



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

**IRRIGACIÓN DE CULTIVOS, UNA PROPUESTA PARA LA  
CORRECTA DISPOSICIÓN FINAL DE LAS AGUAS RESIDUALES  
TRATADAS**

**Gerardo Enrique Palomo Mahr**

Asesorado por el Ing. Marco Vinicio Ochoa Galindo

Guatemala, septiembre de 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**IRRIGACIÓN DE CULTIVOS, UNA PROPUESTA PARA LA CORRECTA  
DISPOSICIÓN FINAL DE LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**GERARDO ENRIQUE PALOMO MAHR**

ASESORADO POR EL ING. MARCO VINICIO OCHOA GALINDO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

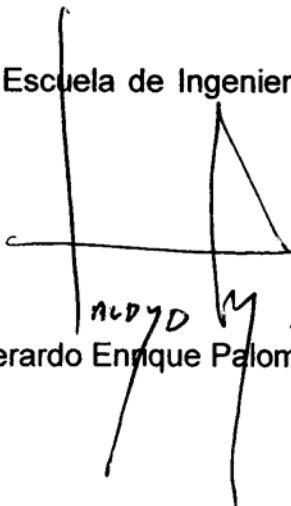
DECANO	Ing. Roberto Mayorga Rouge
EXAMINADOR	Ing. Carlos Rodolfo Fernández Sierra
EXAMINADOR	Ing. Edwin Raúl Barrios Ambrosy
EXAMINADOR	Ing. Héctor Hugo Aguilar Morán
SECRETARIO	Ing. René Andrino Guzmán

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### IRRIGACIÓN DE CULTIVOS, UNA PROPUESTA PARA LA CORRECTA DISPOSICIÓN FINAL DE LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Civil,  
con fecha 21 de octubre de 2010.



Gerardo Enrique Palomo Mahr

Guatemala, 17 de enero de 2011.

Ingeniero  
**Pedro Antonio Aguilar Polanco**  
Jefe del Departamento de Hidráulica  
Facultad de Ingeniería

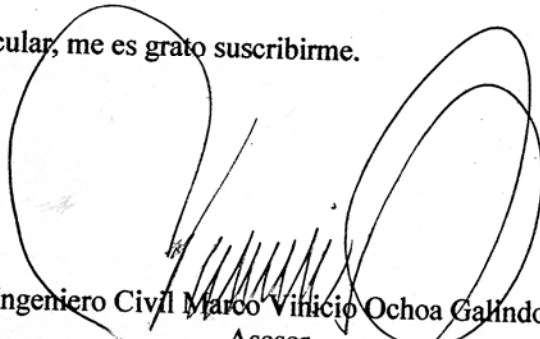
Estimado Ingeniero Aguilar Polanco:

Por este medio me permito informarle que como Asesor del trabajo de graduación del estudiante universitario **Gerardo Enrique Palomo Mahr** de la carrera de Ingeniería Civil, con carné No. **81-90013**, procedí a revisar dicho trabajo, cuyo título es: **“IRRIGACIÓN DE CULTIVOS, UNA PROPUESTA PARA LA CORRECTA DISPOSICIÓN FINAL DE LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS”**.

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

  
Ingeniero Civil Marco Vinicio Ochoa Galindo  
Asesor

Marco Vinicio Ochoa Galindo  
Ingeniero Civil  
Colegiado No. 2,871



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
www.ingenieria-usac.edu.gt



Guatemala,  
4 de febrero de 2011

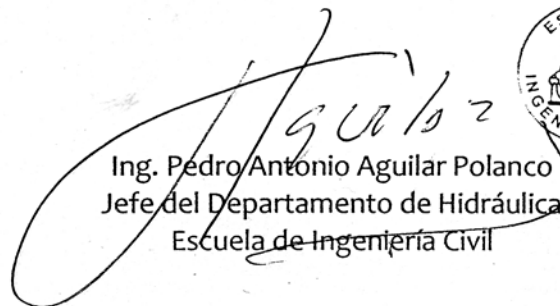
Ingeniero  
Hugo Leonel Montenegro Franco  
Director de la Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Guatemala

Estimado Ingeniero Montenegro.

Atentamente y por este medio, envío a usted, el trabajo de graduación desarrollado por el estudiante **Gerardo Enrique Palomo Mahr**, titulado **IRRIGACIÓN DE CULTIVOS, UNA PROPUESTA PARA LA CORRECTA DISPOSICIÓN FINAL DE LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS**.

