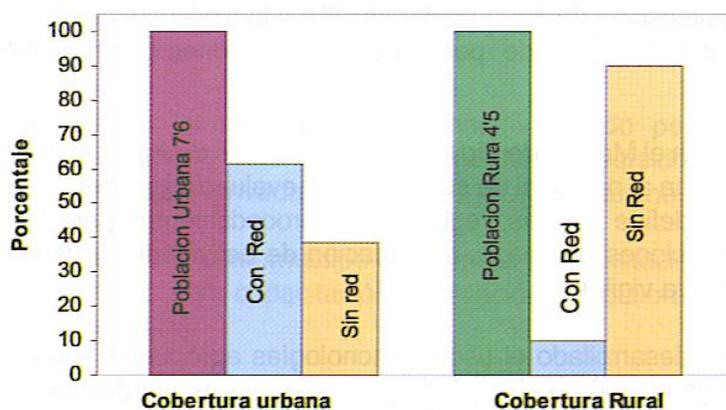


Figura 3.2. Abastecimiento de agua

Fuente: Indicadores Básicos (Ecuador 2003)

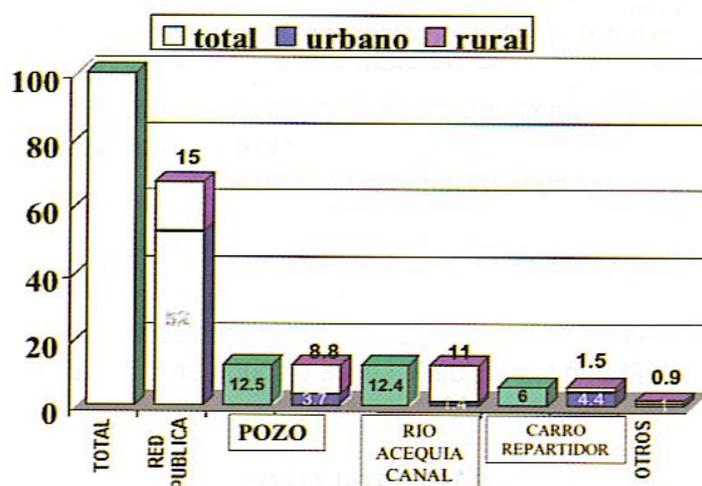


Figura 3.3. Medio de provisión de agua (Ecuador 2003).

Fuente: Indicadores Básicos (Ecuador 2003).

3.6.3 Desinfección y vigilancia de la calidad del Agua

La falta de agua potable en las comunidades rurales del país ha causado la aparición de brotes epidémicos especialmente de enfermedades transmitidas por agua y alimentos contaminados, siendo los niños la población más vulnerable a estas enfermedades, lo cual repercute en su crecimiento y desarrollo. La falta de recursos económicos suficientes es la principal causa que no permite a las poblaciones más pobres, el acceso al agua potable.⁵⁸

A través del Ministerio de Salud Pública del Ecuador, se ha ido desarrollando desde el 2005 el programa para la desinfección del agua a nivel domiciliario y la vigilancia de la calidad del agua para consumo humano. Uno de los instrumentos para llevar a cabo dicho programa, es el Manual de Vigilancia de la Calidad del Agua, el cual proporciona las pautas para las evaluaciones

⁵⁸ MINISTERIO DE SALUD PÚBLICA. Situación de la Salud del Ecuador, Quito, 2006.

efectivas de los sistemas de agua, sus reglamentos, normas, procedimientos, planificación de actividades, así como el uso y mantenimiento de equipos.

En cuanto a la desinfección a nivel domiciliario se plantea la generación de hipoclorito de sodio in situ, a través de la electrolisis de agua y sal común. Además, de la desinfección solar del agua, método que consiste en exponerlo al sol por varias horas.

3.6.4 Desigualdades en los servicios

También es importante destacar que existen desigualdades en la prestación de servicios tanto en las zonas urbanas como en el área rural. Las familias de escasos recursos tienen menos acceso a servicios adecuados de agua y saneamiento y por lo general, residen en las zonas periféricas de las ciudades o en zonas rurales. De igual manera se presentan desigualdades entre las diferentes regiones del país, la Costa y el Oriente del país tiene coberturas más bajas que las que se registran en la Sierra.

La OPS/OMS, en un informe técnico sobre desigualdades en los servicios de agua potable y saneamiento, mostró que solo el 26% de las familias en el nivel más pobre de la población tenía conexión domiciliaria de agua en 1998, mientras que el 87% de las familias en el decil más rico tenía este servicio, condición que no ha cambiado considerablemente en el presente.⁵⁹

⁵⁹ OPS. Situación de Salud Ecuador, 2006.

4. Desinfección del agua potable

La desinfección está definida como la destrucción de microorganismos patógenos. El postulado de Mills-Reincke sostiene que cuando en una comunidad un suministro de agua de mala calidad es reemplazado por uno de agua desinfectada, por cada persona que salva su vida de la fiebre tifoidea, otras tres se salvan por otras causas, muchas de las cuales, no se pensaba que tuvieran conexión con la calidad del agua suministrada.

El principal método de desinfección utilizado es la cloración, aunque claro que existe un menor uso de otras técnicas de desinfección. De acuerdo a descubrimientos recientes relacionados a la generación de trihalometanos y otros productos orgánicos clorados ha surgido la preocupación y limitación del uso del cloro.

La desinfección se describe como un proceso complejo que depende de:

1. Las características físico-químicas del desinfectante
2. La naturaleza cito química y el estado físico de los agentes patógenos.
3. La interacción entre punto uno y dos mencionados anteriormente.

4. Los efectos cuantitativos de los factores en el medio de la reacción como la temperatura, pH, electrolitos y sustancias de interferencia.

Los desinfectantes están clasificados como los siguientes:

- 1) Agentes oxidantes (ozono, halógenos, compuestos halogenados).
- 2) Cationes de metales pesados (plata, oro, mercurio).
- 3) Compuestos orgánicos.
- 4) Agentes gaseosos
- 5) Agentes físicos (calor, radiación ionizante y ultravioleta, pH).

Entre las principales diferencias que existen entre varios microorganismos y su resistencia a los procesos de desinfección son aquellos relacionados por un lado a los virus y por otro a las coliformes. Los primeros son muchos más resistentes a las cloraminas y son también más resistentes bajo circunstancias que ocurren naturalmente como cuando son retenidos en material suspendido o cuando son congregados en conjunto.⁶⁰

4.1 Características deseables de los métodos de desinfección del agua

Para que los desinfectantes sean apropiados sobretodo en aguas destinadas para el consumo humano, éstos tienen que satisfacer ciertos criterios generales:

⁶⁰ REYNOLDS, D, Tom. Unit Operations and Processes in Environmental Engineering, California, Editorial Wadsworth, 1982.

1. Destrucción e inactivación de los microorganismos patógenos en plazos razonables.
2. Fiabilidad en diversas condiciones en la que probablemente se encuentra el sistema de abastecimiento de agua.
3. Capacidad de mantener una concentración residual en el sistema de distribución del suministro de agua como resguardo en caso de que volviera a sufrir contaminación o el rebrote de microorganismos.
4. Debe ser razonablemente seguro y fácil de manejarse y aplicarse.
5. No debe introducir, producir sustancias tóxicas por encima de los valores guía establecidos, ni tampoco modificar las características del agua, haciéndola apropiada para el consumo humano.
6. Tanto el costo del equipo, es decir, su instalación, funcionamiento, mantenimiento y reparación, así como el costo de la compra y el manejo de los materiales que requieren para conseguir una dosificación eficaz deben ser razonables.⁶¹

4.2 Eficacia de los desinfectantes

Varios factores influyen en la eficacia de los desinfectantes del agua. Por consiguiente, es necesario comprender bien estos factores para calcular sus efectos en la desinfección y de igual manera controlarlos para aumentar la eficacia del proceso. Los factores que gobiernan su eficacia caen esencialmente dentro de las siguientes cinco categorías:

⁶¹ OMS. La Calidad del Agua Potable en América Latina, 1996.

1) *La naturaleza de los organismos que se van a destruir, su concentración, distribución y condición en el agua sujeta a desinfección.*

Las bacterias que no forman esporas son menos resistentes a la desinfección que las que sí los originan, pero las esporógenas generalmente carecen de importancia en la desinfección del agua. Generalmente la concentración de los organismos pierde importancia, a menos que sea tan elevada que la oxidación de la materia celular constituyente compita con el desinfectante. Para que el desinfectante alcance su máxima eficacia deben estar distribuidos uniformemente y moverse en el agua.

2) *La naturaleza, distribución y concentración de la sustancia desinfectante y de sus productos de reacción en el agua sujeta a desinfección.*

Para poseer un poder o intensidad media, los desinfectantes se deben encontrar distribuidos uniformemente en el agua y con la concentración recomendada para su efectividad.

3) *La naturaleza y condición del agua que se va a desinfectar.*

La materia suspendida puede proteger a los microorganismos que se encuentran contenidos en ella contra la desinfección química. La materia orgánica asimila a los productos químicos oxidantes. Mientras que otras sustancias reaccionan con los desinfectantes químicos cambiando su

estructura. Algunos de los compuestos resultantes pueden ser ineficientes y otros inocuos.

4) La temperatura del agua bajo desinfección.

Mientras más alta sea la temperatura, más rápida será la destrucción.

5) El tiempo de contacto.

A mayor tiempo, más amplia es la oportunidad para la destrucción. Bajo condiciones de flujo, el tiempo mínimo de desplazamiento es un factor relevante.

4.3 Métodos de desinfección

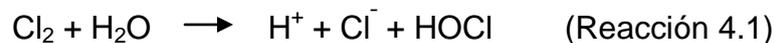
4.3.1 Métodos comunes

4.3.1.1 Cloro

El Cloro es el desinfectante más ampliamente usado debido a su efectividad a bajas concentraciones, barato y forma un residual cuando es aplicado a una dosis suficiente. Puede ser aplicado en forma de gas o como hipoclorito. El gas

es licuado de cinco a diez atmósferas y es envasado en cilindros de acero. El cloro líquido presionado (99.8 % de Cl₂) se encuentra disponible en cilindros de 100, 150 o 2000 libras del gas licuado. La habilidad de desinfección del cloro se debe a sus potenciales propiedades oxidantes, que oxidan las enzimas de las células microbianas que son esenciales para los procesos metabólicos de las células. El tiempo de contacto es un factor importante ya que involucra una mayor destrucción de microorganismos. Una dosis de 0,3 mg/l con un tiempo de contacto de 20 minutos es lo más recomendable para los suministros de agua potable.⁶²

En el agua, el cloro reacciona de la siguiente manera:



4.3.1.2 Por acción de la temperatura

El agua es llevada a su punto de ebullición para ser desinfectada. El agua se hierve durante 20 minutos para matar bacterias, virus y quistes contenidos en el agua, es más como una medida utilizada en situaciones de emergencia. Las desventajas que presentan es que no reduce partículas, compuestos orgánicos o inorgánicos ni mejora el sabor, el color ni el olor del agua.⁶³

⁶² REYNOLDS, D, Tom. Unit Operations and Processes in Environmental Engineering, California, Editorial Wadsworth, 1982.

⁶³ http://www.espring.com/ES/ibocenter/documents/eSpring_ProductGde_2_03.pdf

4.3.2 Métodos especiales

4.3.2.1 Desinfección mediante luz

La luz solar es un desinfectante natural, principalmente como agente desecante. La irradiación por luz ultravioleta intensifica la desinfección y la convierte en un agente controlable. Para que se garantice la desinfección, el agua debe encontrarse libre de sustancias capaces de absorber la luz. También debe ser adecuado el producto tiempo-intensidad de la exposición y el agua debe estar sujeta a una adecuada mezcla durante la exposición de películas relativamente delgadas de luz, todo esto con el objetivo de que se contrarreste su adsorbididad propia. La energía necesaria para destruir microorganismos oscila de $160-100000 \text{ uw} \cdot \text{seg}/\text{cm}^2$ dependiendo del tipo de microorganismo y el tiempo requerido de exposición es inversamente proporcional a la intensidad de la luz que penetra en el agua.

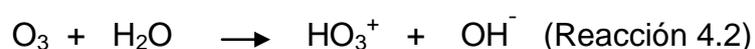
4.3.2.2 Desinfección por ozono

El ozono tanto en el aire como en el agua se descompone rápidamente en presencia de materia oxidable. El límite peligroso en la operación de plantas de tratamiento, se establece comúnmente a 0.2 mg de O_3 por m^3 de aire.

Si el ozono se emplea efectiva y eficientemente puede actuar como un desinfectante y decolorante del agua potable. A temperaturas normales, los residuales del ozono desaparecen del agua con rapidez.

Sólo en ausencia de materia orgánica el ozono sigue las leyes de los gases ideales, es decir, de aquellos que no reaccionan. El aumento de la presión total del sistema o de la presión parcial del ozono en el aire, aumentará la concentración de ozono en el agua en proporción a dichas presiones. Mientras que en presencia de sustancias oxidables, serán su naturaleza y concentración en el agua las que gobernarán la cantidad de ozono que pueda entrar. Si el ozono es considerado como desinfectante sus propiedades serán las que determinen una efectividad total o nula, implicando que produce una desinfección esencialmente nula por debajo de una concentración crítica pero también completa sobre dicha concentración.

Los costos de capital y de operación del equipo de ozonización no pueden competir con los del equipo de cloración para el tratamiento de una agua determinada, a menos que se requiera ozono y sea capaz de remover sabores y olores objetables en una forma más efectiva que el cloro combinado mediante la utilización de otros elementos como coagulantes, carbón activado y zeolitas. Las comparaciones de los costos de operación se derivan del gasto de energía y los productos químicos auxiliares en circunstancias específicas. La energía utilizada en la conversión de oxígeno atmosférico de 0.5 a 1% a ozono es de 0.025 a 0.030 kw/h por g de O₃. Si el agua va a ser decolorada y desinfectada la dosis requerida aproximadamente es de 2 a 4 mg por litro durante cuatro minutos.



4.3.2.3 Desinfectantes químicos

La exposición del agua, durante un lapso determinado de tiempo a productos químicos de las siguientes clases, en concentraciones adecuadas, dará por resultado su desinfección.⁶⁴

4.3.2.3.1 Productos químicos oxidantes

La acción biocida de los agentes oxidantes interfiere con la síntesis de la proteína en las células, resultando en la muerte de los microorganismos.⁶⁵ En este grupo se encuentran:

1. Los halógenos Cloro, Bromo y Yodo

El Bromo (Br_2) y el Yodo se caracterizan principalmente por actuar como potentes germicidas y se los emplea generalmente para la desinfección de aguas de piscinas. Aunque, el Yodo también es usado en pequeños sistemas de potabilización y en emergencias. Las dosis requeridas para la desinfección del agua van de 0,4 a 20 mg/l con períodos de 1 a 10 minutos dependiendo del

⁶⁴ GEYER, C, John. Purificación de Aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales, México, Editorial Limusa, 1989.

⁶⁵ <http://www.agualatinoamerica.com/NewsView.cfm?pkArticleID=115>

tipo de microorganismo. Sus principales limitaciones es el costo, y la susceptibilidad de algunas personas al yodo.⁶⁶

El dióxido de Cloro (ClO_2), es un compuesto inestable que tiene un poder oxidante alrededor de $2\frac{1}{2}$ veces mayor que el del cloro solo. Es efectivo en la eliminación de sabores y olores cuando es aplicado en cantidades entre 0.5 hasta 1.5 mg/lit por un período de 20 minutos. Debido a que el dióxido de cloro es tomado rápidamente por la materia orgánica que se encuentra en el agua, su uso está restringido para aguas no contaminadas que se puedan utilizar más completamente su capacidad bactericida.⁶⁷

2. Permanganato de Potasio y el Peróxido de Hidrógeno.

La desinfección por medio de compuestos químicos, está definida por la capacidad oxidante de un compuesto, la cual no es necesariamente una medida de su eficiencia desinfectante.⁶⁸

Los agentes oxidantes son imprescindibles para la degradación del contaminante ya que participan en la reacción de oxidación y son los responsables de una de las dos semireacciones que se forman en el proceso y cuanto más eficiente sea el oxidante mayor será la velocidad del proceso. La oxidación química oxida iones y compuestos químicos mediante agentes oxidantes haciéndolos menos peligrosos o más susceptibles de sufrir un

⁶⁶ http://www.coli.usal.es/Web/educativo/m_especial/15atexto2.htm

⁶⁷ HARDENBERGH, W, A. Ingeniería Sanitaria, México, Compañía Editorial Continental S.A, 1966.

⁶⁸ GEYER, C, John. Purificación de Aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales, México, Editorial Limusa, 1989.

proceso de destrucción o eliminación. Mediante el empleo de especies oxidantes muy fuertes se alcanza a oxidar completamente la materia orgánica. La oxidación se efectúa mediante la adición de un agente oxidante que a su vez es reducido en el proceso.⁶⁹

El peróxido de hidrógeno que es más conocido como agua oxigenada es extensamente usado gracias a sus muy buenas características. De hecho el H_2O_2 es un oxidante seguro, eficaz, de gran alcance y versátil principalmente se utiliza para el control del olor, corrosión, retiro de DBO/DQO, oxidación orgánica, oxidación de metales, oxidación de la toxicidad y desinfección. También no se forman subproductos y si se llegan a formar son a bajas concentraciones por lo que no representan ningún peligro.

Para lograr la desinfección se requiere una dosis de 8 a 30 mg/l con un tiempo de contacto de 15-20 minutos.

4.3.2.3.2 Alcalis y ácidos

Éstos ejercen un efecto bactericida y su acción desinfectante es proporcional al grado de disociación. Las bacterias patógenas no prevalecen por lapsos largos en aguas fuertemente alcalinas o fuertemente ácidas, es decir, a valores de pH

⁶⁹ http://www.eco-sitio.com.ar/ea_os_tratamiento_agua.htm

muy altos (>11) o muy bajos (<3).⁷⁰ Esto no se considera como condiciones adecuadas para agua de consumo humano.

4.3.2.3.3 *Productos químicos tensoactivos*

Los detergentes actúan como bactericidas porque destruyen la membrana celular alterando las interacciones entre las proteínas y los lípidos de la membrana. Se los puede dividir en tres grupos: aniónicos, catiónicos y no iónicos. Al grupo de los aniónicos pertenecen los jabones, las sales de sodio y de potasio de los ácidos grasos más grandes, alquilsulfatos como lauril-sulfato sódico, y los alquilbencenosulfonatos. El grupo de los catiónicos está constituido por compuestos de amonio cuaternario, y el grupo de los detergentes no iónicos incluye poliéteres y ésteres de poliglicerol. Hay una diferencia notable entre los detergentes aniónicos y catiónicos. Cuando se mezclan estos dos tipos de detergentes desaparece la actividad antibacteriana. Mientras que los no iónicos no producen este efecto; por ejemplo, pueden mezclarse con los del grupo catiónico y mantener su actividad antibacteriana. Los detergentes se han aplicado selectivamente como desinfectantes en las aguas de lavado y de enjuague que se utilizan en los establecimientos dedicados a la alimentación.