Por lo que, habiendo cumplido con los objetivos y los requisitos de ley del referido trabajo; y existiendo la **APROBACIÓN DEL MISMO**, por parte del Asesor Ing. Marco Vinicio Ochoa Galindo y habiéndose efectuado todas las observaciones técnicas, el suscrito lo da por **APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Jefe del Departamento de Hidráulica  
Escuela de Ingeniería Civil



FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO  
DE  
HIDRAULICA  
USAC




UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
www.ingenieria-usac.edu.gt



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Marco Vinicio Ochoa Galindo y del Jefe del Departamento de Hidráulica, Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco, al trabajo de graduación del estudiante Gerardo Enrique Palomo Mahr, titulado IRRIGACIÓN DE CULTIVOS, UNA PROPUESTA PARA LA CORRECTA DISPOSICIÓN FINAL DE LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

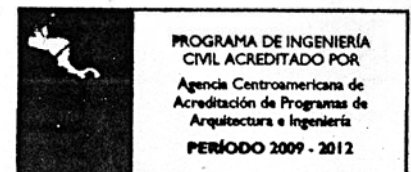
  
Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco

  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
DIRECTOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA

Guatemala, septiembre de 2011.

/bbdeb.

Más de 130 Años de Trabajo Académico y Mejora Continua





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado **IRRIGACIÓN DE CULTIVOS, UNA PROPUESTA PARA LA CORRECTA DISPOSICIÓN FINAL DE LAS AGUA RESIDUALES TRATADAS**, presentado por el estudiante universitario **Gerardo Enrique Palomo Mahr**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Ruiz Recinos  
Decano



Guatemala, septiembre de 2011

/cc



## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Dios**

Por darme la vida y la salud.

**Mi esposa e hijas**

Anabella, María Andrea e Isabella María por confiar en mí.

**Mis padres**

Eduardo Palomo Escobar y Ana María Mahr de Palomo por su apoyo.

**Mi familia**

Hermanos y tíos por su lealtad.

**Mis amigos y compañeros**

Por su amistad.

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XV
OBJETIVOS	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1. Situación actual de la disposición de las aguas residuales en el país	1
1.2. Discusión sobre algunas caracterizaciones de aguas residuales, de muestras de agua tomadas en descargas de 2 municipios en el país	11
2. REVISIÓN DE LA NORMATIVA AMBIENTAL RELATIVA A LA DISPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES	15
2.1. Normativas de cumplimiento nacional	15
2.2. Normativas de cumplimiento específico	21
2.3. Comparación de las características propias de las aguas residuales y las normas ambientales	21

3.	EFICIENCIA DE LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO DISPONIBLES EN EL PAÍS, CONTRA LOS PARÁMETROS ESTABLECIDOS EN LA NORMATIVA AMBIENTAL VIGENTE	25
3.1.	Parámetros de calidad ambiental	27
3.2.	Parámetros de calidad sanitaria	29
3.3.	Parámetros de calidad agronómica	31
4.	MANEJO DE LOS NUTRIENTES Y LOS PATÓGENOS; EXPERIENCIAS EN OTROS PAÍSES DEL MUNDO	33
4.1.	Experiencias en Europa y Estados Unidos	33
4.2.	Experiencias en Latinoamérica	34
4.3.	Algunas experiencias nacionales	37
4.4.	Guías de la OMS respecto a la reducción de patógenos en las aguas residuales	39
4.5.	Miedo al cambio, actitud a vencer por parte de promotores sociales en el área	40
5.	LAGUNAS DE MADURACIÓN, ELEMENTOS DE MUY BAJO COSTO PARA LA REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN EL AGUA	41
5.1.	Ventajas y desventajas de estos elementos	42
5.2.	Consideraciones de diseño	43
6.	PROPUESTA DE IRRIGACIÓN	45
6.1.	Irrigación a través de canales	45

CONCLUSIONES	49
RECOMENDACIONES	51
BIBLIOGRAFÍA	53



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Relación entre la dinámica poblacional, el uso del agua y los impactos causados al ambiente y a la misma población	1
2.	Porcentaje de uso de agua fresca por sector productivo	2
3.	Análisis energético de sistemas anaeróbicos y aeróbicos	27
4.	Calidad de las aguas residuales en función de su contenido	28

## TABLAS

I.	Tratamiento de aguas servidas, como porcentaje del total de aguas servidas recolectadas (CIRCA 2004)	4
II.	Cantidad total (m <sup>3</sup> ) de aguas residuales, inferido a partir de datos reportados por el INE, entre 2001 y 2006	5
III.	Sitios que cuentan con algún tipo de tratamiento de aguas residuales, a nivel nacional	9
IV.	Caracterizaciones de dos muestras de aguas residuales	12
V.	Parámetros típicos de aguas residuales municipales, según distintas fuentes	13
VI.	Límites máximos de contaminación para la descarga de las aguas servidas municipales (según el Acuerdo Gubernativo 60-89 de fecha 7 de febrero de 1989)	16
VII.	Parámetros de medición para determinar las características de las aguas residuales, según el Acuerdo Gubernativo 236-2006	17

VIII.	Límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, según el Artículo 20 del Acuerdo Gubernativo 236-2006	18
IX.	Límites máximos permisibles para entes generadores, según el Artículo 7 del Acuerdo Gubernativo 51-2010	20
X.	Comparación de las características propias de las aguas residuales, producidas en dos municipios, con los límites establecidos en el Acuerdo Gubernativo 236-2006	23
XI.	Remoción esperada de microorganismos	30
XII.	Experiencias de reutilización de aguas residuales en Francia	34
XIII.	Área agrícola, regada con aguas residuales en América Latina	35
XIV.	Valor agronómico de las aguas residuales, según mediciones llevadas a cabo en Tacna, Perú	36
XV.	Tipo de cultivos y superficie irrigada con aguas residuales, tratadas en la ciudad de Mendoza, Argentina	37
XVI.	Directrices de la OMS sobre la calidad microbiológica y parasitológica para uso de aguas residuales en la agricultura	39
XVII.	Características típicas de las lagunas de maduración	43
XVIII.	Clasificación de cultivos de acuerdo con su tolerancia a las sales	47

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>COS</b>	Carga orgánica superficial
<b>CIRH</b>	Cuenta Integrada de Recursos Hídricos
<b>DQO</b>	Demanda química de oxígeno
<b>dS/m</b>	Expresión de la conductividad eléctrica de una sustancia (decisiemens por metro)
<b>FT</b>	Fósforo total
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>Ha</b>	Hectárea
<b>INFOM</b>	Instituto de Fomento Municipal
<b>CE</b>	Media de la conductividad eléctrica
<b>mg/L</b>	Miligramos por litro
<b>NT</b>	Nitrógeno total
<b>NMP/100 ml</b>	Número más probable por 100 mililitros
<b>CFU</b>	Número/conteo de unidades formadoras de colonias (otra forma de medir la concentración de coliformes fecales)
<b>PTAR</b>	Planta de tratamiento de aguas residuales
<b>pH</b>	Potencial hidrógeno



**SS**

Sólidos en suspensión

## GLOSARIO

<b>Aguas residuales</b>	Son las aguas que han recibido uso y cuyas calidades han sido modificadas.
<b>Aguas residuales de tipo ordinario</b>	Son las aguas residuales, generadas por las actividades domésticas, tales como; uso en servicios sanitarios, pilas, lavamanos, lavatrastos, lavado de ropa y otras similares, así como la mezcla de las mismas, que se conduzcan a través de un alcantarillado.
<b>Alcantarillado público</b>	Es el conjunto de tuberías y obras accesorias, utilizadas por la municipalidad, para recolectar y conducir las aguas residuales de tipo ordinario o de tipo especial, o combinación de ambas que deben ser previamente tratadas antes de descargarlas a un cuerpo receptor.
<b>Caudal</b>	Es el volumen de agua por unidad de tiempo.
<b>Cianobacterias</b>	(También conocidas como algas verde-azuladas <i>blue-green algae</i> ), son bacterias que obtienen su energía a través de la fotosíntesis. A nivel ecológico son causantes de la disminución de la biodiversidad por ser altamente tóxicas.

<b>Coliformes fecales</b>	Es el parámetro que indica la presencia de contaminación fecal en el agua y de bacterias patógenas, provenientes del tracto digestivo de los seres humanos y animales de sangre caliente.
<b>Cuerpo receptor</b>	Es el embalse natural, lago, laguna, río, quebrada, manantial, humedal, estuario, estero, manglar, pantano, aguas costeras y aguas subterráneas donde se descargan aguas residuales.
<b>Demanda bioquímica de oxígeno</b>	Es la medida indirecta del contenido de materia orgánica en aguas residuales, que se determina por la cantidad de oxígeno utilizado en la oxidación bioquímica de la materia orgánica biodegradable, durante un período de cinco días y una temperatura de veinte grados Celsius.
<b>Demanda química de oxígeno</b>	Es la medida indirecta del contenido de materia orgánica e inorgánica oxidable en aguas residuales, que se determina por la cantidad equivalente de oxígeno utilizado en la oxidación química.
<b>Detergentes</b>	Son productos de limpieza potentes que pueden contener ácidos, álcalis o fosfatos fuertes.