4.3.2.3.4 *Iones metálicos*

⁷⁰ http://www.coli.usal.es/Web/educativo/m_especial/15atexto2.htm

Los iones metálicos más activos son los de Cobre y plata y se caracterizan por ser bactericidas. Su actividad antibacteriana se debe a la formación de sales que se disocian con dificultad de los grupos sulfhidrilos de las proteínas. La desinfección es lenta a concentraciones bajas, constituyendo una limitante para su uso. Además, de ser costosa a las concentraciones que se utilizan. Las dosis requeridas comprenden valores de 0,001 a 5 mg/l.⁷¹

La selección de los métodos de desinfección apropiados requiere de un conocimiento completo de las condiciones del medio donde se pretende incorporarlo como son las enfermedades predominantes, los factores físicos, sociales, técnicos, económicos, la infraestructura y la gestión administrativa. Dependiendo de la capacidad con la que se dispone se puede determinar la factibilidad y las limitantes existentes. Por ejemplo, el costo y la complejidad de las técnicas que se emplean en los países desarrollados están fuera del alcance de las comunidades pequeñas de América Latina y el Caribe. Sin embargo, se pueden introducir en algunos de los procesos de tratamiento ya empleados en aquellos países a un costo moderado y un manejo sencillo.

4.4 Subproductos de la desinfección

La remoción e inactivación de los agentes patógenos microbianos en el agua para consumo humano es esencial para proteger a la población de brotes de enfermedades transmitidas por el agua. Los desinfectantes más comúnmente usados son cloro libre, cloraminas, dióxido de cloro y ozono. Cada uno de los

⁷¹ http://www.coli.usal.es/Web/educativo/m_especial/15atexto2.htm

desinfectantes que se emplean tiene sus ventajas e inconvenientes en función de su costo, eficacia, estabilidad, facilidad con que se aplique, y formación de subproductos de la desinfección.⁷²

Los subproductos de la desinfección se pueden formar cuando los desinfectantes, reaccionan con compuestos presentes en el agua de manera natural. La formación de estos productos se produce generalmente durante las reacciones con la materia orgánica como ácidos húmicos u otros. Estas sustancias acaban en el agua durante la descomposición de la materia orgánica.

Los tipos de subproductos de la desinfección que se pueden formar dependen de una serie de factores tales como:

- El tipo de desinfectante.
- La dosis de desinfección.
- La desinfección residual que queda en el agua

Mientras la dosis y los residuos de desinfección sean altos, existe mayor probabilidad de que se formen un mayor número de subproductos.⁷³

Y, si está presente materia orgánica los agentes de desinfección química pueden reaccionar con ésta, reduciendo la concentración efectiva del desinfectante. Entre otros factores que influyen sobre la desinfección cabe mencionar los siguientes:

⁷² OMS. La Calidad del Agua Potable en América Latina, 1996.

⁷³ <http://www.lenntech.com/espanol/Desinfeccion-del-agua/Factores-definfeccion-agua.htm>

Tiempo de reacción y concentración: Estos dos factores deben considerarse como mutuamente ligados, pues se toma en consideración la duración del período de reacción disponible para la desinfección, así como la cantidad y clase de elemento residual. Por ejemplo, si se utiliza cloro combinado éste debe proporcionarse con una mayor concentración actuando durante un tiempo mayor.

pH: El pH afecta la acción del desinfectante, particularmente la del cloro residual combinado. Por ejemplo, a un pH de 6.5 y una temperatura de 21°C, 0.3 mg/lit de cloro residual combinado causan un efecto letal de 100 por ciento en las bacterias. Es decir, mientras mayor sea el pH la concentración también debe aumentar.⁷⁴

Cuando los valores del pH son altos, se forma una mayor concentración de iones hipoclorito, disminuyendo así mismo la efectividad de la desinfección. A valores altos de pH, se forman mayores THM, mientras que a valores bajos de pH se forman mas HAN. A valores altos de pH los HAN y HK se descomponen por hidrólisis, debido al aumento de las reacciones de electrolisis. Cuando ocurre la hidrólisis muchos subproductos de la desinfección se vuelven trihalometanos.⁷⁵

⁷⁴ HILLEBOE, E, Herman. Manual de tratamiento de aguas, México, Editorial Limusa, 1991.

⁷⁵ <http://www.lenntech.com/espanol/Desinfeccion-del-agua/desinfectantes-subproductos.htm>

Temperatura: La temperatura afecta la acción de desinfección porque un incremento de temperatura resulta en una destrucción de microorganismos más rápida.⁷⁶

Cuando el tiempo de reacción es corto, se pueden formar grandes concentraciones de trihalometanos (THM) y ácidos acéticos halogenados (HAA). Cuando el tiempo de reacción es mayor, algunas formas de subproductos de la desinfección se transforman en productos desinfectantes, como ácido acético tribromo o bromoformo.

En cambio, cuando la temperatura aumenta, las reacciones suceden más rápidamente, requiriendo una mayor concentración de cloro para la desinfección adecuada. Esto a su vez genera una mayor cantidad de subproductos de la desinfección. Un aumento de temperatura también asegura la descomposición de ácidos acéticos tribromo, haloacetonitrilos (HAN) y halocetonas (HK).

Las concentraciones y propiedades de la materia orgánica naturalmente contenida en el agua (NOM) son los predecesores de los subproductos de la desinfección.

⁷⁶ OMS. La Calidad del Agua Potable en América Latina, 1996.

El nivel de materia orgánica generalmente se determina mediante los siguientes parámetros:

Grupo 1: Parámetros que miden la demanda de oxígeno

- Demanda teórica de oxígeno (ThOD)
- Demanda química de oxígeno (DQO)
- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- Demanda total de oxígeno (TOD)

Grupo 2: Parámetros que miden el contenido de carbón

- Carbono orgánico teórico (ThOC)
- Carbono orgánico total (COT o TOC).

Las estaciones influyen de manera natural en la concentración de carbón orgánico, causando la variación de subproductos de la desinfección. La concentración de subproductos de la desinfección en aguas superficiales y subterráneas puede variar.

De igual manera la composición y concentración de materia orgánica presente en el agua determina el tipo y concentración de subproductos de la desinfección que se formarán. La materia orgánica suele contener compuestos como ácidos hidrofóbicos, sustancias hidrofóbicas neutras, ácidos transfílicos, sustancias neutras transfílicas, ácidos hidrofílicos, sustancias neutras

hidrofílicas.⁷⁷ Así como ácidos húmicos y fúlvicos, que son cadenas de C, H y O unidas a átomos de hidrógeno y a otros grupos químicos. Se diferencian en tamaño, color y en ciertos aspectos de su composición. Principalmente se caracterizan por ser productos de la descomposición de la materia orgánica y son parte del complejo de compuestos orgánicos del suelo, de naturaleza muy particular y distinta a la de cualquier sustancia vegetal. Respecto a los ácidos húmicos y los ácidos fúlvicos poseen un porcentaje de carbono significativamente más bajo (menos del 55%) y el de hidrógeno es superior al de los ácidos húmicos y fúlvicos.⁷⁸

4.4.1 Cloro y sus subproductos

El cloro es el desinfectante de agua potable más comúnmente usado. Entre todos los desinfectantes, la química y la toxicidad de los SPD del cloro han sido las más ampliamente estudiadas. Desde el descubrimiento de la formación de haloformos durante la cloración del agua potable, se han identificado numerosos compuestos halogenados y se ha evaluado su toxicidad.

Es difícil calcular con precisión la exposición de la población a los compuestos orgánicos halogenados del agua potable. La exposición a éstos compuestos depende de la concentración del cloro, la sustancia orgánica, el pH, el tiempo de contacto, la cantidad de agua consumida, la tasa de volatilización y la inhalación.

⁷⁷ <http://www.lenntech.com/espanol/Desinfeccion-del-agua/desinfectantes-subproductos.htm>

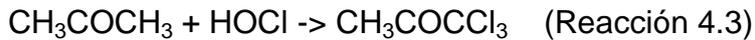
⁷⁸ <http://www.disper.info/docesp/doAlghumEsp.pdf>

Los SPD del cloro más comúnmente encontrados son los que a continuación se describen:

4.4.1.1 Cloro: Ya que el cloro libre en el agua potable no es particularmente tóxico para los seres humanos, el valor guía establecido por la OMS es de 5 mg/litro para el cloro residual (la suma del ácido hipocloroso y el ión hipoclorito) en función de la salud. Los servicios públicos de agua deben agregar solo una apropiada concentración de cloro, que sea suficiente para inactivar los agentes patógenos transmitidos por el agua, teniendo en cuenta la fuente del agua, temperatura, pH y tiempo de contacto.

4.4.1.2 Trihalometanos: Los SPD del cloro que predominan son los trihalometanos aunque, tan sólo representan sólo un 10 % de los compuestos totales de halógeno orgánico formados por la cloración de agua. Estos compuestos se forman por la cloración acuosa de sustancias húmicas, compuestos solubles secretados de las algas y compuestos nitrogenados que aparecen naturalmente y consisten principalmente de cloroformo, bromodiclorometano, dibromoclorometano y bromoformo.

4.4.1.2.1 Cloroformo: Es uno de los principales productos reactivos de la desinfección con cloro y en menores concentraciones puede formarse por desinfección con cloramina. Para el cloroformo se recomienda un valor guía de 0,2 mg/l.



4.4.1.2.2 Trihalometanos bromados: La formación de THM bromados depende de la presencia de bromuro en el agua sin tratar. Por lo general, las concentraciones varían de 0,001 a 0,05 mg/l para el bromodiclorometano, 0,001 a 0,02 mg/l para el dibromoclorometano y 0,001 a 0,01 mg/l para el bromoformo.



4.4.1.3 Ácidos acéticos halogenados: Los ácidos acéticos halogenados se forman a partir de la materia orgánica durante la cloración del agua. Aunque no se han estudiado tan a fondo como los THM, son probablemente los principales subproductos de la cloración del agua potable.

Los niveles típicos de los ácidos acéticos clorados en los suministros de agua potable varían de 0,03 a 0,15 mg/l.

Mecanismos de reacción:



4.4.1.4 Acetonitrilos halogenados: Estos compuestos son formados por

algas, sustancias húmicas y material proteínico. Los acetonitrilos bromados se forman cuando el bromuro está presente en el agua durante la cloración. El más abundante de los acetonitrilos es el dicloroacetonitrilo.



4.4.1.5 Hidrato de cloral (tricloroacetaldehído): Se forma como subproducto de la reacción del cloro con sustancias húmicas. También se puede producir en el agua a partir de descargas industriales. Las concentraciones usuales como resultado de la cloración son de aproximadamente 0,002 mg/l. Los niveles de hidrato de cloral aumentan con la pre-ozonación y disminuyen con la cloraminación.

4.4.1.6 Clorofenoles: Se forman a partir de la reacción del cloro con compuestos fenólicos, tales como biocidas así como de productos de la degradación de herbicidas del grupo fenoxi.

4.4.2 Cloraminas y sus subproductos

Las cloraminas se forman por la reacción del cloro y el amoníaco o las aminas orgánicas. Se pueden formar mono, di y tricloraminas según la relación del cloro con el amoníaco, el pH y la temperatura del agua.

El principal subproducto de la reacción de la cloraminación es el cloruro de cianógeno (CNCL), el cual se metaboliza rápidamente en cianuro en el cuerpo y en consecuencia el valor guía está basado en el efecto tóxico del cianuro.



4.4.3 Dióxido de cloro y sus subproductos

Se genera ClO_2 por la reacción del clorito de sodio y el cloro o por la acidificación de una fuerte solución de clorito de sodio. Las reacciones del dióxido de cloro son sustancias húmicas que generalmente no producen niveles significativos de THM. Los principales SPD por dióxido de cloro son el clorato y el clorito. Las concentraciones de clorito y clorato en el agua varían de 0,1 a 3,0 mg/l.

Entre otros subproductos de la reacción del dióxido de cloro con las sustancias orgánicas en el agua potable se encuentran: clorofenoles, p-benzoquinona y los ácidos maleico, fumárico y oxálico. El dióxido de cloro es más eficaz que el cloro libre para la inactivación de los quistes de *Giardia*, pero es menos eficaz para los *rotavirus* y *E. Coli*. A diferencia del cloro, la eficacia de la desinfección con dióxido de cloro es independiente del pH y de la presencia de amoníaco.



4.4.4 Ozono y sus subproductos

Entre los subproductos de la ozonización que se han identificado se encuentran aldehídos, ácidos carboxílicos, peróxido de hidrógeno, bromato, bromometanos, ácidos acéticos bromados, acetonitrilos bromados y cetonas. Los valores guía recomendados para el bromato es de 0,025 mg/l y para el formaldehído es de 0,9 mg/l. El ozono es el desinfectante más eficaz para todo tipo de microorganismos. Pero sus desventajas son, la ausencia de un residual desinfectante, problemas de rebrote biológico en los sistemas de distribución, elevado costo, limitada información sobre la naturaleza y la toxicidad de sus subproductos.⁷⁹

4.5 Control de subproductos de desinfección

Mantener una desinfección adecuada es una necesidad absoluta. Pero también se pueden realizar algunas acciones para reducir los niveles de SPD sin comprometer la eliminación de los agentes microbianos presentes en el agua. La capacidad para reducir dichos riesgos depende de algún modo de la situación económica.

Existe la posibilidad de emplear técnicas de tratamiento que maximicen la seguridad y calidad del agua potable mientras se minimiza el riesgo de formación de los SPD. Uno de los mejores métodos para controlar los SPD de

⁷⁹ OMS. La Calidad del Agua Potable en América Latina, 1996.

cualquier proceso de desinfección es eliminar los precursores orgánicos antes de la desinfección. Otros métodos convencionales incluyen el cambio del punto de cloración, usando cloramina en el sistema de distribución, aunque esto pueda conducir a aumentos inadmisibles del riesgo microbiano. De acuerdo a un informe del Comité de Calidad del Agua de la American Water Works Association (AWWA) se identificó tres procedimientos eficaces para reducir la formación de SPD mediante la remoción de precursores orgánicos mostrados a continuación:

Coagulación y clarificación: Los precursores se eliminan cuando los químicos utilizados para la coagulación tales como las sales de hierro se usan para el control de turbiedad. La remoción adicional de precursores se logra generalmente al reducir el pH antes de o durante el agregado de estos coagulantes.

Adsorción: Los procesos de adsorción se han usado con éxito en algunas aplicaciones para extraer el material de desinfección del precursor del subproducto. La capacidad de adsorción de sustancias orgánicas disueltas y para micro contaminantes que tienen ciertos elementos como el carbón activado y las zeolitas se han vuelto sumamente útiles para este tipo de usos.

Tecnología de membrana: Las membranas se han usado desde hace mucho para desalinizar las aguas salobres. El proceso usa la presión hidráulica para forzar al líquido a pasar a través de una membrana semipermeable. Se ha

demostrado que con esta tecnología se remueven con éxito los precursores de THM.

Muchas de estas tecnologías pueden tener un costo excesivo en los países en desarrollo. Si ese es el caso, cabe recalcar la importancia de mantener una desinfección adecuada.⁸⁰

4.6 Tecnologías de desinfección actualmente utilizadas en los países de América Latina y el Caribe.

Uno de los métodos más utilizados para la desinfección del agua es la cloración gaseosa ya que es el menos costoso y se puede conseguir fácilmente grandes cantidades de cloro gaseoso licuado y se caracteriza por un exitoso historial. La cloración gaseosa es la etapa final de desinfección en la mayoría de las principales plantas de tratamiento que producen agua para abastecer a los municipios y también se emplea donde existen acuíferos apropiados, para desinfectar el agua producida por pozos que alimentan a tanques de almacenamiento o que se conectan a los sistemas de distribución de agua.

La segunda tecnología más utilizada para la desinfección es la aplicación de soluciones de hipoclorito como proceso de tratamiento final antes de distribuir el agua a los usuarios. Existen muchas formas de aplicarlo como a través de tabletas, bombas u otros dispositivos.

⁸⁰http://www.americanchemistry.com/s_chlorine/sec_content.asp?CID=1198&DID=4552&CTYPEID=107

Los métodos restantes de desinfección empleados en las fuentes comunitarias de suministro de agua no representan más del 1 % del total del agua desinfectada para consumo humano. Esto incluye el uso de ozono, dióxido de cloro, luz ultravioleta y los oxidantes mezclados.

4.7 Costos de la desinfección de los sistemas de agua comunitarios

El costo de la desinfección de agua es tan bajo y su importancia para la salud pública es tan grande, que es difícil hallar una razón válida para no desinfectar todos los sistemas de agua comunitarios. El costo de la desinfección varía considerablemente según el tipo de desinfectante usado, el método de dosificación, la capacidad de la infraestructura y la ubicación de la fuente de suministro de agua a desinfectar.

Los costos de desinfección mediante el uso de ozono y radiación ultravioleta no se han determinado con precisión en los países de América Latina y el Caribe, pero con respecto a los costos de los equipos, mantenimiento, infraestructura, los costos de energía y de mano de obra y el hecho de que en ambos casos se necesita un desinfectante secundario para proporcionar un residual efectivo, se estima que dichos métodos son 3 ó 4 veces más costosos que la cloración.

Durante los últimos diez años, varios países de América Latina y el Caribe han reunido datos sobre los costos de la desinfección con oxidantes mixtos. Los

datos señalan que los costos oscilan entre 0,8 y 1,8 veces el valor de la desinfección mediante el uso de cloro gaseoso.

4.8 Causas de la falta de desinfección

Durante los últimos 12 años, la OPS ha llevado a cabo varios estudios e investigaciones de las causas por las que los sistemas comunitarios de agua en América Latina y el Caribe no se desinfectan. A continuación se enumeran las causas con mayor frecuencia:

1. Falta de compromiso político.
2. Falta de comprensión de las razones por las que la desinfección del agua es importante.
3. Falta de recursos económicos.
4. Imposibilidad de conseguir repuestos y equipos de reemplazo.
5. Insuficiente capacidad técnica para las tareas de operación, mantenimiento y reparación.
6. Instalaciones de desinfección mal diseñadas y equipos mal instalados o de mala calidad.
7. Selección del equipo o la tecnología de desinfección no apropiada.
8. Sistemas de vigilancia y monitoreo inadecuados.
9. Excesiva preocupación debida a la formación de SPD.
10. Fallas de la energía eléctrica.
11. Pre-tratamiento inadecuado del agua antes de la desinfección

Una de las estrategias para eliminar estas barreras es el mejoramiento de la tecnología y fortalecimiento de la capacidad técnica. Estas medidas son importantes para mejorar la eficiencia y fiabilidad de la desinfección, pero sólo resultan eficaces en el contexto de un adecuado compromiso político y social.⁸¹

5. Tamices Moleculares

Son materiales microporosos cuyo comportamiento catalítico se debe a la presencia de centros activos de elevada acidez, que permiten catalizar un gran número de reacciones de gran interés.⁸² Los materiales porosos forman una clase extremadamente importante de componentes que tienen un uso anual de 1.6 toneladas métricas, son una área de investigación que está

⁸¹ OMS. Informe Regional sobre la Evaluación 2000 en la Región de las Américas, 2000.

⁸² <http://www.serina.com.es/escaparete/verproducto.cgi?idproducto=3701&refcompra=NULO>

creciendo rápidamente con muchos nuevos materiales, modificaciones, propiedades y aplicaciones que están siendo investigadas y desarrolladas, evidencia de esto es el gran número de publicaciones que han aparecido últimamente. Estos materiales se caracterizan por contener cavidades interconectadas o canales con poros de dimensiones moleculares que facilitan el intercambio catiónico y tienen una distribución del tamaño de los poros extremadamente reducida, denominados tamices moleculares.

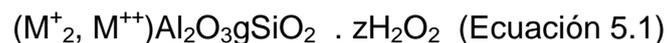
Los canales y las cavidades interconectadas están arregladas para formar sistemas de poros de una, dos o tres dimensiones en el material. También se caracterizan por su gran superficie de área interna (generalmente mayor a $300 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$) y el volumen vacío ($> 0.1 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$) lo cual significa que sitios altamente activos son formados cuando los centros funcionales están dispersos sobre la superficie del área, éstas propiedades permiten que sean particularmente útiles en las áreas de catálisis, intercambio iónico y separación (tamizado molecular y adsorción). El tamaño y uniformidad de los poros en el material les permite separar diferentes moléculas de sus respectivas geometrías. Esta propiedad es denominada selectividad de forma y determina cuáles moléculas pasan a través o cuales se forman en el material controlando que moléculas reactantes pueden entrar al material microporoso (selectividad reactante), cuál producto puede dejar el material (selectividad de producto) o la geometría del estado de transición que es formado en el material (selectividad de estado de transición).

5.1 Tipos

5.1.1 Zeolitas

Las zeolitas son miembros de una familia de minerales llamados tectosilicatos, que incluyen materiales de fases densas tales como los feldespatos y varias formas de silicea.⁸³ Naturalmente se forman a temperaturas menores de 200°C en una variedad de rocas volcánicas, en suelos salinos y alcalinos, en áreas geotérmicas y en sedimentos marinos como resultado de un grado muy bajo de metamorfismo. Su estructura tridimensional consiste de un tetraedro $[\text{AlO}_4]^{-5}$ y unidades de $[\text{SiO}_4]^{-4}$ que se unen a través de oxígenos compartidos y los compuestos.⁸⁴ Los microporos de las zeolitas están clasificados de acuerdo con su tamaño: poros pequeños ($<4\text{Å}$), medios (4-6Å), grandes (6-8Å) y supergrandes ($> 8\text{Å}$).⁸⁵

La fórmula empírica de las zeolitas es:



Donde M^+ es usualmente Na o K, M^{2+} es Mg, Ca o Fe y g y z son variables multiplicadores.⁸⁶

La estructura resultante muestra una red de carga negativa en la estructura del aluminio. Esta carga es balanceada por cationes que se encuentran en los espacios de la estructura los cuales principalmente se caracterizan por ser móviles y libres de intercambio. El tipo de catión presente no sólo influye en las

⁸³ CORMIER, E, William. Chemical Engineering Progress, 1999.

⁸⁴ www.scilet.com

⁸⁵ LUNA, J, Fernando. Modificação de Zeólitas para uso em catálise, 2000.

⁸⁶ CHRISTIE, Tony. New Zealand Mining, 2002.

propiedades de intercambio iónico sino también como un factor de las propiedades de adsorción y catálisis.⁸⁷

Debido a que las moléculas de agua son retenidas en los poros la mayoría de las zeolitas pueden ser reversiblemente deshidratadas y sus cationes están listos para ser intercambiados. Muchas zeolitas pierden agua después de alcanzar una temperatura de 150 a 400°C sin colapsar la estructura y puede reabsorberlo de la atmósfera a la temperatura ambiente.

Las zeolitas tienen un número de propiedades características que son importantes para sus aplicaciones tales como:

1. Alto grado de hidratación y fácil deshidratación.
2. Baja densidad y gran volumen vacío cuando están deshidratadas.
3. Estabilidad de la estructura de cristal cuando están deshidratados.
4. Propiedades de intercambio de cationes.
5. Tamaño molecular uniforme de los canales en los cristales deshidratados.
6. Habilidad para absorber gases y vapores.
7. Propiedades catalíticas en las formas de H⁺ intercambiado.
8. Propiedades especiales eléctricas.⁸⁸

Hoy en día, se conocen al menos 100 diferentes formas de zeolitas. El gran rango de las composiciones de sus estructuras y la alta estabilidad térmica se

⁸⁷ CORMIER, E, William. Chemical Engineering Progress, 1999.

⁸⁸ CHRISTIE, Tony. New Zealand Mining, 2002.

acopla con las propiedades generales que poseen cada una de éstas. Por otro lado, una de las mayores investigaciones que en los últimos años se ha ido expandiendo, es la introducción de grupos/componentes orgánicos en la estructura de las zeolitas. La incorporación de éstos componentes conllevan varios beneficios que incluye un incremento de la capacidad hidrofóbica, la habilidad de controlar la funcionalidad del material final simplemente modificando los componentes orgánicos y para racionalizar el diseño del tamaño de los poros y de la estructura.⁸⁹

Algunos de los tipos de las zeolitas que se pueden mencionar son: Chabazita, Clinoptilolita, Heroinita, Mordenita, Estilbita, Ferrierita, Filipsita, Heulandita, Laumantita y entre otros más.

Estos minerales se utilizan en muchas ramas de la ciencia y la tecnología. Su aplicación adecuada requiere de la caracterización precisa de sus propiedades superficiales y estructurales, además del conocimiento del comportamiento fisicoquímico de los fluidos cuando se encuentran dentro de los poros.⁹⁰

Las zeolitas han sido aplicadas en el sector agrícola como acondicionadores y fertilizantes de suelos, suplementos nutritivos de animales, para el control de residuos de granjas al igual que en la acuicultura, catálisis y refinado de petróleo, gasificación del carbón. En cuanto a las aplicaciones ambientales se incluye el tratamiento de aguas residuales, la potabilización del agua y otros

⁸⁹ www.scilet.com

⁹⁰ http://www.tdx.cesca.es/TESIS_URV/AVAILABLE/TDX-0602103-142815//TesisPhD.pdf.

usos para el control de la contaminación como la adsorción de metales pesados y la purificación de aire y gas.⁹¹

5.1.2 Carbón activado

Es un término general que denomina a toda una gama de productos derivados de materiales carbonosos como por ejemplo cáscaras de nuez, madera, carbón mineral. Generalmente se produce por dos métodos diferentes:

1. **Activación química:** Se logra mediante la adición de productos químicos o sustancias deshidratantes (ácido fosfórico, cloruro de cinc, hidróxido potásico, etc.) y se mezcla con la materia prima para someterse a un tratamiento a temperaturas moderadas.
2. **Activación del vapor:** El material carbonizado se trata con una mezcla de gases de combustión y vapor de agua a una alta temperatura para que se active.

El carbón activado se caracteriza por su estructura cristalina y por una composición del 75-80% de carbono, 5-10% de cenizas, 60% de oxígeno y el 0,5% de hidrógeno. La superficie específica y las dimensiones de los poros dependen del precursor y de las condiciones de los procesos de carbonización y activación utilizados. Los tamaños de los poros van desde los más pequeños, llamados microporos (hasta 2,0 nm), hasta los mesoporos (de 2,0 a 50 nm) y macroporos (mayores de 50 nm). Hay que tener en cuenta que aunque la

⁹¹ CHRISTIE, Tony. New Zealand Mining, 2002.

mayor parte de la adsorción tiene lugar en los microporos (responsables de más del 90% de la superficie específica), los mesoporos y los macroporos son extraordinariamente importantes en los carbones activados, porque son los que facilitan el acceso de las especies que se van a adsorber al interior de la partícula y a los microporos.⁹²

Es un material que tiene un área superficial excepcionalmente alta mayor a 500 m²/g y pudiendo alcanzar valores entre 1000 m²/gy 2500 m²/g. El proceso de activación actúa eficientemente al mejorar y aumentar el area superficial

Sin embargo, las propiedades adsorbentes de un carbón activado no sólo están definidas por su estructura porosa, sino también por su naturaleza química. El carbón activado presenta en su estructura átomos de carbono con valencia insaturada y, además, grupos funcionales (principalmente de oxígeno y nitrógeno) y componentes inorgánicos responsables de las cenizas, todos ellos con un efecto importante en los procesos de adsorción. Los grupos funcionales se forman durante el proceso de activación por interacción de los radicales libres de la superficie del carbón con átomos tales como oxígeno y nitrógeno, que pueden en parte provenir del precursor o de la atmósfera.

El carbón activado es un adsorbente muy versátil, porque el tamaño y la distribución de sus poros en la estructura carbonosa pueden ser controlados para satisfacer las necesidades de la tecnología actual y futura. Más aún, las necesidades específicas de la industria pueden ser satisfechas

⁹² CHEETHAM, A, K. Very open microsporous materials: from concept to reality, 2001.

mediante la posibilidad de preparar estos materiales con una gran variedad de formas físicas, tales como polvo, granular, extrusionado, fibra, fieltro e incluso tela. Entre algunas de las aplicaciones se pueden mencionar: purificación de agua, aire y gases, decoloración de vinos, zumos, azúcar, caramelo, extracción de metales y para fines médicos para tratar envenenamientos y sobredosis.⁹³

5.1.3 Puzolanas

Son materiales de silicio o silicio de aluminio. Las puzolanas por sí solas poseen poco o ningún valor cementante pero al ser finamente divididas y en presencia de humedad reaccionan con el Hidróxido de Calcio por lo que su principal aplicación radica en la industria de materiales de construcción ya que son empleadas para la preparación de mezclas para cemento en morteros, enlucidos, obras de mampostería, cimientos y obras de concreto. Básicamente hay dos tipos de puzolana, llamadas puzolanas naturales y artificiales.

5.1.3.1 Puzolanas naturales: Son esencialmente son cenizas volcánicas de actividades volcánicas geológicamente recientes. Aunque los compuestos químicos son similares, el material vidrioso formado por el lanzamiento violento de la magna fundida en la atmósfera es más reactiva con la cal, que la ceniza volcánica formada por erupciones menos violentas. A menudo se las encuentran como cenizas finas, pero también en forma de grandes partículas o tufos (ceniza volcánica solidificada), que deben ser triturados para emplearse como puzolana.

⁹³ KARGE, H, G. Molecular Sieves: Science and Technology, Editorial Springer, New Cork, 1998.

5.1.3.2 Puzolanas artificiales: Son el resultado de diversos procesos industriales y agrícolas, generalmente como subproductos. Las puzolanas artificiales más importantes son arcilla cocida, cenizas de combustible pulverizado (ceniza volante), escoria de altos hornos granulada y molida (ggbfs) y ceniza de cáscara de arroz (RHA).

Arcilla Cocida, se forma cuando los suelos arcillosos son horneados, de manera que las moléculas de agua se liberan, dando lugar a un material cuasi-amorfo reactivo con la cal. En el caso de los suelos que contienen muy poca arcilla y demasiada arena, se cortan y se extraen en bloques formando pozos circulares. El residuo obtenido al quemarlo es muy desmenuzable y no necesita pulverización.

Ceniza volante, se forma cuando el carbón de piedra finamente molido es inyectado a gran velocidad con un chorro de aire caliente (1500°C) en un horno. El contenido carbónico se quema instantáneamente, y la materia restante (sílice, alúmina y óxido de hierro) se funde en suspensión, formando finas partículas esféricas por el rápido enfriamiento mientras son llevados por los gases de combustión. Dependiendo del tipo de carbón de piedra las cenizas contienen diversas proporciones de cal.

Escoria de Alto Horno Granulada Molida, es un material fundido que se asienta sobre el lingote de arrabio en la parte inferior de un horno es producida por los diversos componentes en un horno cuando se llega de los 1400° a 1600°C.

El enfriamiento lento de la escoria genera un material cristalino mientras que un enfriamiento rápido con aire o agua bajo presión forma pelotillas vidriosas (escoria expandida > 4 mm) y gránulos menores de 4 mm que poseen propiedades hidráulicas cuando se muelen finamente.

Ceniza de Cáscara de Arroz, la combustión de los residuos agrícolas elimina la materia orgánica y, en la mayoría de los casos, produce una ceniza rica en sílice. De los residuos agrícolas comunes, la cáscara de arroz produce una ceniza de mayor cantidad (alrededor del 20% del peso) con un contenido de sílice de alrededor del 93% del peso. La temperatura y duración de la combustión son importantes en la producción de la ceniza de cáscara de arroz. La sílice amorfa se obtiene quemando la ceniza a una temperatura menor de 700°C y la sílice cristalina se obtiene a temperaturas mayores de 800°C.⁹⁴

5.1.4 Bentonita

Es una roca compuesta de minerales de arcilla, especialmente del grupo de la montmorillonita, integrado por silicatos de aluminio magnesico formada por la alteración de partículas vitreas de las tobas y volcanes. Las puzolanas son usadas para cubrir los escapes de los pozos de petróleo, suspender metales pesados, sirve como agente de unión para arenas de moldeos en las fundiciones, lubricante, adsorbente de grasas y aceites, coagulante, catalizador, etc.

⁹⁴ <http://sleekfreak.ath.cx:81/3wdev/CONMATES/SK01MS09.HTM>

Existen dos tipos de bentonitas:

5.1.4.1 Bentonita Sódica: Contiene un alto nivel de iones de Sodio y es capaz de absorber grandes cantidades de agua pudiendo expandir su volumen hasta 20 veces por lo que es el tipo de bentonita más utilizada.

5.1.4.2 Bentonita Cálcica: El catión intercambiable predominante es el Calcio y sólo expande su volumen hasta 5 veces.⁹⁵

5.2 Propiedades químicas

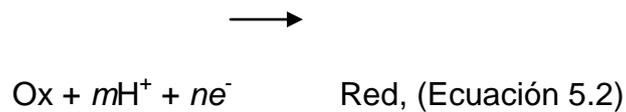
5.2.1 Reacción Oxido-Reducción y potenciales

Las reacciones químicas de los minerales envuelven algunas combinaciones de transferencia de protones y electrones. La oxidación ocurre si hay una pérdida de electrones en el proceso de transferencia mientras que la reducción ocurre si hay una ganancia de electrones. El componente oxidado es el electrón aceptante y el componente reducido es el electrón donante.

Los electrones no están libres en la solución del medio, es por eso, que el oxidante debe estar en contacto con el reductante. Tanto la oxidación como la reducción deben ser consideradas para describir completamente las reacciones redox.

Las reacciones redox de medios oxidantes pueden ser definidos convencionalmente por la siguiente reacción:

⁹⁵ CHEETHAM, A, K. Very open microsporous materials: from concept to reality, 2001.



Donde Ox es el compuesto oxidado o el electrón aceptante, Red es el compuesto reducido o electrón donante, m es el número de iones de hidrógeno que participan en esta reacción. El electrón en la ecuación anterior debe ser proporcionado por una reacción media de oxidación. Por lo tanto, para describir completamente una reacción redox, una reacción de oxidación debe balancear la reacción de reducción.

Los potenciales redox pueden ser útiles en caracterizar el estado de oxidación-reducción. De igual manera pueden ayudar a predecir cuando las condiciones de reducción empezarán debido al agotamiento de oxidantes tales como oxígeno y nitrato, y el inicio de las condiciones de oxidación cuando el oxígeno es reintroducido en el medio.

Los datos de redox también son útiles para entender la morfología de los minerales. El color y el grado de manchas de diferentes colores o sombras de un color diferente al color dominante pueden revelar mucho sobre su estado de humedad.

5.2.2 Intercambio iónico

Las mayores fuentes de intercambio iónico son los minerales arcillosos, la materia orgánica y los minerales amorfos. La capacidad de intercambio iónico es importante para determinar la capacidad de retener iones en una forma en la que estén disponibles para ser captados.

El intercambio iónico envuelve las interacciones electroestáticas entre un counterion en la superficie de una partícula cargada y counteriones en una nube difusa alrededor de la partícula cargada. Se caracteriza por ser usualmente rápida, es una difusión controlada, reversible, estequiometrica y en la mayoría de los casos hay algo de selectividad de un ión sobre otro por la superficie intercambiable. La estequiometría significa que cualquier de los iones que abandona la superficie coloidal es reemplazado por una cantidad equivalente de otros iones debido a los requerimientos de electroneutralidad. Cuando un ión es desplazado de la superficie, el intercambiador tiene un déficit en la carga de counteriones que debe ser balanceada por counteriones en la nube del ión difuso alrededor del intercambiador.

La tasa de intercambio de iones depende del tipo y cantidad de compuestos orgánicos e inorgánicos, de la carga y el radio del ión que es considerado. Generalmente, la tasa de intercambio de iones disminuye a medida que las especies intercambiables aumentan.⁹⁶

⁹⁶ SPARKS, L, Donald. Environmental Soil Chemistry, San Diego, Editorial Academic Press, 1995.

5.2.3 Adsorción

La adsorción es la recolección de una sustancia en la superficie de los sólidos adsorbentes. Puede ser clasificada como:

Adsorción física: Se debe principalmente a las fuerzas de Van Der Waals y es un proceso reversible. Cuando las fuerzas de atracción moleculares entre el soluto y el adsorbente son mayores que las fuerzas de atracción entre el soluto y el solvente, el soluto será adsorbido sobre la superficie adsorbente.

Adsorción química: Una reacción química ocurre entre el sólido y el soluto adsorbido y la reacción es usualmente irreversible.

La isoterma de Freundlich, la cual es una formulación empírica, frecuentemente representa el equilibrio de adsorción sobre un rango limitado en la concentración de soluto.

Una forma de la ecuación es:

$$\frac{x}{m} = X = KC_e^{1/n} \quad (\text{Ecuación 5.3})$$

Donde x , es la masa de soluto adsorbido; m la masa de adsorbente; X , es la masa del soluto adsorbido por masa de adsorbente; C_e , concentración de equilibrio del soluto, masa/volumen; K y n , constantes experimentales

Otra isoterma que frecuentemente representa el equilibrio de adsorción, es la isoterma Langmuir, que es:

$$\frac{x}{m} = X = \frac{aKC_e}{1 + KC_e} \quad (\text{Ecuación 5.4})$$

Donde a es la masa de soluto adsorbido requerido para saturar completamente una unidad de masa de adsorbente y K una constante experimental

La isoterma Langmuir asume que: (1) hay un área disponible limitada para la adsorción, (2) El material del soluto adsorbido en la superficie es solo una molécula en espesor y (3) la adsorción es reversible y una condición de equilibrio es alcanzada. Cuando el adsorbente es colocado en una solución, el soluto es absorbido y también ocurre la desorción pero la tasa de adsorción es mucho mayor que la tasa de desorción. Finalmente, una condición de equilibrio es lograda cuando la tasa de adsorción es igual a la tasa de desorción. La tasa de adsorción está limitada por uno de los varios mecanismos de transporte de masa envueltos.⁹⁷

La adsorción es un proceso cuya eficiencia depende de las propiedades superficiales de la matriz absorbente y de las pequeñas partículas que son absorbidas. Hay dos factores en la adsorción de una partícula, su habilidad de adherirse a la matriz cuando entra en contacto y su capacidad de transportarse a una posición donde ni siquiera contacta la superficie o se acerca suficiente para ser atraída.