<b>Ente generador</b>	Es la persona individual o jurídica, pública o privada, responsable de generar o administrar aguas residuales de tipo especial, ordinario o mezcla de ambas, y cuyo efluente final se descarga a un cuerpo receptor.
<b>Entes generadores existentes</b>	Son los entes generadores establecidos previo a la vigencia del “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos” (236-2006).
<b>Entes generadores nuevos</b>	Son los entes generadores establecidos posteriormente a la vigencia del “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos” (236-2006).
<b>Eutrofización</b>	Del griego <i>eutros</i> que significa “bien alimentado”. Es el proceso de disminución de la calidad de un cuerpo de agua, como consecuencia del aumento de nutrientes, lo que a su vez propicia el desarrollo de microorganismos y limita la disponibilidad de oxígeno disuelto que requiere la fauna y flora.

<b>Fertirriego</b>	Es la práctica agrícola, que permite el reuso de un efluente de aguas residuales, que no requiere tratamiento, a fin de aprovechar los diversos nutrientes que posee para destinarlos en la recuperación y mejoramiento de suelos así como en fertilización de cultivos que no se consuman crudos o precocidos.
<b>Huevos de helmintos</b>	Son un grupo de organismos, que incluye a los nematodos, trematodos y cestodos. Estos varían de muy frágiles a muy resistentes. El más resistente de todos es el Ascaris, el cual puede sobrevivir más de un año.
<b>Lago</b>	Es un cuerpo de agua encerrado, sin comunicación inmediata con el mar, que puede o no tener salida a otro cuerpo receptor, con una extensión mínima de 10 km <sup>2</sup> y profundidades mayores a 10 metros.
<b>Lagunas de maduración</b>	Lagunas que permiten la estabilización de materia orgánica y la reducción de bacterias de las aguas residuales.
<b>Lagunas facultativas</b>	Son aquellas que poseen una zona aerobia y una zona anaerobia, situadas en la superficie y en el fondo, respectivamente. Por tanto en estas lagunas se puede encontrar cualquier tipo de microorganismos.

**Límite máximo permisible**

Es el valor asignado a un parámetro, el cual no debe ser excedido en las etapas correspondientes para aguas residuales y en aguas para reuso y lodos.

**Macrofitas**

Son plantas adaptadas a los medios muy húmedos o acuáticos, tales como; lagos, estanques, charcos, estuarios, pantanos, orillas de ríos, deltas o lagunas marinas. Se pueden encontrar diferentes grupos de plantas: unas totalmente sumergidas, otras, las más numerosas, parcialmente sumergidas o con hojas flotantes.

**Nematodos**

Los nematodos (*Nematoda*, del griego *nema*, "hilo", *eidés* u *oídos*, "con aspecto de"), también conocidos como nematodos, nematodes y nematelmintos, son un filo de vermes pseudocelomados con más de 25 000 especies registradas, el cuarto del reino animal por lo que se refiere al número de especies, y un número estimado mucho mayor, tal vez 500 000. Existen especies de vida libre, marinas, en el suelo, y especies parásitas de plantas y animales, incluyendo el hombre, al que provocan enfermedades como la triquinosis, filariasis, anquilostomiasis, ascariasis, estrongiloidiasis, toxocariasis.

**Nutriente**

Un nutriente es un producto químico procedente del exterior de la célula y que ésta necesita para realizar sus funciones vitales.

**Reuso**

El aprovechamiento de un efluente tratado o no.

**Sistema de  
tratamiento de aguas  
residuales**

Es cualquier proceso físico, químico, biológico o una combinación de los mismos, utilizado para mejorar las características de las aguas residuales.

## RESUMEN

A nivel regional, Guatemala presenta uno de los peores cuadros en cuanto a tratamiento de las aguas residuales se refiere. Esto de forma directa representa un deterioro ambiental cada vez más sensible, especialmente en cuerpos de agua importantes, no sólo como atracción turística sino como potenciales fuentes de abastecimiento de agua para grandes ciudades (lago de Atitlán, por ejemplo).

Ante esta realidad, es conveniente plantear soluciones que no sólo permitan el rescate de dichos cuerpos de agua, sino que a la vez contribuyan a la economía del país.

La irrigación con aguas residuales tratadas y desinfectadas, contribuiría no sólo en minimizar el daño ya hecho, sino en la economía de ciertas regiones del país dedicadas a la agricultura.

Esta forma de aprovechar las aguas residuales, no está solamente enfocado a países en vías de desarrollo. Estados Unidos y varios países europeos, utilizan gran cantidad de aguas servidas con fines de irrigación de cultivos y áreas verdes.



El ejemplo más claro de reuso de aguas residuales en América Latina es Perú, donde por aspectos de salubridad, se decidió dar un tratamiento terciario a las aguas desechadas desde la capital Lima, utilizando tecnologías de bajo costo (lagunas de estabilización). Esto no sólo dio paso a mejoras sustanciales en la salubridad de quienes adquirirían los productos cosechados con estas aguas, sino benefició a todos los agricultores que anteriormente vieron amenazados sus cultivos.

Guatemala debe tomar estas ideas y adoptarlas. Este es el objetivo del presente trabajo.

# OBJETIVOS

## General

Plantear una opción de remoción de los nutrientes de las aguas tratadas, mediante la reutilización de las aguas en la agricultura.

## Específico

1. Examinar la opción de la disposición en el suelo, de las aguas efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales, como opción a la remoción de nutrientes perjudiciales a los cuerpos de agua.



# INTRODUCCIÓN

Prácticamente, desde que fue posible llevar agua a las ciudades por medio de acueductos y después de que las aguas residuales se condujeran principalmente hacia los ríos como depósito de las mismas, iniciaron los problemas relacionados con la insalubridad.

La bibliografía refiere que debido a la atracción de las grandes urbes generada por la oportunidad de trabajo en las nacientes industrias, las ciudades fueron rápidamente sobrepobladas.

La poca infraestructura que existía, cuyo fin era el de evacuar aguas de lluvia, se convirtió primero de forma clandestina, en receptáculo de desechos humanos de todo tipo, mismos que ya no era posible depositar en los patios traseros que era como se acostumbraba en la época.

Esta aparente solución trajo como consecuencia que los cuerpos de agua, a donde descargaban los drenajes, rebasaran su “sistema natural” de degradación de los desechos, convirtiéndose en cloacas a cielo abierto.

Este fue el caso del río Támesis en la Inglaterra de inicios de la era industrial. Según se refiere, con el fin de “mitigar” el mal olor que este río generaba especialmente en el verano, los habitantes de dicha urbe empapaban las cortinas con perfume.

Poco a poco y gracias a personas como Sir Edwin Chadwick, abogado inglés, fue despertando la conciencia social y la comprensión sanitaria, tanto en el pueblo como en las autoridades. Hoy día y luego de más de 100 años, el río Támesis ha vuelto a ser un cuerpo de agua donde nuevamente existe vida acuática, la cual por muchos años había desaparecido.

Las sociedades modernas, especialmente aquellas del primer mundo, han aprendido las lecciones derivadas de experiencias como la arriba descrita. Esto las ha llevado a realizar grandes inversiones en infraestructura, penalizando a la vez a aquellos entes que generan aguas contaminadas y que quieren descargarlas a algún cuerpo de agua sin el debido tratamiento.

En países como Guatemala, no se conoce exactamente cuándo inició la conducción de las aguas servidas por alcantarillas enterradas, sin embargo, es rara la urbe, por lo menos en las áreas más antiguas, que actualmente no tenga un sistema de drenaje sanitario.

En casi todos los casos sin embargo, no existe un sistema de depuración que mejore la calidad de las aguas que son descargadas a los cuerpos de agua. A pesar del serio deterioro que ya presentaban muchos ríos o lagos importantes, no fue sino hasta 1989 que se promulgó el primer Acuerdo Gubernativo que fijaba la calidad de las aguas depositadas en los mismos.

Este acuerdo sin embargo, además de ser muy ambiguo y muy poco restrictivo, no fue tomado en serio, aún por las municipalidades del país. Esto se tradujo en más deterioro para los cuerpos de agua.

En el 2006, se promulgó el Acuerdo Gubernativo 236-2006, el cual fijaba parámetros bastante más exigentes. A pesar de que este Acuerdo es bastante más completo, pareciera que no se tomó en cuenta en la elaboración del mismo, las condiciones económicas del país.

Es entendible que no se debería escatimar esfuerzos en la protección del ambiente, sin embargo, estos deben estar en línea con las situaciones de los países.

Tanto el Acuerdo Gubernativo citado como el que recientemente se promulgara para el caso de la cuenca del Lago de Atitlán, restringen fuertemente los depósitos de Fósforo total (FT) y Nitrógeno total (NT), por ser ambos nutrientes que fomentan el crecimiento de algas, que a su vez eutrofizan los cuerpos de agua.