⁹⁷ REYNOLDS, D, Tom. Unit Operations and Processes in Environmental Engineering, California, Editorial Wadsworth, 1982.

El método de adhesión de las partículas es similar al proceso de coagulación que ocurre por la adición de reactivos químicos que forma parte de los procesos de tratamiento de agua. Una pequeña partícula cercana a una superficie sólida está sujeta a una atracción eléctrica o repulsión (dependiendo de las cargas de la superficie desarrolladas por ambas la partícula y la superficie cuando entra en contacto con el agua) y a la atracción causada por las fuerzas de Van Der Waals. También está sujeto a fuerzas hidráulicas que resultan del movimiento del agua. El sustrato sólido en el cual la adsorción ocurre es llamado adsorbente o sorbente. Las especies adsorbentes es el adsorptivo y el material adsorbido es el adsorbato o simplemente sorbato.

El tamaño del poro juega un rol importante en determinar que componentes pueden ser retenidos por un adsorbente dado, las moléculas que son demasiado grandes para acoplarse en las aperturas de un poro dado no puede ser efectivamente adsorbido. La superficie de área específica, quiere decir que el área de un gramo de adsorbente (m^2/g), está basado en el área promedio ocupada por una molécula del material absorbido.

Los factores que afectan la capacidad de un adsorbente incluyen la superficie de área, el tamaño del poro y su polaridad. Las capacidades de adsorción están en un rango de 0.1 a 0.6 gramos de material adsorbido por un gramo de adsorbente, es decir, del 30 al 40% de aquellos indicados por las isothermas de equilibrio. Los factores que determinan la capacidad de adsorción para ser menores que los valores de equilibrio incluyen el espesor de la zona de

adsorción, el calor liberado durante la adsorción y la competencia de humedad para los sitios activos.

5.2.3.1 Isotermas de Adsorción

Las isotermas de adsorción son útiles para indicar la afinidad de un adsorbato para una partícula adsorbente. La isoterma es una curva característica del equilibrio de la capacidad del adsorbato por unidad de masa de adsorbente versus la concentración de adsorbato a una temperatura y presión constante.⁹⁸

Las sustancias repelidas de la solución son superficialmente activas, es decir, disminuye su superficie o tensión interfacial y tienden a acumularse en una interfase. Esto se debe a la doble constitución de sus moléculas o iones. Su parte hidrofílica es relativamente más atraída a la fase líquida que a la fase sólida y su parte hidrofóbica es repelida relativamente de la fase líquida que de la fase sólida.

La adsorción interfacial de las moléculas orgánicas aumenta con su actividad superficial y su tamaño al igual que depende de la estructura del adsorbente y de la magnitud relativa del área interfacial.

La adsorción de solutos por poros adsorbentes procede consecuentemente de la siguiente manera:

⁹⁸ NOLL, K. E. Adsorption Technology, Lewis Publishers Inc, 1992.

- a) El material adsorbido se mueve desde el volumen de la solución a la estructura externa del adsorbente.
- b) A medida que la superficie de área externa de los adsorbentes es grande se remueve más del material que va a ser extraído. El volumen del material que va a ser absorbido es llevado a través de los poros del adsorbente por transporte o difusión entre partículas.

Aunque, la adsorción sólida-líquida juega una parte importante en una variedad de procesos de tratamiento de agua, se ha encontrado una aplicación directa en la remoción de olores y sabores no deseados del agua de bebida y en la degradación de compuestos orgánicos.⁹⁹

5.2.4 Catálisis

Fenómeno por el cual se incrementa la velocidad de una reacción mediante una sustancia que no aparece en la ecuación estequiométrica de la reacción global. La catálisis heterogénea es una reacción catalítica donde los reactivos son gases o líquidos y el catalizador sólido. El catalizador absorbe en su superficie moléculas de reactivos que pueden reaccionar a través de un estado cuya energía de activación es mucho más baja que la que se requiere en la reacción de las moléculas normales. La adsorción de especies químicas en la superficie del catalizador se puede llevar a cabo por adsorción física o química. Mientras que la catálisis homogénea es una reacción catalítica donde los

⁹⁹ MASKEW, F, Gordon. Elements for Water Supply and Wastewater disposal, New York, Editorial John Wiley & Sons, 1971.

reactivos y el catalizador se encuentran en el mismo estado físico. Se considera que tiene lugar por la formación de un compuesto intermedio entre uno de los reactivos y el catalizador, compuesto de gran reactividad, que al reaccionar con el otro reactivo da lugar al producto de reacción regenerando el catalizador.¹⁰⁰

5.3 Propiedades físicas

5.3.1 Porosidad

Es la medida del tamaño de los intersticios o espacios vacíos de una sustancia sólida o granular. Usualmente está expresado en porcentaje. El concepto de porosidad envuelve todo tipo de intersticios ya sean primarios o secundarios. Los primarios fueron creados al tiempo del origen del material. En sedimentos granulares no consolidados, éstos coinciden con los espacios intergranulares. La magnitud de fracturación y la intensidad de las acciones climáticas ejercen una profunda influencia en la distribución de los intersticios más grandes. Mientras que la distribución de la porosidad secundaria varía marcadamente con la profundidad.

La porosidad es una característica fija de los suelos, rocas y minerales. No todo líquido almacenado en un material saturado es capaz de moverse. Son sólo los intersticios interconectados que pueden participar en el movimiento de los fluidos. Los líquidos en aberturas aisladas se mantienen inmóviles. Además, el

¹⁰⁰ SÁBATER, G, Bartolomé. Diccionario de Química, Madrid, Ediciones Generales Anaya, 1985.

agua en una parte de los espacios de los poros interconectados es mantenida por fuerzas moleculares y la tensión superficial lo cual se conoce como retención específica. La porción del espacio del poro en el que el fluido toma lugar es llamada porosidad efectiva o rendimiento específico del material definido como la proporción de agua en los poros que está libre de ser drenada o separada bajo la influencia de la gravedad. De acuerdo a su porosidad variará el rendimiento del material granular.

5.3.2 Permeabilidad

La permeabilidad es la capacidad de transmitir un fluido bajo la influencia del gradiente hidráulico. Los factores que afectan la permeabilidad son la geometría de los espacios de los poros y las partículas del material. La naturaleza del sistema de poros, determina la resistencia a fluir a velocidades dadas. Dependiendo del porcentaje de porosidad que presenten las zeolitas, se caracterizarán por tener una alta o baja permeabilidad. La homogeneidad y la isotropía de un medio se refiere a la distribución espacial de la permeabilidad. Un medio poroso es isotrópico si su permeabilidad es la misma en todas las direcciones. Es llamado anisotrópico si la permeabilidad varía con la dirección. El medio es homogéneo si la permeabilidad es constante de un punto a otro punto sobre el medio. Es no homogéneo si la permeabilidad varía de un punto a otro punto en el medio.¹⁰¹

¹⁰¹ MASKEW, F, Gordon. Elements for Water Supply and Wastewater disposal, New York, Editorial John Wiley & Sons, 1971.

La Ley de Darcy define la permeabilidad y se describe en la siguiente ecuación:

$$Q = (kA/\mu) (\Delta P/L) \quad (\text{Ecuación 5.5})$$

Donde Q es el flujo volumétrico, A la sección transversal del área de la muestra, L es la longitud de la muestra en dirección macroscópica del flujo, $\Delta P = P_1 - P_2$ caída de la presión hidrostática y μ la viscosidad del fluido.

La permeabilidad se mide en cm^2 o m^2 . La unidad derivada de la Ley de Darcy es el Darcy para lo cual tenemos que: $1 \text{ Darcy} = 9,86923 \times 10^{-3} \text{ m}^2$.¹⁰²

5.3.3 Granulometría y distribución del tamaño

Existen cuatro métodos por los cuales se puede determinar el tamaño del grano:

La nómina del fabricante, consiste en la medición en forma directa de las dimensiones precisas de un número representativo de las aberturas de la malla.

La nómina de Hazen, requiere de la colección, cuenta y peso de un número representativo de granos que pasen a través de las aberturas de las mallas dadas.

El tercer método mide el diámetro de un número representativo de granos.

¹⁰² http://www.catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/daviñla_n_ir/capitulo6.pdf

Y finalmente, el último método se basa en el tamizado de granos previamente cribados a través de un juego de mallas calibradas.

5.3.4 Forma del grano y Variación de la forma

Descripción	Esfericidad, ψ	Factor de forma, S	Porosidad típica, f
(a) Esféricos	1.00	6.0	0.38
(b) Redondeados	0.98	6.1	0.38
(c) Desgastados	0.94	6.4	0.39
(d) Agudos	0.81	7.4	0.40
(e) Angulares	0.78	7.7	0.43
(f) Comprimidos	0.70	8.5	0.48

Es posible establecer el volumen del poro y el volumen complementario del grano. Debido a que la superficie de área A de los granos en relación con el volumen de agua en el espacio de los poros es una función A/V . Una de las maneras para establecer la forma es a través de la esfericidad, ψ , y el factor de forma S . Definida como la relación de una esfera de volumen equivalente a la superficie de área real o verdadera. La magnitud ψ de una muestra determinada de materiales tamizados puede ser calculada a partir de la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Factores de esfericidad y forma de los materiales granulares y porosidades típicas asociadas a ellos. 103

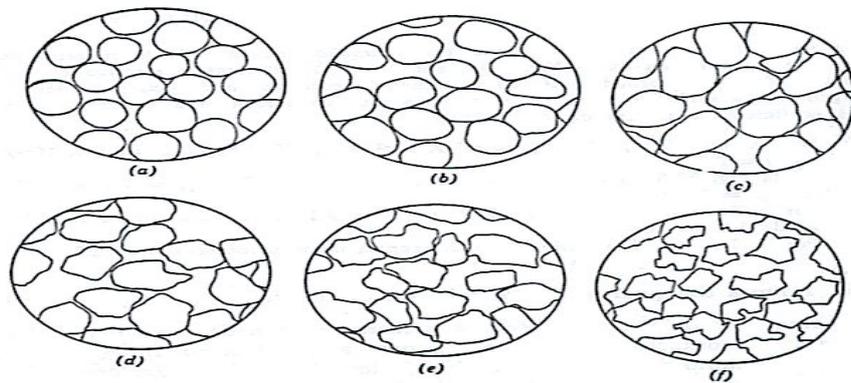


Figura 5.1: Formas más comunes de los materiales granulares.

6. Diseño de los programas de muestreo de caracterización del agua

Antes de definir cualquier programa de muestreo es muy importante establecer los objetivos, ya que serán los factores que determinen el lugar, la frecuencia, la duración, procedimiento, el tratamiento posterior de las muestras y los requisitos analíticos para el muestreo. Existen tres tipos de programas de muestreo que se describen a continuación:

Programas de Control de Calidad: Involucra el control de la concentración de uno o más parámetros dentro de límites definidos. Los resultados son

necesarios para decidir, si es necesaria una acción inmediata. La frecuencia del muestreo se fija de acuerdo a lo siguiente:

- a) la magnitud y duración de la desviación de las condiciones deseadas
- b) las probabilidades de que ocurra la desviación de las condiciones deseadas.

Programas de Caracterización de la Calidad: Estos programas apuntan a estimar uno o más parámetros estadísticos, en su concentración o variabilidad durante un período definido. Generalmente se lo utiliza en trabajos de investigación o para la caracterización de parámetros.

Programas para investigar las causas de contaminación: Estos programas son diseñados para determinar la naturaleza de descargas contaminantes de origen desconocido.¹⁰⁴

6.1. Tipo de muestras

6.1.1 Muestras puntuales

Son muestras individuales, recogidas de forma manual o automática para aguas en la superficie o en la profundidad. Son adecuadas para estimar si la calidad del agua cumple con los límites o se aparta del promedio de calidad.

6.1.2 Muestras periódicas

¹⁰⁴ INEN. Agua. Calidad del Agua. Muestreo. Diseño de los programas de muestreo, Quito, 2000.

6.1.2.1 Tomadas a intervalos de tiempo fijo: Se toman usando un mecanismo cronometrado para iniciar y finalizar la recolección del agua durante un intervalo de tiempo específico.

6.1.2.2 Tomadas a intervalos de flujo fijos (dependientes del volumen): Son tomadas cuando el criterio de la calidad del agua y el volumen del efluente no están relacionados. Para cada unidad de volumen de flujo, se toma una muestra controlada independientemente del tiempo.

6.1.2.3 Tomadas a intervalos fijos de flujo (dependientes del flujo): Se toman cuando las variaciones en el criterio de la calidad de agua y la variación del flujo del efluente no están relacionados. El volumen depende del flujo.

6.1.3 Muestras combinadas

6.1.3.1 Tomadas a flujos fijos: Estas muestras contienen todos los constituyentes presentes durante un período de muestreo, aunque en muchos casos no proporciona información de la variación de la concentración de parámetros específicos durante el período de muestreo.

6.1.3.2 Tomadas a flujos variables: Las muestras de flujo proporcional son representativas de la calidad del agua. Si el flujo y la composición varían las muestras de flujo proporcional pueden variar revelando variaciones que no se pueden observar en las muestras puntuales. Este tipo de muestras pueden revelar variaciones las cuales no pueden ser observadas en las muestras individuales. Por lo tanto, constituye uno de los métodos más precisos

6.1.4 Muestras en serie

6.1.4.1 Muestras para establecer perfiles en profundidad: Es una serie de muestras de agua tomadas a varias profundidades en el cuerpo de agua y en un punto específico.

6.1.4.2 Muestras para establecer perfiles de áreas: Es una serie de muestras de agua tomadas a una profundidad específica del cuerpo de agua en varios puntos.

6.1.5 Muestras compuestas

Las muestras compuestas están formadas por dos o más submuestras tomadas continuamente para luego ser mezcladas en proporciones conocidas para determinar un resultado promedio de la calidad del agua.

6.2 Tipos de recipientes para muestras

6.2.1 Recipientes normales: Generalmente son botellas de polietileno y de vidrio borosilicatado usadas para la toma de muestras de análisis físicos y químicos. Pueden ser de boca angosta o ancha con tapas de tornillo de vidrio o plástico o con tapón de vidrio.

6.2.2 Recipientes especiales: Estos recipientes son utilizados para muestras que contienen materiales fotosensitivos y por lo tanto, deben ser protegidos de la luz. Son de materiales opacos o de vidrio actínico con tapones de vidrio esmerilado.

6.2.3 Recipientes para análisis microbiológico: Estos recipientes deben ser de vidrio o plástico con tapas de vidrio esmerilado o tapas de tornillo capaces de resistir altas temperaturas para su esterilización.

6.3 Equipos de muestreo

6.3.1 Muestreadores: Se trata de cubetas o botellas de boca ancha para la toma de muestras en la superficie o profundidad del cuerpo de agua. Estos equipos pueden ser tanto manuales como automáticos.¹⁰⁵

6.4 Manejo y conservación de muestras

En el transcurso del transporte de la muestra desde el lugar de toma hasta el centro donde se practicarán los análisis puede ocurrir que las características físico-químicas y microbiológicas de la muestra varíen. La extensión de estas reacciones está en función de la naturaleza química y biológica de la muestra, de su temperatura, su exposición a la luz, la naturaleza del recipiente en el cual se coloca, el tiempo entre el muestreo y el análisis, las condiciones a la que ha sido sometida, por ejemplo: reposo o agitación durante el transporte, etc.

Esto debe evitarse en lo posible reduciendo al mínimo el tiempo transcurrido entre toma de muestra y determinación y empleando algún medio efectivo de preservación que no altere de forma perceptible su calidad.

6.4.1 Adición de preservantes

¹⁰⁵ INEN. Agua. Calidad del Agua. Muestreo. Técnicas de muestreo, Quito, 1998.

Ciertos constituyentes físicos o químicos se estabilizan por la adición de compuestos químicos, luego de ser recogida la muestra.

Los compuestos químicos así como sus concentraciones son muy variados y entre los cuales pueden ser:

- a. Ácidos
- b. Soluciones básicas
- c. Diácidos
- d. Reactivos especiales

6.4.2 Refrigeración de muestras

Las muestras se deben guardar a temperaturas más bajas que la temperatura a la cual se recolectó. La refrigeración o congelación de las muestras es efectiva si se la realiza inmediatamente luego de la recolección de la muestra por lo que una vez recolectadas serán colocadas desde el lugar del muestreo en cajas térmicas o refrigeradores de campo llenadas con hielo.

Tabla 6.1: Técnicas generales recomendadas para la preservación de muestras para análisis físico-químico y microbiológico.

PARÁMETROS	TIPO DE RECIPIENTE	TÉCNICA DE CONSERVACIÓN	TIEMPO MÁXIMO DE CONSERVACIÓN
DBO	Plástico o Vidrio	Refrigerar entre 2 y 5 °C, guardar en la oscuridad	24 horas
DQO	Plástico o Vidrio	Acidificar a pH<2 con H ₂ SO ₄ , refrigerar entre 2 y 5°C, guardar en la oscuridad	5 días
Color	Plástico o Vidrio	Refrigerar entre 2 y 5 °C, guardar en la oscuridad	24 horas
Sólidos en suspensión y sedimentables	Plástico o Vidrio		24 horas

Sólidos totales	Plástico o Vidrio	Refrigerar entre 2 y 5 °C	24 horas
Turbidez	Plástico o Vidrio		24 horas
Coliformes totales	Recipiente estéril	Refrigerar entre 2 y 5°C	8 horas

Fuente: INEN. Agua. Calidad del Agua. Muestreo. Manejo y conservación de muestras, Quito, 1998.

6.4.3 Identificación y Registro

Para producir y demostrar que los datos de las muestras son válidos es necesaria la elaboración de formatos de campo ya que son los documentos que respaldan la muestra, el muestreo y los análisis en campo. En los informes de los muestreos deben incluirse datos directamente asociados a la localización del punto de muestreo, fecha y hora de la recolección de la muestra, preservante adicionado y el respectivo código de la muestra que permitirá la identificación del parámetro del que se trata.¹⁰⁶

De igual manera, se debe llevar a cabo un registro de la cadena de custodia para asegurar la integridad de las muestras desde su recolección hasta la transferencia de la posesión de las muestras al laboratorio sirviendo como evidencia de la trazabilidad del muestreo. En el momento en que son entregados los resultados se puede verificar la cantidad de la muestra y si realmente los análisis fueron realizados en el laboratorio.¹⁰⁷

¹⁰⁶ INEN. Agua. Calidad del Agua. Muestreo. Manejo y conservación de muestras, Quito, 1998.

¹⁰⁷ EPA. Handbook for Sampling and Sample Preservation of Water and Wastewater, Cincinnati, 1982.

7. Materiales y métodos

En este estudio se utilizó una muestra de zeolita del tipo clinoptilolita de la zona de Guayaquil para evaluar su eficiencia en el tratamiento de aguas para consumo humano.

7.1 Materiales

- 7 frascos de vidrio borosilicatado de 250 ml con tapón de vidrio.
- 1 frasco de plástico previamente esterilizado con tapa de anillo de plástico.
- 1 refrigeradora de campo
- Una columna de acero inoxidable (1.45 m de largo x 4 in. de diámetro)
- 2 kg. de zeolita del tipo clinoptilolita
- 1 litro de Peróxido de Hidrógeno
- 1 horno pequeño
- Una malla de acero con abertura cuadrada # 6
- Una malla de acero con abertura cuadrada # 10

- Un equipo multiparamétrico WTW (pH, oxígeno disuelto, potencial oxido reducción).
- Una probeta graduada de 100 ml
- 5 ml de H₂SO₄
- 5 litros de agua destilada
- 2 vasos de precipitación de 100 ml

7.2 Métodos de muestreo del agua cruda del río

Tipo de programa de muestreo: Programa de Caracterización de la Calidad

Normativas a considerar:

- NTE INEN: 2176:98 (Técnicas de muestreo).
- NTE INEN: 2169:98 (Manejo y conservación de muestras).

Criterios para elegir el sitio de muestreo: Se ha elegido el Barrio La Victoria porque es una zona rural poblada cercana a un río y del cual se puede hacer uso para satisfacer las necesidades de la comunidad. En este caso el lugar carece de servicio de agua potable abasteciéndose de otros medios no seguros (vertiente).

Tipo de muestras: Muestras compuestas.

Número de muestras: 8 muestras (Color, Coliformes, Turbidez, Sólidos totales, Sólidos suspendidos, Sólidos disueltos, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)).

Descripción de la zona: La zona de interés se encuentra ubicada en el Valle de los Chillos dentro de la Parroquia de Amaguaña entre las coordenadas (X_UTM:780234 y Y_UTM: 995980). Existen cinco tipos de uso actual del suelo: agrícola (17,45%), pecuario (41%), poblacional (13,53 %), forestal (17,5%) y entre otros tales como páramos, etc (13,53%).

Temperatura: 14 °C

Adición de preservantes: Se adicionó H₂SO₄ a la muestra destinada para el análisis de DQO.

Identificación de las muestras: A cada muestra se le asignó dos letras seguidas de un número. Para poder identificarlas se utilizó la primera letra que corresponde a la siguiente manera: O = Color, A= Coliformes, S = Sólidos, D = Demanda Química y Bioquímica de Oxígeno. La segunda letra que llevan todas las muestras es la X y el número es la secuencia de las muestras que se tomaron de acuerdo al parámetro que corresponde.

Refrigeración de muestras: En una refrigeradora de campo se colocaron las muestras para los análisis de DQO, DBO₅, Color, Sólidos, Coliformes totales.

Una vez tomadas las muestras, fueron llevadas al Laboratorio AANCY donde se llevó a cabo los análisis respectivos. El laboratorio cuenta con el Sistema de Calidad de laboratorios ISO 17025 y a su vez se encuentra acreditado ante el Organismo de Acreditación Ecuatoriano (OAE) laboratorio, permitiendo obtener resultados analíticos confiables base para tomar decisiones sobre la eficiencia del filtro, el mencionado.¹⁰⁸

Tabla 7.1: Caracterización del agua cruda del Río San Pedro (X_UTM: 780296 y Y_UTM: 9959760).

PARÁMETRO	UNIDADES	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE (NTE INEN 1108)	RESULTADO
Amonio	Mg/l NH ₃	1,0	0,16
Coliformes totales	NMP/100 ml	< 2	2420
Color	UTC*	15	68

¹⁰⁸ DMMA. Plan de Manejo de la Calidad del Agua, Quito, 2005.

Dureza total	mg/l CaCO ₃	300	340
Fosfatos	Mg/l PO ₄	0,1	0,27
Hierro	mg/l Fe	0,3	0,36
Nitratos	Mg/l NO ₃	10	15
Nitritos	Mg/l NO ₂	0,0	0,017
pH		6,5 – 8,5	8.40
Sólidos disueltos	mg/l	1000	410
Sulfatos	Mg/l SO ₄	200	27
Turbidez	FTU*	5	15

UTC* (Unidades de color verdadero)

Unidad FTU* (Unidad de Turbidez de Formazina) es equivalente a Unidad NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez).

7.3 Procedimientos:

7.3.1 Preparación del filtro:

Se mezcló 1875 gr. de zeolita natural del tipo clinoptilolita en 500 ml de H₂O₂ durante dos horas para la integración del oxidante en la estructura de la zeolita, se dejó reposar cuatro horas con el fin de que los poros de las zeolitas se expandan y se incremente su superficie de área interna. Se preparó dos muestras de las cuales cada una fue tamizada con un diferente número de malla para obtener dos diferentes tipos de granulometrías (malla #6 y #10). Cada una de las muestras ya tamizadas fueron llevadas al horno por cinco horas para que el filtro obtenga mayor resistencia mecánica.

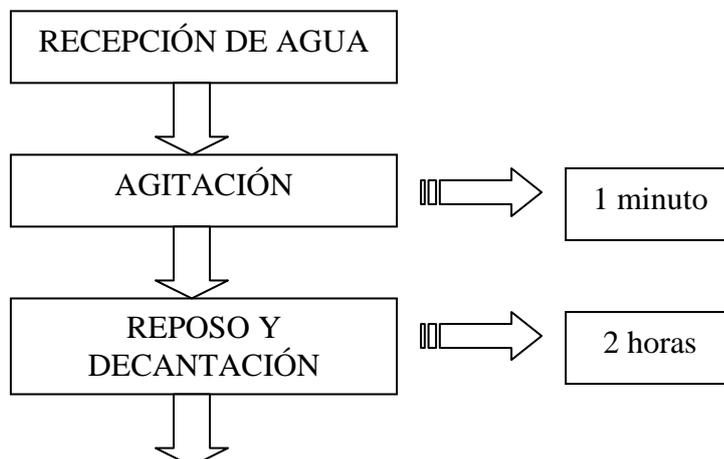
7.3.2 Pruebas Experimentales:

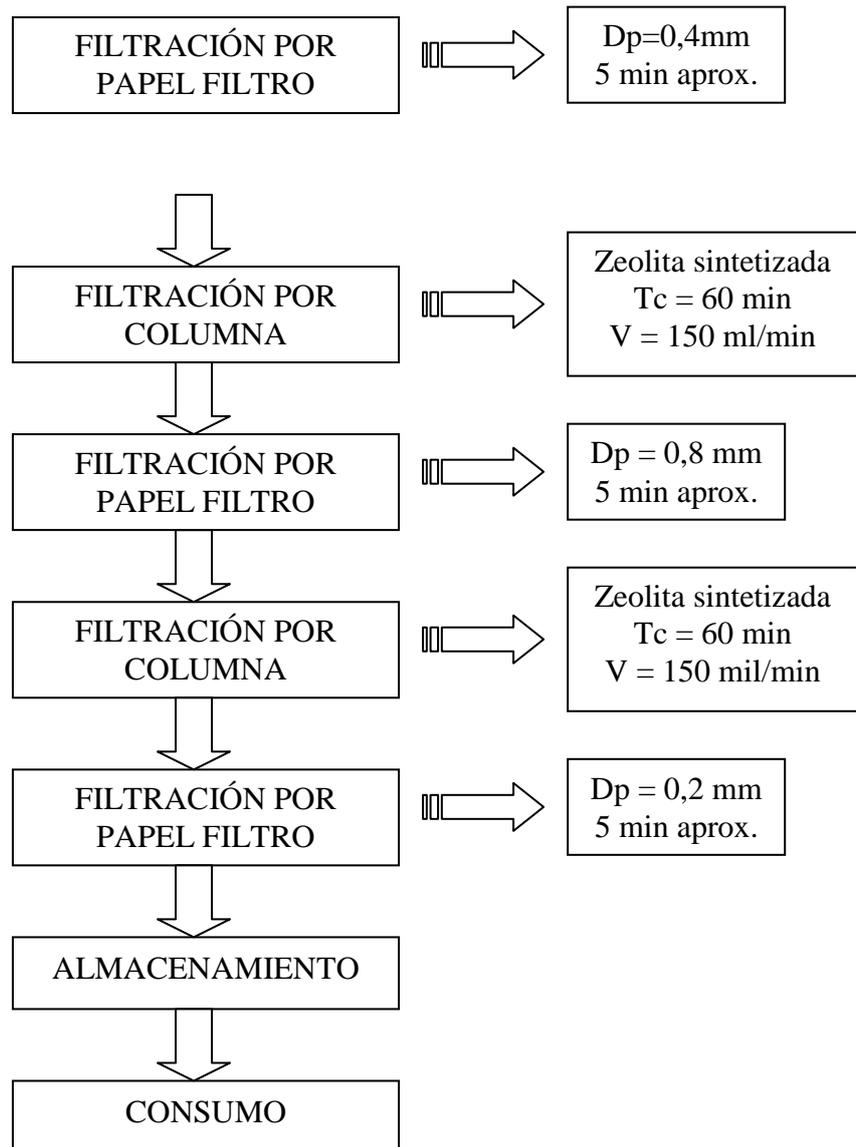
Las corridas se realizaron en una columna de acero inoxidable de 1.45 m de longitud y 4 pulgadas de diámetro. Para las etapas experimentales se eligió este material de tubería por las facilidades que tiene en cuanto a transportación e instalación y ya que bajo condiciones favorables puede llegar a tener una

vida útil de más de 50 años. En cuanto a las dimensiones de la columna, fueron las de menor tamaño que se pudieron encontrar a más de los factores económicos que se consideraron.

Tras las pruebas se procedió a medir pH, potencial oxido reducción (ORP), OD, alcalinidad y sulfatos con el fin de determinar la eficiencia del procedimiento experimental. Se agitó y se dejó decantar un volumen de siete litros de agua cruda durante dos horas después de lo cual se pasó por papel filtro de 0,4 mm de diámetro de poro para retener todas aquellas partículas y sólidos que pudieron haberse depositado en el fondo del tanque y llegando a obstruir los poros del filtro en caso de que no se realizara un filtrado previo. Luego se colocó en la columna un volumen de seis litros y finalmente se vuelve a filtrar con papel filtro de 0,8 mm de diámetro de poro.

DIAGRAMA DE BLOQUE DEL PROCESO





Se consideraron cuatro variables para determinar la eficiencia del filtro:

Tabla 7.2: Variables para la determinación de la eficiencia del filtro.

VARIABLES	A	B
Granulometría	2 mm	5 mm
Tiempo de contacto	30 minutos	60 minutos
Velocidad de filtración	80 ml/min	150 ml/min
Profundidad del lecho	30 cm	40 cm

ELABORADO POR: Andrea Arias

Una vez filtrada el agua se procede a valorar las condiciones de ORP, alcalinidad, OD, pH y sulfatos para confirmar la interacción adecuada del filtro.

A continuación se describe cada una de las interacciones de las cuatro variables:

Tabla 7.3: Interacciones de las variables.

Interacción #	Granulometría	Tiempo de contacto	Velocidad de filtración	Profundidad del lecho
1	2 mm	30 minutos	80 ml/min	30 cm
2	5 mm	30 minutos	80 ml/min	30 cm
3	2 mm	60 minutos	80 ml/min	30 cm
4	5 mm	60 minutos	80 ml/min	30 cm
5	2 mm	30 minutos	150 ml/min	30 cm
6	5 mm	30 minutos	150 ml/min	30 cm
7	2 mm	60 minutos	150 ml/min	30 cm
8	5 mm	60 minutos	150 ml/min	30 cm
9	2 mm	30 minutos	80 ml/min	40 cm
10	5 mm	30 minutos	80 ml/min	40 cm
11	2 mm	60 minutos	80 ml/min	40 cm
12	5 mm	60 minutos	80 ml/min	40 cm
13	2 mm	30 minutos	150 ml/min	40 cm
14	5 mm	30 minutos	150 ml/min	40 cm
15	2 mm	60 minutos	150 ml/min	40 cm
16	5 mm	60 minutos	150 ml/min	40 cm

ELABORADO POR: Andrea Arias

7.3.3 Resultados de las pruebas experimentales

En la tabla mostrada a continuación se presenta los resultados obtenidos de las interacciones mencionadas anteriormente:

Tabla 7.4: Resultados de las interacciones.

Inter.#	ORP	Alcalinidad	OD	pH	Sulfatos
1	151 mV	200 mg/l CaCO ₃	5.3 mg/l	8.39	7 mg/l SO ₄
2	196 mV	66 mg/l CaCO ₃	6,2 mg/l	7.9	6 mg/l SO ₄
3	150 mV	200 mg/l CaCO ₃	5.4 mg/l	8.2	7 mg/l SO ₄
4	190 mV	63 mg/l CaCO ₃	5.8 mg/l	7.9	7 mg/l SO ₄
5	142 mV	220 mg/l CaCO ₃	5.3 mg/l	8	7 mg/l SO ₄
6	184 mV	65 mg/l CaCO ₃	5.9 mg/l	8	6 mg/l SO ₄
7	149 mV	93 mg/l CaCO ₃	5.4 mg/l	8.1	7 mg/l SO ₄
8	187 mV	63 mg/l CaCO ₃	5.7 mg/l	8	7 mg/l SO ₄
9	154 mV	105 mg/l CaCO ₃	5.4 mg/l	8.37	6 mg/l SO ₄
10	221 mV	61 mg/l CaCO ₃	6,2 mg/l	7.7	5 mg/l SO ₄
11	164 mV	75 mg/l CaCO ₃	5.7 mg/l	8.2	5 mg/l SO ₄
12	199 mV	64 mg/l CaCO ₃	6,2 mg/l	7.7	6 mg/l SO ₄
13	160 mV	184 mg/l CaCO ₃	5.6 mg/l	8.3	5 mg/l SO ₄
14	200 mV	65 mg/l CaCO ₃	6,2 mg/l	7.9	6 mg/l SO ₄
15	147 mV	62 mg/l CaCO ₃	5.7 mg/l	8.3	7 mg/l SO ₄
16	210 mV	64 mg/l CaCO ₃	6,2 mg/l	7.9	6 mg/l SO ₄
\bar{X}	175,25	99,38	5,76	8,05	6,25
σ^2	664,6	3608,28	0,1136	0,0488	0,6
Σ	25,78	60,07	0,3370	0,2210	0,7745

ELABORADO POR: Andrea Arias

De acuerdo a las pruebas realizadas con las diferentes interacciones, por presentar mejores resultados se escogieron las interacciones # 10, 12 y 16 de las cuales se analizaron dos parámetros de control: coliformes totales y color ya que son los que representan mayor preocupación sobretodo porque las aguas van a ser destinadas para consumo humano, los coliformes por cuestiones de salud y el color por la importancia que tiene para que el agua sea aceptada por parte de los usuarios.

A continuación se muestran los resultados de las tres interacciones seleccionadas:

Tabla 7.5: Resultados de las interacciones # 10, 12 y 16.

IDENTIFICACION DE LA PRUEBA	CODIGO DE LA MUESTRA		RESULTADO	
	COLIFORMES	COLOR	COLIFORMES	COLOR
Interacción # 10	AX4	OX3	130 NMP/100 ml	21 UTC
Interacción # 12	AX3	OX2	<1 NMP/100 ml	57 UTC
Interacción # 16	AX5	OX4	< 1 NMP/100 ml	18 UTC

ELABORADO POR: Andrea Arias

PRUEBA # 10

Granulometría	5 mm
Tiempo de contacto	30 min
Velocidad de filtración	80 ml/min

PARÁMETRO	RESULTADOS DEL AGUA CRUDA DEL RÍO	RESULTADOS DE LA INTERACCIÓN # 10
ORP	149 mV	221 mV
Alcalinidad	340 mg/l CaCO ₃	61 mg/l CaCO ₃
OD	3,3 mg/l	6,2 mg/l
pH	8,40	7,7
Sulfatos	27 mg/l SO ₄	5 mg/l SO ₄
	Profundidad del lecho	40 cm

PRUEBA # 12

Granulometría	5 mm
Tiempo de contacto	60 min
Velocidad de filtración	80 ml/min
Profundidad del lecho	40 cm

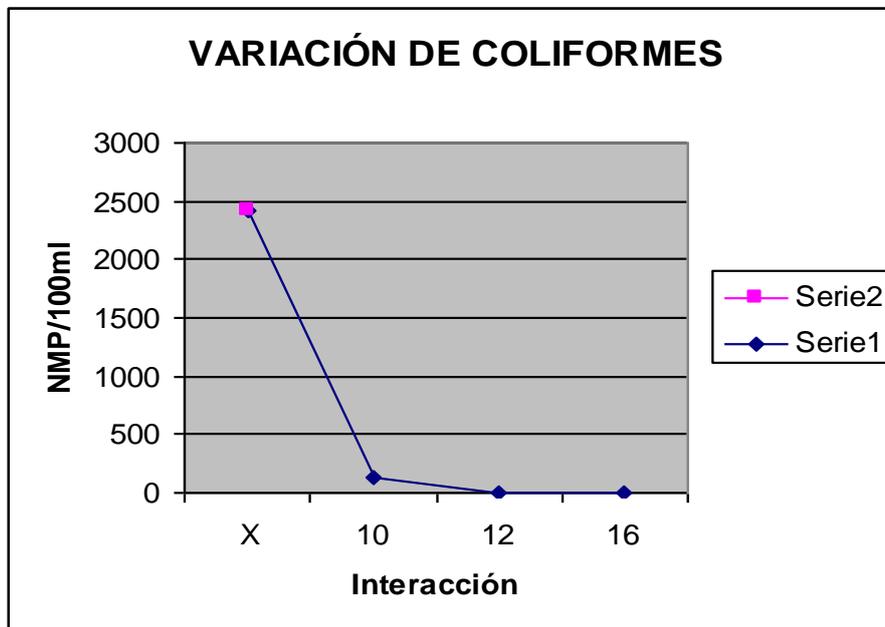
PARÁMETRO	RESULTADOS DEL AGUA CRUDA DEL RÍO	RESULTADOS DE LA INTERACCIÓN # 12
ORP	149 mV	199 mV
Alcalinidad	340 mg/l CaCO ₃	64 mg/l CaCO ₃
OD	3,3 mg/l	6,2 mg/l
pH	8,40	7,7
Sulfatos	27 mg/l SO ₄	6 mg/l SO ₄

PRUEBA # 16

Granulometría	5 mm
Tiempo de contacto	60 min
Velocidad de filtración	150 ml/min

PARÁMETRO	RESULTADOS DEL AGUA CRUDA DEL RÍO	RESULTADOS DE LA INTERACCIÓN # 16
ORP	149 mV	210 mV
Alcalinidad	340 mg/l CaCO ₃	64 mg/l CaCO ₃
OD	3,3 mg/l	6,2 mg/l
pH	8,40	7,9
Sulfatos	27 mg/l SO ₄	6 mg/l SO ₄

Profundidad del lecho	40 cm
-----------------------	-------



Por no cumplir en uno de los parámetros de control con lo establecido dentro de la norma de agua potable para consumo humano fueron descartadas las

interacciones # 10 y 12 y con el fin de optimizar el funcionamiento y eficiencia del filtro de la interacción # 16 se adecuó la etapa de experimentación de la siguiente manera:

Se agitó y se decantó un volumen de siete litros durante dos horas después se lo pasó por un papel filtro de 0,4 mm de diámetro de poro para retener todas aquellas partículas y sólidos. Luego se colocó en la columna un volumen de seis litros y se filtró con un papel filtro de 0,8 mm de diámetro de poro. Finalmente se realizó una segunda corrida por la columna y se utilizó un papel filtro de 0,2 mm. El agua tratada mediante la modificación generó los siguientes resultados:

Tabla 7.6: Resultados finales del agua tratada y límites máximos permisibles para agua potable.