La remoción de cualquiera de ambos sin embargo, requiere de tecnologías cuyos costos de construcción, operación y mantenimiento son muy altos. Esto a pesar de ser necesario, pone en serios aprietos a las municipalidades del país, quienes al final de cuentas constituyen los entes llamados a cumplir con dichas reglamentaciones. Por esta razón, es urgente encontrar soluciones que permitan abordar este asunto de una forma económica y sustentable.

El presente trabajo de graduación, plantea una solución para la disposición final de las aguas residuales de tipo ordinario. Este planteamiento toma en cuenta las restricciones ambientales arriba descritas, con el valor agregado de que pueden convertirse en fuente importante de nutrientes (Fósforo y Nitrógeno) para los agricultores de las zonas aledañas a las plantas donde se depuran las aguas desechadas por los centros urbanos.

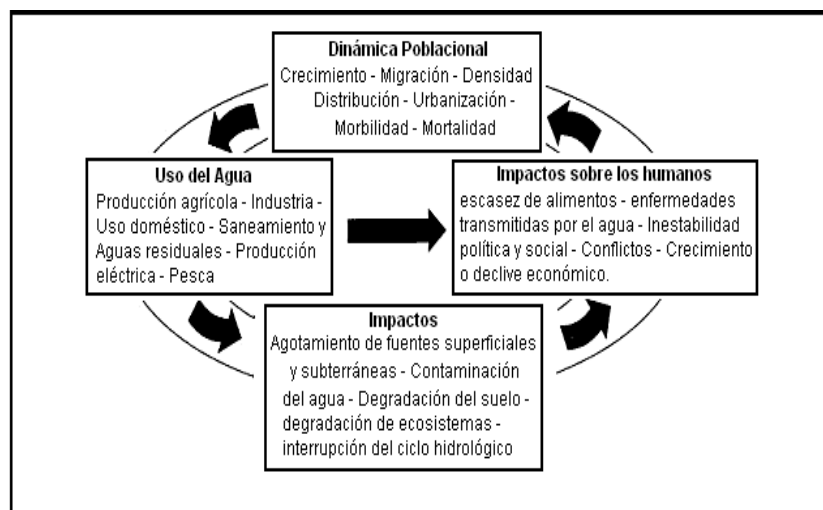
Es importante decir finalmente, que la solución que se discute está siendo implementada en otras regiones del planeta, aún en países del primer mundo donde se reconoce que el agua es un elemento finito, con un valor económico cada vez mayor, por situaciones como el cambio climático.

# 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

## 1.1. Situación actual de la disposición de las aguas residuales en el país

Hablar de aguas residuales es un tema bastante amplio. Éstas al igual que los desechos sólidos, son un subproducto de las actividades humanas en general y van en proporción directa a la dinámica poblacional (a más personas mayor consumo y por ende mayor generación de aguas residuales). La figura 1 muestra un círculo vicioso entre la dinámica de las poblaciones, el uso del agua y los impactos al ambiente y a este mismo elemento.

Figura 1. **Relación entre la dinámica poblacional, el uso del agua y los impactos causados al ambiente y a la misma población**

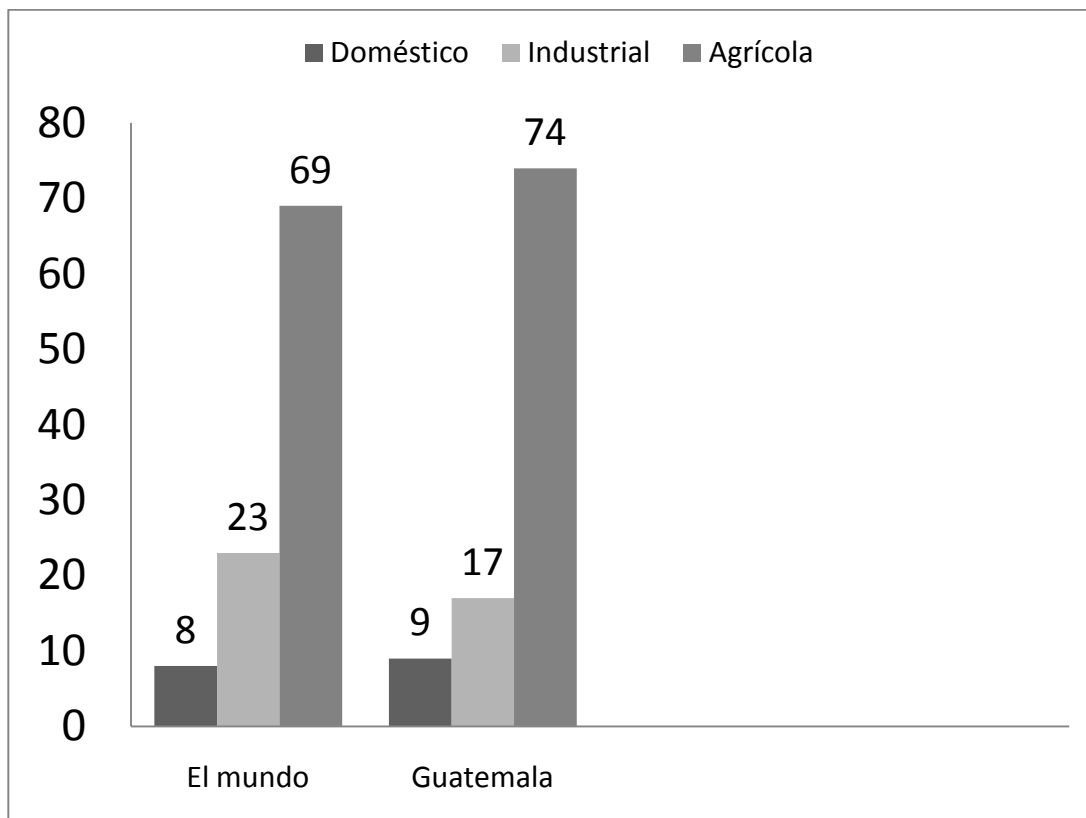


Fuente: de Sherbinin, Alex. Water and population dynamics: global approaches to a global challenge, p.2



La figura 2, muestra cómo la producción hídrica que es captada con distintos fines, es utilizada en todos los países del mundo. Esta misma figura presenta lo concerniente para Guatemala (es importante mencionar que la producción de aguas residuales, guarda una relación proporcional a la producción de aguas frescas).

Figura 2. **Porcentaje de uso de agua fresca por sector productivo**



Fuente: elaboración propia.

De forma general, las actividades agrícolas en el mundo superan por mucho, los porcentajes de agua que se utilizan para la industria y para fines domésticos.

Como puede verse, Guatemala no es la excepción, cabe decir aquí que en varias comunidades del área rural, existen serias disputas entre productores agrícolas y pobladores de ciertas áreas, especialmente en época de estiaje, donde los primeros toman el 100% del agua para irrigar sus cultivos (lo plantado en este trabajo podría inclusive, ayudar a solucionar este tipo de disputas).

Como se menciona en la parte introductoria, el presente trabajo toma en consideración únicamente las aguas de tipo ordinario, es decir, aquellas aguas residuales generadas por las actividades domésticas tales como: uso en servicios sanitarios, pilas, lavamanos, lavatrastos, lavado de ropa y otras similares, así como la mezcla de las mismas, que se conduzcan a través de un alcantarillado. Es importante hacer esta diferenciación porque tanto la industria como la agricultura generan otro tipo de aguas residuales que por su calidad requieren de tratamiento especial para su depuración.

En relación al tratamiento de las aguas residuales, Guatemala sufre un serio rezago con relación a otros países del área centroamericana; la ciudad de Managua en Nicaragua por ejemplo, posee una de las plantas de tratamiento de aguas residuales más grandes de la región Latinoamérica.

Esta planta fue diseñada para tratar 1 m<sup>3</sup>/segundo y brinda protección al lago Xolotlán, el cual está próximo a dicha ciudad.

Los municipios de Matagalpa y Jinotega, en ese mismo país, poseen cada uno un conjunto de lagunas facultativas que dan tratamiento al agua servida de tipo ordinario, producida por sus habitantes. En ambos casos, la población servida es cercana al 100%.

En países como Colombia, Chile y Brasil, tres de los países con mayor desarrollo económico de la región, existe desde hace mucho tiempo una seria preocupación por su recurso hídrico. Las universidades brasileñas han realizado desde la década de los años 60 mucha investigación en el área del tratamiento de aguas residuales, de ahí nombres de reconocido prestigio internacional como el Ingeniero José Martiniano Azevedo Neto o el Ingeniero Jairo Alberto Romero Rojas han aportado mucho conocimiento a este tema en particular.

La tabla I, presenta un resumen de como se encuentra la situación del tratamiento de aguas residuales en todos los países de América Latina, Guatemala figura dentro de los países que tratan menos del 10% de sus aguas residuales producidas, tal y como se corroborará más adelante en este mismo trabajo.