PARÁMETRO	UNIDADES	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE	RESULTADO
Amonio	Mg/l NH ₃	1,0	0,0
Coniformes totales	NMP/100 ml	< 2	1
Color	UTC*	15	0
Dureza total	Mg/l CaCO ₃	300	60
Fosfatos	mg/l PO ₄	0,1	0,016
Hierro	Mg/l Fe	0,3	0,17
Nitratos	mg/l NO ₃	10	8
Nitritos	mg/l NO ₂	0,0	0,0
pH		6,5 – 8,5	7,4
Sólidos totales disueltos	mg/l	1000	105
Sulfatos	mg/l SO ₄	200	0,0
Turbidez	FTU*	5	1

UTC* (Unidades de color verdadero)

Unidad FTU* (Unidad de Turbidez de Formazina) es equivalente a Unidad NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez).

7.4 Caracterización del material poroso

7.4.1 Isotherma de adsorción: Se tomó como referencia de estudios anteriores los valores de las constantes de la isoterma de Langmuir a diferentes pH y temperatura como se muestra a continuación:

Tabla 7.7: Valores de las constantes de la isoterma de Langmuir

Temperatura (°C)	pH	q _m (meq/g)
25	3	0.952
25	5	0.762
25	7	0.854
15	5	1.295
35	5	1.138

7.4.2 Capacidad de intercambio catiónico: De acuerdo a los datos encontrados en la ficha técnica de la clinoptilolita que se compró la capacidad de intercambio catiónico comprende un valor de 114 meq/100 gr. Para conocer la cantidad de H₂O₂ que absorbió la zeolita se realizó los siguientes cálculos:

$$\begin{aligned} H &= 2 \times 1 = 2 \\ O &= 2 \times 16 = \underline{32} \\ &34 \text{ gr.} \end{aligned}$$

$$1 \text{ mol H}_2\text{O}_2 = 34 \text{ gr.} \rightarrow 0,034 \text{ meq}$$

$$\frac{114}{0,034} = 3352 \text{ meq}$$

$$500 \text{ ml H}_2\text{O}_2 \rightarrow 500 \text{ gr.} \rightarrow 0,5 \text{ meq}$$

7.4.3 Porosidad: Para determinar la porosidad del material se utilizó el método de volumen utilizando la siguiente fórmula:

$$\emptyset = 1 - (V_S / V_B) \text{ (Fórmula 7.1)}$$

Donde V_S es el volumen del sólido y V_B es el volumen del líquido.

$$\emptyset = 1 - (40 \text{ ml} / 100 \text{ ml}) = 1 - 0.4 = 0.6$$
$$\emptyset = 0.6 \times 100 = 60 \%$$

7.4.4 Permeabilidad: Para encontrar la permeabilidad se utilizó la Ley de Darcy dada por la siguiente fórmula:

$$Kf = \frac{Q}{i \times A} \text{ (Fórmula 7.2)}$$

Donde k_f es el coeficiente de permeabilidad, Q el caudal, i el gradiente hidráulico ($i = \text{distancia} / \text{diferencia de altura del nivel freático}$) y A el área.

$$Kf = \frac{0,5 \text{ m/s}}{1,45/0,2 \times 0,0081} = 8,51 \text{ m/s}$$

7.4.5 Granulometría: La granulometría se determinó de acuerdo al número de malla que se utilizó que corresponde al # 6 por lo que el espacio entre cada abertura es de 5 mm.

7.4.6 Forma del grano: De acuerdo a la figura 5.1 se observó que el grano corresponde a una forma desgastada.

7.5 Datos obtenidos de las encuestas

Como resultado de las encuestas realizadas se puede indicar:

En la tabla 7.8, al hacer el análisis de la categoría de ocupación, se tiene que las personas de la comunidad en su mayoría trabajan por cuenta propia, el

30% se dedican a los quehaceres domésticos, por tanto existe un alto porcentaje de personas que permanecen en la zona en forma constante.

Tabla 7.8: Categoría de ocupación.

CATEGORÍA	
Patrono	1
Cuenta propia	9
Empleado público	0
Empleado privado	3
Estudiante	2
Quehaceres domésticos	7
TOTAL	22

En la tabla 7.9, se presenta el nivel de ingresos por familia los resultados indican que la mayoría de las familias ganan alrededor de 200 a 300 USD mensuales, valor menor que la canasta básica.

Tabla 7.9: Nivel de ingresos

INGRESOS	
50 a 100	1
100 a 200	5
200 a 300	10
300 a 400	4
Más de 400	2
TOTAL	22

La tabla 7.10, presenta el tamaño del universo y el tamaño muestral para la unidad de medida que es la familia. El 70 % de las familias fue encuestada y valorada para el análisis de la situación de la comunidad.

Tabla 7.10: Tamaño universal y muestral

BARRIO	TAMAÑO	
	UNIVERSAL	MUESTRAL
La Victoria	31	22

La tabla 7.11, se refiere al número de personas que conforman el hogar, generalmente mostrando un número correspondiente de cinco a seis personas.

Tabla 7.11: Número de personas que conforman el hogar

NÚMERO DE PERSONAS	
1 a 2	1
3 a 4	6
5 a 6	10
7 a 8	3
9 a 10	2
TOTAL	22

Con respecto al servicio de agua, el único medio de provisión de agua que utilizan es de una vertiente proveniente del Cotopaxi, la tabla 7.12, muestra que el 68,18 % está de acuerdo en que es de buena calidad ya que normalmente hay un costo de 2 USD mensuales que comprende el mantenimiento de las tuberías ya que existe alta corrosividad de las mismas y debido a que no se le realiza ningún pre-tratamiento al agua que utilizan , el 100% está de acuerdo en que existe continuidad del servicio pero sólo el 18,18% considera que cubre totalmente las necesidades debido a que la cantidad no es suficiente para abastecer los requerimientos sobretodo para higiene ya que no existe suficiente presión del agua para llegar a los segundos pisos y a los baños.

Tabla 7.12: Consideración del servicio de agua

	TOTAL
Buena calidad	15
Continuidad del servicio	22
Cubre totalmente las necesidades	4

En cuanto a las enfermedades provocadas por no disponer de agua segura, en la tabla 7.13, se observa que el 18% de las familias asegura la existencia de enfermedades de origen hídrico generalmente en los niños por la presencia de

Hierro en el agua que consumen, provocando manchas blancas en la piel mientras que el resto aseguró que no se ha presentado ninguna enfermedad pero más bien se podría decir que es porque no se dan cuenta y no ven una relación directa entre dicha enfermedad y el consumo del agua.

Tabla 7.13: Enfermedades de origen hídrico

TIPO DE ENFERMEDADES	
Enfermedades cutáneas	4
Ninguna	18
TOTAL	22

En la tabla 7.14, se presentan las diferentes actividades para las cuales cada familia emplea el agua: bebida y preparación de alimentos para consumo (95,5%), necesidades domésticas como limpieza de utensillos de cocina (100%), necesidades individuales como higiene personal (100%) y dado que se trata de un área rural también se la suele utilizar para riego (9,1%).

Tabla 7.14: Usos del agua

USOS	TOTAL
Consumo	21
Higiene personal	22
Limpieza de utensillos	22
Riego	2

En la tabla 7.15, se observa, que la mayoría de las familias de la comunidad tiende a hervir el agua (81,81%), seguido de la compra de agua embotellada (27,27%) y el tiempo de acarreo corresponde a un 9%.

Tabla 7.15: Número de familias que opta por otras vías para proveerse de agua segura.

	NÚMERO DE FAMILIAS
Tiempo de acarreo	2
Gastos en hervir agua	18
Compra de agua embotellada	6

En la tabla 7.16, el mayor costo económico corresponde al gasto por la compra de agua embotellada, seguido por el gasto en enfermedades de origen hídrico y de los gastos en hervir agua y el tiempo de acarreo. La compra de agua embotellada que implica de igual manera el tiempo de acarreo comprende valores muy por encima del mínimo que generalmente paga cada familia por tener agua potable. Los gastos en hervir agua y en la compra de agua embotellada se calculó de acuerdo a la cantidad de tanques de gas y botellones de agua que adquiere cada familia mensualmente mientras que para calcular el tiempo de acarreo se tomó en cuenta la distancia y el tiempo que recorren para adquirir los botellones como el centro poblado más cercano es Sangolquí y se encuentra aproximadamente a cinco kilómetros, ésta distancia corresponde a treinta minutos. El gasto en enfermedades hídricas es de acuerdo al valor de las medicinas y de las consultas médicas. Para obtener ésta información estos datos fueron proporcionados por la población en el momento de realizar las encuestas.

Tabla 7.16: Costo económico que tienen las familias por no disponer de agua segura

	COSTO PROMEDIO MENSUAL POR FAMILIA (USD)
Tiempo de acarreo	5
Gastos en hervir agua	4,27
Compra de agua embotellada	6,5
Gasto en enfermedades de origen hídrico	7

La tabla 7.17, muestra que en su mayoría un hogar utiliza diariamente alrededor de 100 a 150 litros (0,1 m³) por día que corresponde a la media de la población rural.

Tabla 7.17: Cantidad de agua utilizada por día.

CANTIDAD DE AGUA	
50-100 lt/d	5
100 – 150 lt/d	17
150 a 200 lt/d	0
Más de 200 lt/d	0
TOTAL	22

7.6 Diseño del sistema

7.6.1 Fórmulas

$Q_{\text{de diseño}} = (\# \text{ personas}) \times (\text{litros de agua día por habitante})$ (Fórmula 7.3)

$$A = \pi r^2 \quad (\text{Fórmula 7.4})$$

$$Z = \frac{G_s \cdot \text{EBCT}}{7.48} \quad (\text{Fórmula 7.5})$$

Donde:

Z=Profundidad del lecho (ft)

G_s = Tasa de servicio (gpm/ft²)

EBCT=Tiempo de residencia (min)

$$H = Z (1+F) \text{ (Fórmula 7.6)}$$

Donde:

H= Altura de la columna (ft)

Z= Profundidad del lecho (ft)

F= % del área libre

$$\text{Producción} = \frac{\text{Área} \times \text{Carga}}{\text{EBCT} \times 0,785} \text{ (Fórmula 7.7)}$$

7.6.2 Cálculos

$$Q_{\text{de diseño}} = (5 \text{ personas}) \times (30 \text{ litros/hab} \cdot \text{d}) = 150 \text{ litros/día}$$

$$A = \pi (10,16)^2 = 324,29 \text{ cm}^2 \longrightarrow 0,349 \text{ ft}^2$$

$$Z = \frac{5 \text{ gpm} \times 0,349 \text{ ft}^2 \times 30 \text{ min}}{7,48} = 6,97 \text{ ft} \longrightarrow 2,12 \text{ mts.}$$

$$H = 2,12 \text{ mts} (1+0.5) = 3,18 \text{ mts.}$$

$$P = \frac{0,349 \text{ ft}^2 \times 5 \text{ gpm}}{30 \text{ min} \times 0,785} = 0,07 \text{ gpm}$$

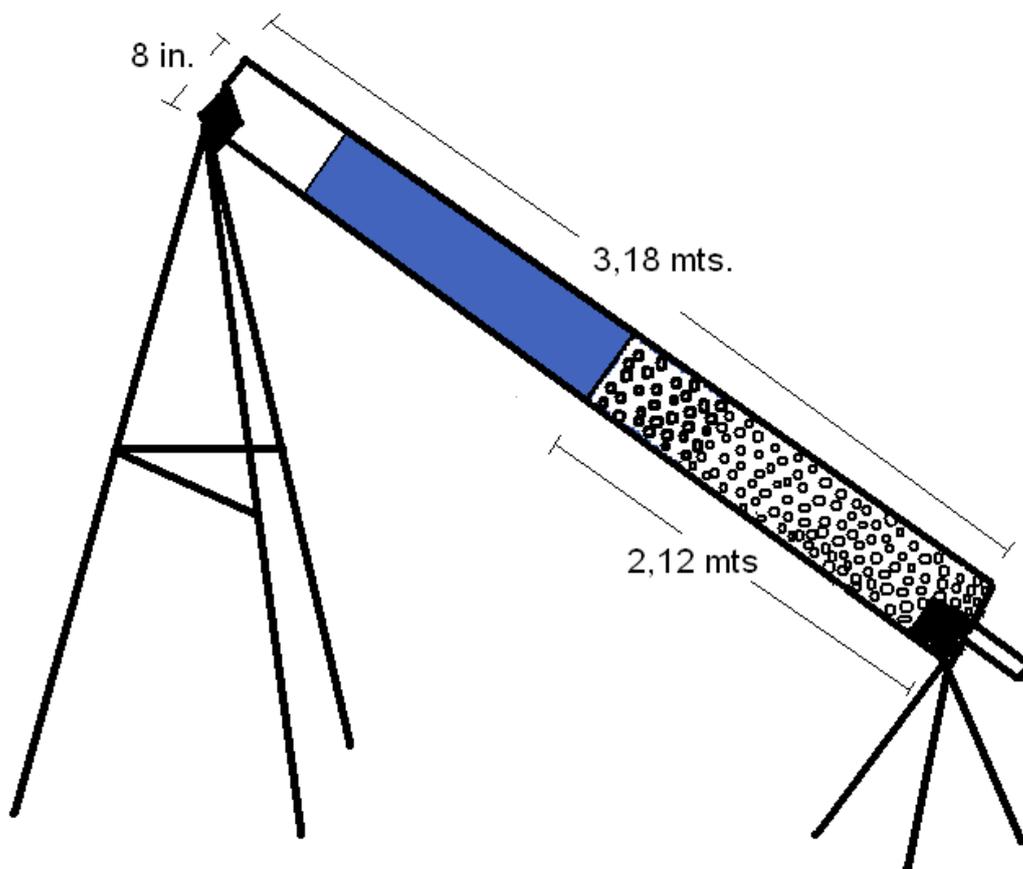


Fig 7.1: Dimensiones del diseño del reactor pasivo

7.6.3 Costo del sistema

Tabla 7.18: Cuadro de valoración económica del reactor pasivo.

ITEM	UNIDAD	PRECIO TOTAL	PRECIO UNITARIO
Tubería de PVC reforzado	(6 metros x 8 in)	70,22 USD	35,11 USD
Zeolita natural del tipo clinoptilolita	(25 kg)	4 USD	1,60 USD
Peróxido de Hidrógeno	(1 gal)	3,50 USD	2,30 USD
COSTO TOTAL			39,01 USD

7.7 Análisis y discusión de resultados

- Se ha utilizado el programa Minitab 15 para llevar a cabo un diseño experimental que proporcione un método para investigar simultáneamente los efectos de múltiples variables o factores sobre una variable de salida (respuesta), lo que permite determinar las condiciones de proceso y los componentes que influyen en la calidad para identificar la variable de entrada que maximiza los resultados.
- El software Minitab es un programa estadístico que ofrece diversas herramientas para la recogida, análisis e interpretación de datos obtenidos a partir de una experimentación con el fin de evaluar procesos y dar solución a los problemas encontrados dentro del proceso.
- En este caso se tiene un diseño de 2^4 que impone 16 posibles combinaciones de los factores, es decir, se analizaron cuatro variables o factores de entrada (Granulometría, Tiempo de contacto, Velocidad de filtración y Profundidad de lecho) con dos niveles: (-1) nivel inferior y (1) nivel superior para cada una de las cinco variables de salida o respuesta que se han obtenido en la etapa de experimentación (ORP, Alcalinidad, OD, pH, Sulfatos).
- Una vez creado el diseño mediante los resultados del modelo ajustado y las gráficas que se pueden observar a continuación se procedió a

evaluar los factores que son importantes para la eficiencia del funcionamiento del filtro.

- Se utilizan los valores P de la tabla Estimated Effects and Coeficientes para determinar los efectos principales como en este caso se utiliza un $\alpha=0.05$ todos los valores p menores a 0.05 son significativos.
- El valor P es la probabilidad de observar un valor de prueba más extremo que el valor observado en la fase de experimentación, dado que una hipótesis nula es verdadera. Si el valor P es mayor que el nivel de significancia la hipótesis nula es rechazada mientras que si el valor P es menor que el nivel de significancia la hipótesis no es rechazada.
- El coeficiente de determinación (R-Sq) indica el porcentaje de ajuste que se ha conseguido con el modelo lineal, es decir, que a mayor porcentaje es mejor el modelo para predecir el comportamiento de los factores de entrada que han sido seleccionados.
- Para la variable de salida ORP se identificaron dos variables de entrada significativas la granulometría y la profundidad de lecho, por otro lado se obtiene un coeficiente de determinación del 94,29%.

Estimated Effects and Coeficientes for ORP					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		175,250	1,798	97,45	0,000
Granulometría	46,250	23,125	1,798	12,86	0,000
Tiempo de contacto	-1,500	-0,750	1,798	-0,42	0,685
Velocidad de filtración	5,750	-2,875	1,798	-1,6	0,138
Profundidad de lecho	13,250	6,625	1,798	3,68	0,004

S=7,19375	PRESS=1204,36	
R-Sq=94,29%	R-Sq(pred)=87,92%	R-Sq(adj)=92,21%

Análisis de Varianza para ORP						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	9399,8	9399,8	2349,94	45,41	0,000
Residual Error	11	569,3	51,75			
Total	15	9969,0				

- Para la variable de salida Alcalinidad se determinó que sólo una de las variables de entrada influye de manera significativa correspondiendo a la granulometría mostrando un coeficiente de determinación del 64,74%.

Estimated Effects and Coefficients for Alcalinidad					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		103,13	10,39	9,92	0,000
Granulometría	-78,50	-39,25	10,39	-3,78	0,003
Tiempo de contacto	-35,25	-17,62	10,39	-1,70	0,118
Velocidad de filtración	-2,25	-1,13	10,39	-0,11	0,916
Profundidad de lecho	-36,25	-18,13	10,39	-1,74	0,109

S=41,5648	PRESS=40206,8	
R-Sq=64,74%	R-Sq(pred)=25,40%	R-Sq(adj)=51,92%

Análisis de Varianza para Alcalinidad						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	34896	34896	8724	5,05	0,015
Residual Error	11	19004	19004	1728		
Total	15	53900,0				

- Para el tercer modelo obtenido se observa que la profundidad del lecho tiene un efecto estadísticamente significativo para predecir la variable de salida (Sulfatos), así como un coeficiente de determinación del 61,11%.

Estimated Effects and Coefficients for Sulfatos					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		6,2500	0,1410	44,32	0,000
Granulometría	-0,2500	-0,1250	0,1410	-0,89	0,394

Tiempo de contacto	0,5000	0,2500	0,1410	1,77	0,104
Velocidad de filtración	0,2500	0,1250	0,1410	0,89	0,394

S=0,564076	PRESS=7,40496
R-Sq=61,11%	R-Sq(pred)=17,72%
R-Sq(adj)=46,97%	

Análisis de Varianza para Sulfatos						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	5,5000	5,5000	1,3750	4,32	0,024
Residual Error	11	3,5000	3,5000	0,3182		
Total	15	9,0000				
Profundidad de lecho		-1,0000	-0,5000	0,1410	-3,55	0,005

- Para la variable de salida OD se encuentran dos variables significativas granulometría y profundidad de lecho con un coeficiente de determinación del 88,57%.

Estimated Effects and Coefficients for OD					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		5,76250	0,03454	166,82	0,000

S=0,138170	PRESS=0,444298
R-Sq=88,57%	R-Sq(pred)=75,82%
R-Sq(adj)=84,42%	

Análisis de Varianza para OD						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	1,6275	1,6275	0,40688	21,31	0,000
Residual Error	11	0,2100	0,2100	0,01909		
Total	15	1,8375				
Granulometría		0,57500	0,28750	0,03454	8,32	0,000
Tiempo de contacto		0,00000	0,00000	0,03454	0,00	1,000
Velocidad de filtración		-0,02500	0,01250	0,03454	-0,36	0,724
Profundidad de lecho		0,27500	0,13750	0,03454	3,98	0,002

- Para la variable de salida pH la variable de mayor importancia es la granulometría y muestra un coeficiente de determinación del 70,63%.

Estimated Effects and Coefficients for pH					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		8,0538	0,03497	230,32	0,000
Granulometría	-0,3575	-0,1787	0,03497	-5,11	0,000
Tiempo de contacto	-0,0325	-0,0163	0,03497	-0,46	0,651
Velocidad de filtración	0,0175	0,0088	0,03497	0,25	0,807

S=0,139870	PRESS=0,455299	
R-Sq=70,63%	R-Sq(pred)=37,87%	R-Sq(adj)=59,95%

Análisis de Varianza para pH						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	0,5176	0,5176	0,12939	6,61	0,006
Residual Error	11	0,2152	0,2152	0,01956		
Total	15	0,7328				

Profundidad de lecho	-0,0150	-0,0075	0,03497	-0,21	0,834
----------------------	---------	---------	---------	-------	-------

- Para las cinco variables de respuesta que se obtuvieron la variable de entrada que permanece en cada una de éstas como la más significativa es la granulometría.
- El primer modelo permite asegurar que es el ideal al ser el que más se acerca al 100% ya que explica el 94,29% de las variaciones del parámetro ORP a través del ajuste por medio de los factores (Granulometría, Tiempo de contacto, Velocidad de Filtración y Profundidad de Lecho).

- De las 16 posibles combinaciones obtenidas de acuerdo a los análisis realizados a los gráficos se ha concluido que existen tres que maximizan los resultados finales la interacción #10,12 y 16.
- En la figura 7.2 se observa la gráfica de los principales efectos para el ORP de la interacción # 10 mostrando que tanto a mayor granulometría como a mayor profundidad del lecho aumenta el ORP. El incremento de los valores de ORP se debe a que mientras aumenta la granulometría y profundidad del lecho de igual manera se incrementa la capacidad oxidativa del filtro permitiendo así una mayor eficacia para la destrucción de la materia orgánica y los microorganismos presentes en el agua.

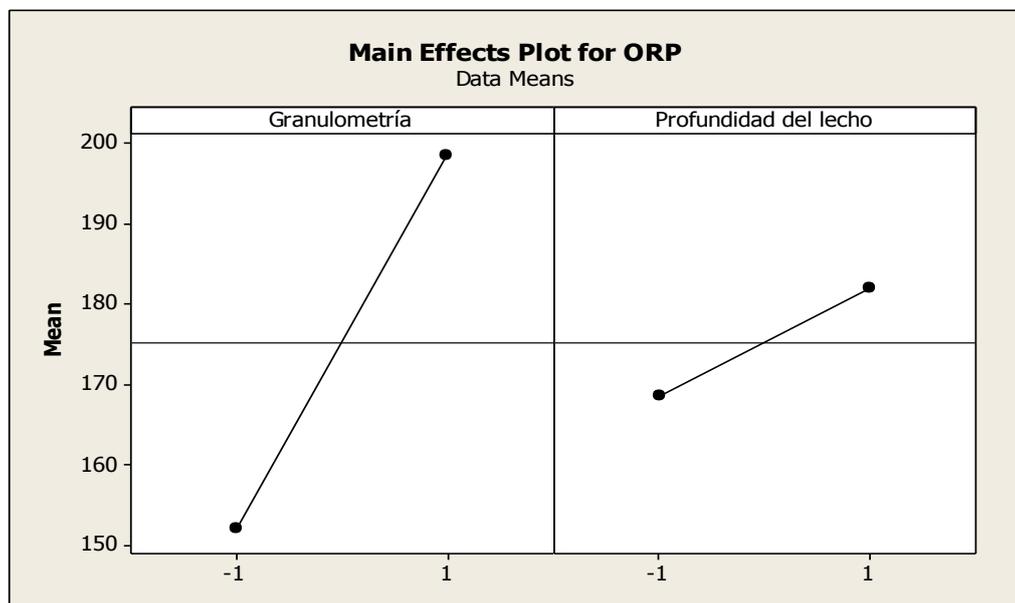


Fig. 7.2: Gráfica de los principales efectos para ORP (Granulometría y Profundidad de lecho).

- La figura 7.3 muestra en cambio que a un menor tiempo de contacto y a valores menores de velocidad de filtración aumenta el ORP para la interacción #10.

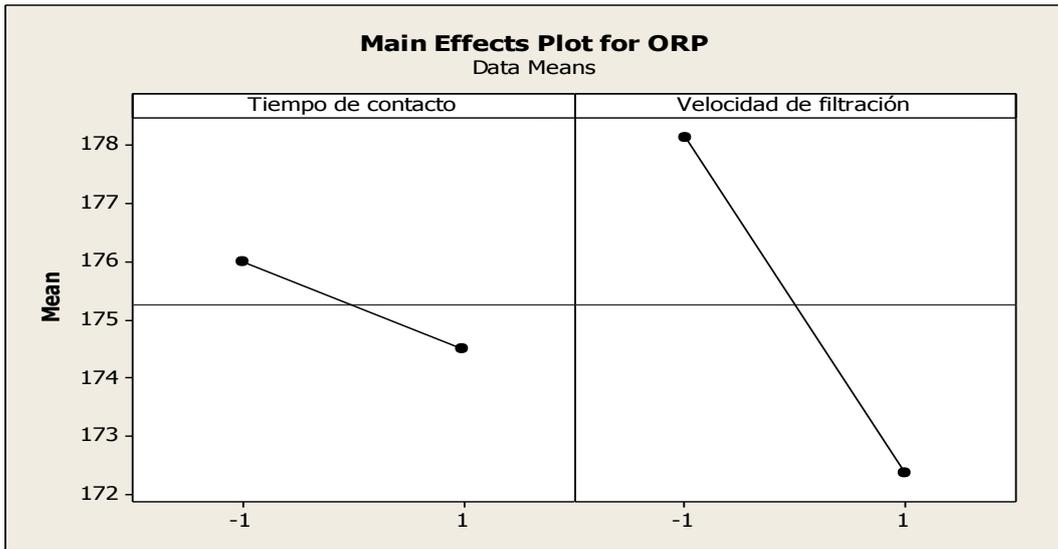


Fig. 7.3: Gráfica de los principales efectos para ORP (Tiempo de contacto).

- En cuanto a la interacción # 12 se puede apreciar en la figura que aparece a continuación que a mayor granulometría disminuye el pH mientras que para el tiempo de contacto ocurre todo lo contrario disminuyendo el pH al permitir un menor tiempo de contacto.

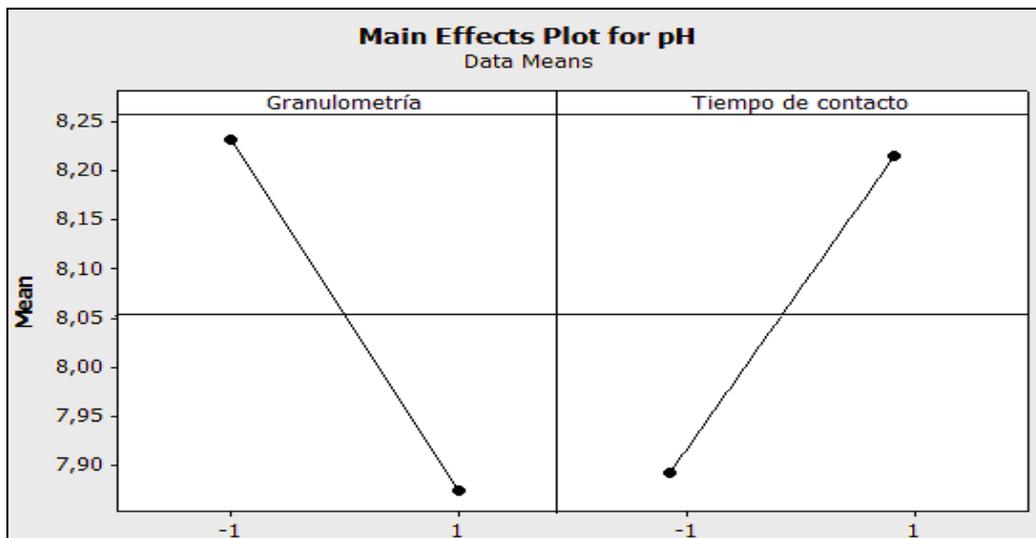


Fig.7.4: Gráfica de principales efectos para pH (Granulometría y Tiempo de contacto).

- La figura 7.5 describe que a mayor velocidad de filtración disminuye el pH y de igual manera sucede con la profundidad de lecho para la interacción #12.

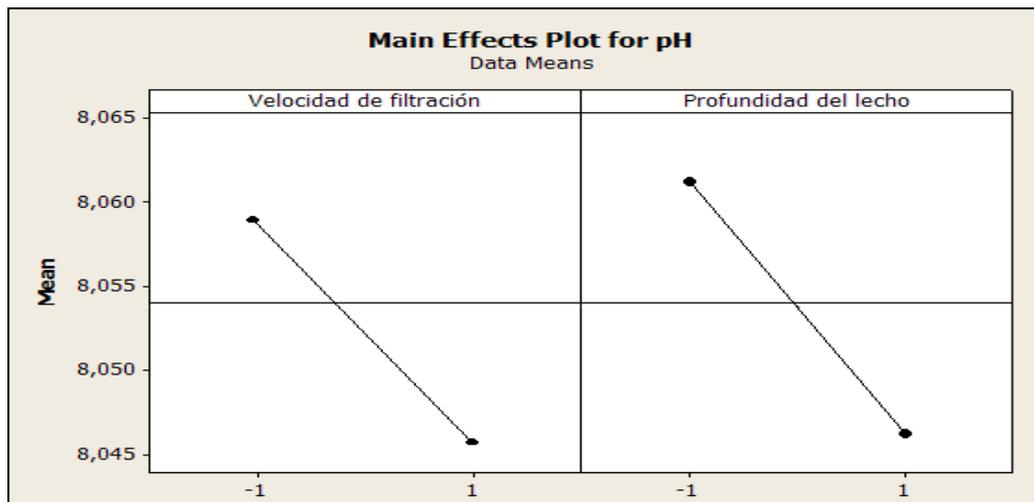


Fig. 7.5: Gráfica de principales efectos para pH (Velocidad de Filtración y Profundidad de lecho).

- Las figuras 7.6 y 7.7 muestran que a mayor granulometría y profundidad de lecho se reduce la alcalinidad y a mayor tiempo de contacto es cuando es más notoria la reducción de la alcalinidad mientras que a mayor velocidad de filtración baja la alcalinidad pero en cambio aquí la pendiente de la línea no es tan pronunciada para la interacción #16.

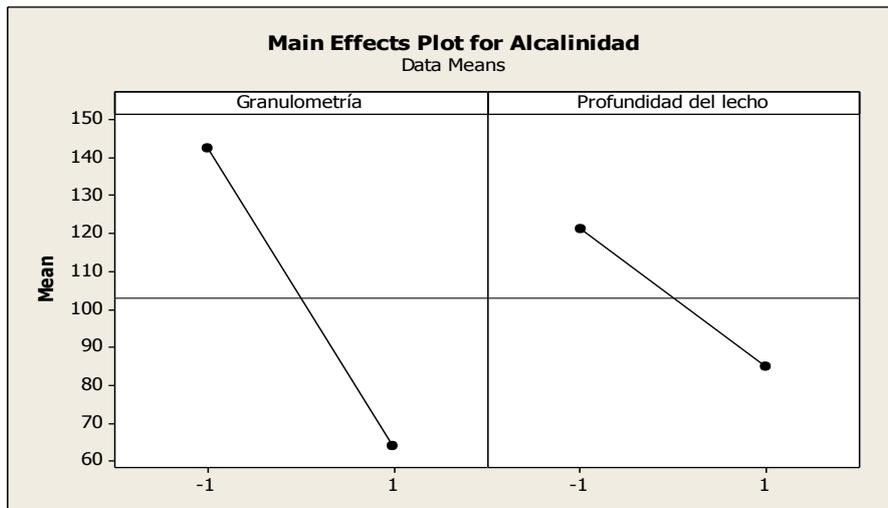


Fig. 7.6: Principales efectos para Alcalinidad (Granulometría y Profundidad de lecho).

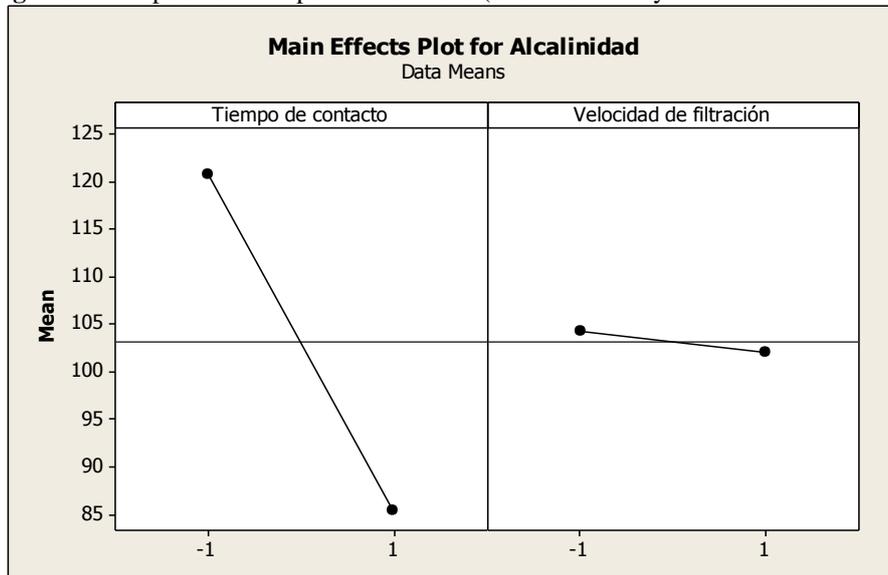


Fig. 7.7: Principales efectos para Alcalinidad (Tiempo de contacto y Velocidad de filtración).

- Los diseños experimentales permiten la simulación de modelos como ya se explicó anteriormente para determinar el comportamiento de los factores de entrada para que sirvan de guía y permitan reducir el número de interacciones adecuadas pero en este trabajo se valorará además los resultados que se han obtenido en la práctica, es decir, mediante los análisis de laboratorio.

- Las cuatro variables que se escogieron controlan totalmente el funcionamiento y eficiencia del filtro ya que se observa que a mayor tamaño del grano, tiempo de contacto, velocidad de filtración y profundidad del lecho se obtienen los mejores resultados.
- La interacción # 16 es la que vincula las cuatro cualidades óptimas de las variables del filtro y las gráficas para las demás variables de salida se pueden observar en la sección de anexos.
- El diámetro de 5 mm presenta mejores resultados debido a que su porosidad es mayor que la generada por el otro diámetro de grano.
- A mayor tiempo de contacto aumenta el tiempo de contacto permitiendo que el material adsorbente retenga mayor cantidad de contaminantes.
- Entre los dos valores de velocidad de filtración analizados el de 150 ml/min es el que presenta mejores resultados de proceso.
- A mayor profundidad de lecho aumenta el tiempo de retención, así como el tiempo y espacio de interacción zeolita/contaminante.
- A medida que aumenta el tamaño del grano los espacios vacíos son de mayor tamaño, aumentando la posibilidad de adsorción de contaminantes.
- Todos los parámetros que han sido analizados han sido comparados con lo establecido en la NTE INEN 1108 para determinar el cumplimiento de las especificaciones como agua potable, los resultados finales se pueden apreciar en la tabla 7.6.

- La eficiencia del filtro a través del porcentaje de remoción se determinó con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Remoción} = \frac{(C_o - C_f)}{(C_o)} \times 100 \quad (\text{Fórmula 7.8})$$

Tabla 7.19: Determinación de la eficiencia del filtro.

PARÁMETRO	% REMOCIÓN
Amonio	100
Coliformes totales	99,96
Color	100
Dureza total	82,35
Nitratos	46,67
Nitritos	100
Sulfatos	100
Sólidos totales disueltos	78,39
Turbidez	93,33
pH	11,9
EFICIENCIA DEL FILTRO	81,26

- De acuerdo al porcentaje de remoción de los diferentes contaminantes en el proceso el promedio de la eficiencia del filtro es superior al 80%, lo cual se considera satisfactorio al cumplir con las expectativas planteadas.
- Los valores obtenidos en la primera etapa de tratamiento se consideran como una deficiencia que se resuelve utilizando un papel filtro de 0,2 mm y una segunda corrida por la columna.
- Con el fin de complementar el proceso y que los resultados del agua tratada se encuentren dentro de lo estipulado en la NTE INEN 1108 es necesario la agitación y decantación del agua antes de ser filtrada.

CONCLUSIONES

Se determinó la calidad del agua cruda del Río San Pedro presentando los valores observados en la tabla 7.1.

Para la elaboración del reactor pasivo se utilizó la zeolita tipo clinoptilolita que es un aluminosilicato que se caracteriza por su gran capacidad de adsorción, intercambio iónico así como por su gran porosidad.

De acuerdo a los resultados de los análisis de laboratorio de las aguas tratadas se demostró que para que la zeolita tenga una acción desinfectante sólo es necesaria una cantidad de 0,5 meq de H_2O_2 con una concentración del 20%.

La zeolita adsorbió 0,5 meq de H_2O_2 teniendo una capacidad de adsorción de hasta 3352 meq por lo tanto, en condiciones de que fuera necesaria una mayor acción desinfectante por el aumento de los valores de coliformes, la zeolita es capaz de retener una mayor cantidad de H_2O_2 en su estructura y de igual manera sucede si la carga de sólidos de las aguas fuera mayor.

El reactor pasivo constituido por una granulometría de 5 mm, un tiempo de contacto de 30 minutos, una velocidad de filtración de 0,07 gpm y una

profundidad del lecho de 2,12 mts. es el método de filtración seleccionado para la recuperación de las aguas del Río San Pedro.

Los resultados de los análisis de laboratorio desarrollados sobre las muestras demuestran la validez del filtro propuesto cuya eficiencia es del 81,26%.

De acuerdo a los cálculos que se realizaron para el diseño del reactor las dimensiones adecuadas para la columna fueron de 8 in. de diámetro y 3,18 metros de longitud para así obtener una producción de 0,07 galones por minutos, es decir, que aproximadamente en 9 horas se consigue 150 litros diarios de agua para abastecer el consumo de una familia de cinco personas.

Para la implementación del reactor pasivo instalado a nivel domiciliario se requiere de una inversión de 39,01 USD.

De acuerdo a los análisis desarrollados las condiciones finales del agua cumplen con las normas nacionales de agua para consumo humano NTE INEN 1108. Ver tabla 7.6.

La hipótesis que se establece en este trabajo es positiva asegurando que es factible la aplicación de un reactor pasivo para recuperar las aguas del Río San Pedro en las coordenadas (X_UTM:780296 y Y_UTM:9959760) para que una vez tratadas sean destinadas para el consumo humano.

RECOMENDACIONES:

Con el fin de reducir costos para el sistema y ya que está enfocado para poblaciones con bajo poder adquisitivo el tipo de material que más se recomienda para la tubería es de PVC reforzado.

Se recomienda determinar el período de utilidad del filtro de zeolitas sintetizadas y de igual manera los procedimientos bajo los cuales el filtro pueda ser regenerado y permita la continuidad de su uso.

Evaluar la posibilidad de que la zeolita saturada pueda ser utilizada como dispersante de nitrógeno y fósforo recuperado para ser aplicado en suelos agrícolas.

Debido a que las zeolitas ejercen una acción de encapsulamiento de contaminantes que sólo bajo condiciones climáticas extremas de temperatura sería posible la liberación de los contaminantes no es necesario un confinamiento ni disposición especial del filtro usado.

BIBLIOGRAFÍA:

- 1) APHA. Métodos Estándar para el examen de aguas y aguas de desecho, edición 11, México, Editorial Interamericana S.A, 1963.
- 2) APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater, 19th edition, Washington, D.C, 1995.
- 3) BABCOCK, H, Russell. Instrumentación y control en el tratamiento de aguas potables, industriales y de desecho, México, Editorial Limusa-Wiley, 1971.
- 4) BARNES, D. Water and Wastewater Engineering Systems, Gran Bretaña, Editorial Pitman Books Limited, 1981.
- 5) BLACK, E, Meter. Watershed Hydrology, Editorial Ann Arbor Press, Michigan, 1996.
- 6) CEPAL. Recursos Hídricos en América Latina y el Caribe, México, 2005.
- 7) CHEETHAM, A, K. Very open microsporous materials: from concept to reality, 2001.
- 8) CHRISTIE, Tony. New Zealand Mining, 2002.
- 9) CORBITT, A, Robert. Standard Handbook of Environmental Engineering, Editorial McGraw-Hill, New York, 1990.
- 10) CORMIER, E, William. Chemical Engineering Progress, 1999.
- 11) DMMA. Plan de Manejo de la Calidad del Agua, Quito, 2005.
- 12) EPA. Handbook for Sampling and Sample Preservation of Water and Wastewater, Cincinnati, 1982.

- 13) FONAG. Diagnóstico de la situación actual de las subcuencas de los ríos San Pedro y Pita, Quito, 2003.
- 14) GAVASKAR, A, Gupta. Final Design Guidance for Application of Permeable Reactive Barriers for Groundwater Remediation, Ohio, 2000.
- 15) GEYER, C, John. Purificación de Aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales, México, Editorial Limusa, 1989.
- 16) HARDENBERGH, W, A. Ingeniería Sanitaria, México, Compañía Editorial Continental S.A, 1966.
- 17) HILLEBOE, E, Herman. Manual de tratamiento de aguas, México, Editorial Limusa, 1991.
- 18) INEN. Agua. Calidad del Agua. Muestreo. Diseño de los programas de muestreo, Quito, 2000.
- 19) INEN. Agua. Calidad del Agua. Muestreo. Manejo y conservación de muestras, Quito, 1998.
- 20) INEN. Agua. Calidad del Agua. Muestreo. Técnicas de muestreo, Quito, 1998.
- 21) KARGE, H, G. Molecular sieves: Science and technology, Editorial Springer, New Cork, 1998.
- 22) KIELY, Gerard. Ingeniería Ambiental Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión, Editorial McGraw-Hill, Madrid, 1999.
- 23) LUNA, J, Fernando. Modificacacao de Zeólitas para uso em catálise, 2000.
- 24) MASKEW, F, Gordon. Elements for Water Supply and Wastewater disposal, New York, Editorial John Wiley & Sons, 1971.
- 25) MICROSOFT CORPORATION. Enciclopedia Encarta, 2006.
- 26) MINISTERIO DE SALUD PÚBLICA. Situación de la Salud del Ecuador, Quito, 2006.
- 27) NOLL, K, E. Adsorption Technology, Lewis Publishers Inc, 1992.
- 28) OMS. Informe Regional sobre la Evaluación 2000 en la Región de las Américas, 2000.
- 29) OMS. Informe sobre la salud en el Mundo, 2007.

- 30) OPS. Health in Americas, 2007.
- 31) OPS. La Calidad del Agua Potable en América Latina, 1996.
- 32) OPS. Situación de Salud Ecuador, 2006.
- 33) OPS. Situación de salud en las Américas, Washington, 2007.
- 34) PNUMA. Informe anual y Situación de la red Mundial del Programa GEMS/Agua del PNUMA, 2004.
- 35) REYNOLDS, D, Tom. Unit Operations and Processes in Environmental Engineering, California, Editorial Wadsworth, 1982.
- 36) SÁBATER, G, Bartolomé. Diccionario de Química, Madrid, Ediciones Generales Anaya, 1985.
- 37) SCHMIDT, Wolfgang. Handbook of Porous Solids, Heidelberg, Editorial Wiley-VCH, 2002.
- 38) SPARKS, L, Donald. Environmental Soil Chemistry, San Diego, Editorial Academic Press, 1995.
- 39) TEUTSCH, G, Schüth. Reaktive Wände: Stand der Technik, Planung, Implementierung, 1999.
- 40) THORNTON, M, Robert. Química Orgánica, México, Editorial Addison Wesley Longman, 1998.
- 41) UNESCO. Water for people, water for life: The United Nations World Water development Report, 2003.

DIRECCIONES ELECTRÓNICAS:

- 1) <http://www.agualatinoamerica.com/NewsView.cfm?pkArticleID=115>
- 2) http://www.americanchemistry.com/s_chlorine/sec_content.asp?CID=1198&DID=4552&CTYPEID=107
- 3) <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/caliagua/mexico/02289e08.pdf>
- 4) <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/chile14/olor.pdf>
- 5) <http://www.bza.org/zeolites.html>

- 6) http://www.caders.gov.ec/docs/PLAN_AMBIENTAL_CADERS.pdf
- 7) http://www.catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/davila_nir/capitulo6.pdf
- 8) <http://www.ciese.org/curriculum/diproj2/es/fieldbook/oxigeno.shtml>
- 9) http://www.coli.usal.es/Web/educativo/m_especial/15atexto2.htm
- 10) <http://www.cti.espol.edu.ec>
- 11) <http://www.disper.info/docesp/doAlghumEsp.pdf>
- 12) http://www.eco-sitio.com.ar/ea_os_tratamiento_agua.htm
- 13) <http://www.filtrar.net/preguntas/problemasaguad.htm>
- 14) <http://www.lenntech.com/espanol/FAQ-contaminacion-agua.htm>
- 15) <http://www.lenntech.com/espanol/Desinfeccion-del-agua/desinfectantes-subproductos.htm>
- 16) <http://www.lenntech.com/espanol/Desinfeccion-del-agua/Factores-definfeccion-agua.htm>
- 17) <http://www.serina.com.es/escaparate/verproducto.cgi?idproducto=3701&refcompra=NULO>
- 18) www.scilet.com
- 19) <http://sleekfreak.ath.cx:81/3wdev/CONMATES/SKO1MS09.HTM>
- 20) http://www.tdx.cesca.es/TESIS_URV/AVAILABLE/TDX-0602103-142815//TesisPhD.pdf
- 21) http://www.who.int/water_sanitation_health/monitoring/2000globs1.pdf
- 22) www.who.org

GLOSARIO:

Asintomático: Que no presenta síntomas de enfermedad.

APHA: American Public Health Association

Bioacumulación: El aumento de la concentración de una sustancia en organismos vivos debido al contacto de éste con agua, aire o alimento contaminado, debido a la lenta metabolización y excreción.

Catiónicos: Se caracterizan por poseer una carga neta positiva en su parte hidrófila.

CEPAL: Comisión Económica para América Latina y el Caribe.

Cianosis: Patología caracterizada por un color azul de la piel y las mucosas debido a un aumento superior a 5g/dl de la hemoglobina reducida en la sangre.

Coliformes: Bacterias patógenas presentes en los intestinos de los animales de sangre caliente, en el agua y en las aguas residuales, cuya cantidad indica el nivel de contaminación.

Counterion: Ión de carga opuesta.

DBO: Cantidad de oxígeno requerido para la descomposición de la materia orgánica por los organismos unicelulares. Se utiliza para medir la cantidad de contaminación orgánica.

Decil: Los deciles son ciertos números que dividen la sucesión de datos ordenados en diez partes porcentualmente iguales.

DMMA: Dirección Metropolitana de Medio Ambiente

DQO: Cantidad de oxígeno consumido en la oxidación de la materia orgánica y materia inorgánica oxidable.

Escorrentía: Movimiento lateral del agua sobre la superficie del suelo debido a las fuerzas gravitacionales.

Estupor: Disminución de la actividad de las funciones intelectuales.

Eutroficación: Aumento de la concentración de nutrientes en un ecosistema acuático.

Fieltro: Tejido que se fabrica entrelazando fibras de lana sin hilar, a veces mezcladas con pequeñas cantidades de fibras vegetales o sintéticas.

Hidrofóbico: Que muestra aversión por el agua.

Hidrofílico: Que muestra afinidad con el agua.

Isotrópico: Sustancia cuyas propiedades físicas son las mismas en todas direcciones.

Legionella: Es una bacteria Gram negativa con forma de basilo. Su crecimiento se ve favorecido por la presencia de materia orgánica. Existen 48 especies dentro del género *Legionella*.

Letargo: Síntoma de una enfermedad infecciosa caracterizada por un estado de somnolencia profunda y prolongada.

Mesófilos: Son microorganismos capaces de vivir en temperaturas óptimas de 25-40°C y máximas de 35-47°C.

Microorganismos: Son organismos simples, unicelulares o multicelulares formados por protozoos, algas, hongos, virus y bacterias.

Mutágeno: Que causa alteración del material genético de un organismo, conduciendo a diferencias heredadas.

Naegleria: Género de protistas de vida libre patogénicas. Tienen una forma trofozoita (vegetativa) y una forma de resistencia (quiste).

Percolación: Acción de moverse a través de un medio poroso.

Sinergismo: Es toda acción cuya potencia es mayor que la suma de sus partes.

Shigella: Es un género de bacteria con forma de bastoncillo Gram negativas, no móviles, no formadoras de esporas e incapaces de fermentar la lactosa, pueden ocasionar diarrea en los seres humanos.

SPD (Subproductos de desinfección): Son compuestos formados cuando los desinfectantes (cloro, ozono, etc) reaccionan con bromuros y materia orgánica presente en el agua.

Teniasis: Infección del intestino humano causada por distintas especies de tenia como la *taenia saginata*, *solium*, etc.

Teratogénico: Que produce malformaciones en el embrión o feto.

Termófilos: Son las únicas formas de vida capaces de vivir en temperaturas óptimas de 50-75°C y máximas de 80-113°C.

Vitreas: Dícese del brillo de los minerales semejante al de un cristal roto, no cristalino y amorfo.

ANEXOS

ANEXO N°1: Formato de la encuesta realizada en el Barrio La Victoria.

UNIVERSIDAD DE LAS AMERICAS
INGENIERIA AMBIENTAL
ENCUESTA #

La falta de acceso a agua potable en ciertas zonas de la población ha motivado el estudio e implementación de un sistema de tratamiento en el Río San Pedro con el fin de mejorar el aprovisionamiento de agua para el consumo y uso de la población logrando así mejorar la calidad de vida de los mismos.

1. NOMBRE DEL ENCUESTADO: _____
2. NÚMERO DE CÉDULA: _____
3. TIPO DE ACTIVIDAD A LA QUE SE DEDICA:
 - a) Agrícola _____
 - b) Pecuaria _____
 - c) Pastoreo _____
 - d) Otras _____
4. CANTIDAD DE INGRESOS MENSUALES:
 - a) 100 a 200 USD _____
 - b) 200 a 300 USD _____
 - c) 300 a 400 USD _____
 - d) Más de 400 USD _____
5. NÚMERO DE PERSONAS QUE CONFORMAN LA FAMILIA: _____
6. ¿DISPONE DE AGUA POTABLE? SI _____ NO _____
7. ¿CUÁNTO PAGA MENSUALMENTE POR EL SERVICIO DE AGUA QUE DISPONE?
 - a) 2 USD a 5 USD _____
 - b) 10 USD a 20 USD _____
 - c) 25 USD a 30 USD _____
 - d) 35 USD a 40 USD _____
8. EL SERVICIO DE AGUA POTABLE PODRÍA CONSIDERARSE COMO:
 - a) Buena Calidad _____
 - b) Continuidad del servicio _____
 - c) Cubre totalmente las necesidades requeridas _____
9. ¿CUÁL DE ESTOS MEDIOS DE PROVISIÓN DE AGUA USTED UTILIZA?
 - a) Pozo _____
 - b) Río _____
 - c) Acequia _____
 - d) Canal _____
 - e) Vertiente _____
 - f) Carro repartidor _____
10. ¿CONOCE UD. EL COSTO DEL m³ POR AGUA? SI _____ NO _____
¿EN CASO DE CONOCERLO NOS PODRÍA DECIR CUÁNTO ES? _____
11. EN CASO DE QUE EXISTIERA UN SERVICIO ALTERNATIVO DE AGUA POTABLE A BAJO COSTO OPTARIA POR EL? SI _____ NO _____
12. EN SU HOGAR SE HA PRESENTADO ALGÚN TIPO DE ENFERMEDAD POR EL CONSUMO O USO DE AGUA.
 - a) Cólera _____
 - b) Hepatitis _____
 - c) Fiebre tifoidea _____
 - d) Infecciones gastrointestinales _____
 - e) Disentería _____

- f) Diarrea _____
- g) Enfermedades cutáneas _____
- h) Enfermedades oculares _____
- i) Ninguna _____

13. ¿PARA QUE UTILIZA EL AGUA?

- a) Consumo _____
- b) Higiene personal _____
- c) Limpieza de utensilios _____
- d) Riego _____
- e) Otros _____

14. EN VERANO O BAJO OTRAS CONDICIONES EXTREMAS CUAL DE ESTOS MEDIOS DE PROVISIÓN TIENE DISPONIBLE

- a) Pozo _____
- b) Río _____
- c) Acequia _____
- d) Canal _____
- e) Vertiente _____
- f) Carro repartidor _____
- g) Tanque de reserva _____

15. ¿CUÁL ES EL COSTO ECONÓMICO POR NO TENER AGUA?

- a) Tiempo de acarreo _____
- b) Gastos en hervir agua _____
- c) Compra de agua embotellada _____
- d) Gastos en enfermedades de origen hídrico _____

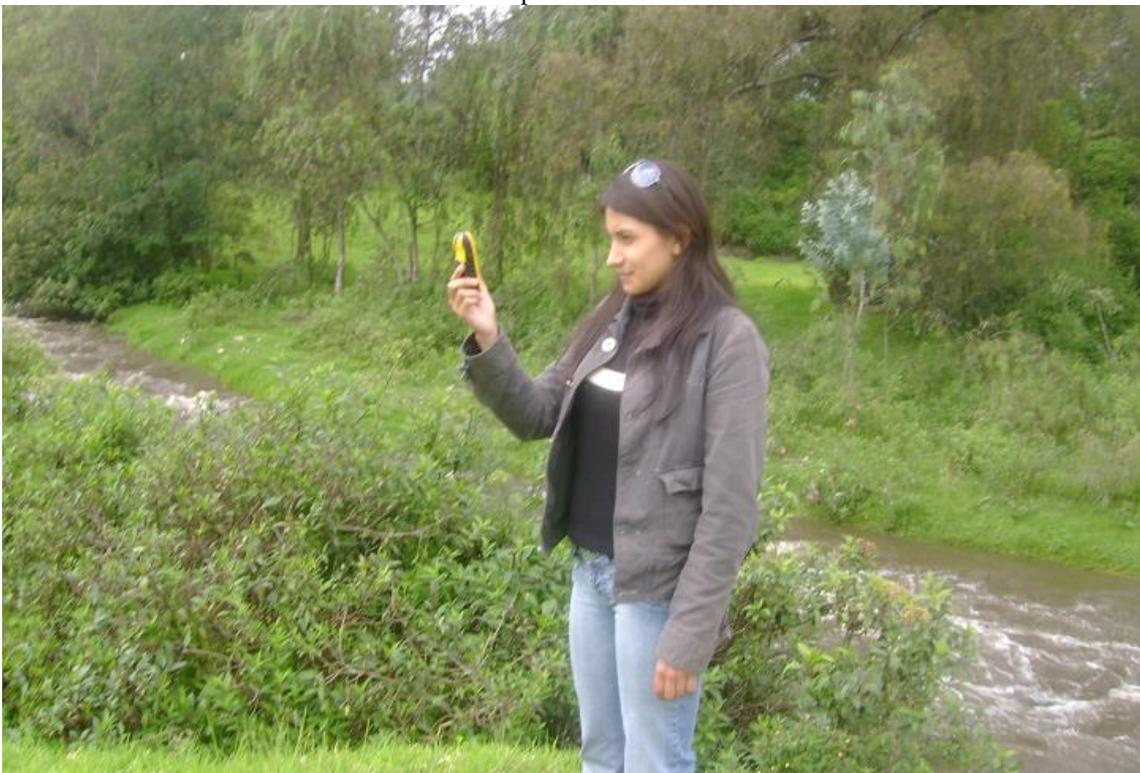
16. ¿CUÁL ES LA CANTIDAD DE AGUA QUE UTILIZA POR DÍA EN SU HOGAR?

- a) 50 – 100 lt/d _____
- b) 100 – 150 lt/d _____
- c) 150 – 200 lt/d _____
- d) Más de 200 lt/d _____

ANEXO N°2: Vista del Río San Pedro desde el punto de muestreo coordenadas (X_UTM: 780296 y Y_UTM: 9959760).



ANEXO N°3: Medición de las coordenadas del punto de muestreo con un GPS.



ANEXO N°4: Recolección de muestras.



ANEXO N°5: Fotografía del reactor pasivo a nivel de laboratorio.



ANEXO N°6: Análisis del agua final tratada con el fotómetro.