**Tabla I. Tratamiento de aguas servidas, como porcentaje del total de aguas servidas recolectadas (CIRCA 2004)**

<10%	Del 10% al 20%	Del 20% al 30%	Del 30% al 40%	Del 40% al 50%	> al 50%
Ecuador	Cuba	Colombia	Rep. Dom.	Nicaragua	Chile
Costa Rica	Paraguay	Bolivia	México		Uruguay
Honduras	Argentina	Perú	Brasil		
El Salvador		Venezuela			
Guatemala		Panamá			
Haití					

Fuente: Lentini, Emilio. Servicios de Agua Potable y Saneamiento en Guatemala: beneficios potenciales y determinantes de éxito, p.14

La tabla II, presenta una inferenciación de la cantidad de aguas residuales producidas en Guatemala, entre 2001 y 2006 a partir de la cantidad de metros cúbicos consumidos en los hogares de todo el país, de acuerdo a la “Cuenta de flujos de la CIRH: cuadro de oferta y utilización de agua por actividad económica”, del Instituto Nacional de Estadística INE. La inferencia es propia del autor de este trabajo. Se utilizó para fines de cálculo un factor de retorno del 80%.

**Tabla II. Cantidad total (m<sup>3</sup>) de aguas residuales, inferido a partir de datos reportados por el INE, entre 2001 y 2006**

Año	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Consumo final hogares (m <sup>3</sup> /año)	373 346 026,80	382 917 976,20	392 736 385,90	402 554 795,50	412 618 665,40	422 934 132,10
Factor de retorno	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Aguas residuales domésticas (m <sup>3</sup> /año)	298 676 821,44	306 334 380,96	314 189 108,72	322 043 836,40	330 094 932,32	338 347 305,68
Aguas residuales domésticas (l/s)	9 470,98	9 713,80	9 962,87	10 211,94	10 467,24	10 728,92

Fuente: elaboración propia.

Como puede verse, la cantidad de aguas residuales que se produjeron en el 2006 fue de 338,3 millones de m<sup>3</sup>, equivalentes a 10,7 m<sup>3</sup>/s. Para tener una idea de cuánto significa esta cifra, compáresele con la cantidad de agua producida solamente para suplir el área de la ciudad capital (4 m<sup>3</sup>/s).

De todas las ciudades del país, la ciudad de Guatemala es la que presenta el peor panorama en cuanto a aguas servidas se refiere. La Empresa Municipal de Agua (EMPAGUA), sirve a más de 185 000 inmuebles con agua potable, de estos, aproximadamente el 85% tienen servicio de alcantarillado proveído por esta misma empresa. La zona norte de la ciudad es la que tiene mayor cobertura.

La mayoría de las aguas residuales, son recolectadas en alcantarillas, ramales y laterales, fluyendo hacia y a través de colectores principales, desembocando finalmente en los ríos que rodean la ciudad.

En la década de 1980, se construyeron tres colectores principales en la parte Oeste y Este de la ciudad capital:

- a. El colector Reformita, Mariscal, Roosevelt (RMR)
- b. El colector 10, 13, 14
- c. Gran colector del Oriente y colectores secundarios

Estos colectores se unen y todas las aguas residuales son finalmente vertidas a través del Gran colector Norte, en el río Las Vacas, el cual se une más adelante al río Plátanos y luego al río Motagua. El caudal del río Las Vacas está constituido principalmente por aguas residuales.

La zona Sur, tiene menor cobertura de alcantarillado, aquí se presentan sistemas localizados, donde las aguas residuales son tratadas por personas individuales o comunidades, por medio de pequeñas plantas de tratamiento, fosas sépticas y en algunos casos simplemente se vierte sin ningún tratamiento hacia los cursos de agua cercanos, o en la tierra. Las descargas de las aguas residuales terminan finalmente en el río Villalobos, que a su vez descarga en el lago de Amatitlán.

Se estima que del total de personas que habitan en la ciudad de Guatemala, solamente el 15% podrían tener acceso a plantas de tratamiento si todas las plantas existentes funcionaran (18 de 30 existentes).

Las actividades de operación y mantenimiento de la red de drenajes, se limitan a dar solución “reactiva” a los problemas que se presentan, especialmente durante la estación lluviosa (bloqueos de la red y limpieza de tragantes). Las fosas sépticas privadas son limpiadas por empresas particulares quienes no están reguladas y vierten los lodos en puntos autorizados por EMPAGUA a la red de alcantarillado. No existe remuneración alguna por este servicio que proporciona EMPAGUA.

EMPAGUA cobra por servicios de alcantarillado un 20% encima de la factura por agua potable. Los usuarios de otros sistemas de agua, quienes descargan sus aguas servidas en el alcantarillado de EMPAGUA, a partir de 2008, ya pagan por este servicio.

A principios del decenio 2000-2009, se hizo a nivel nacional, un recuento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, construidos en todo el país. La tabla III, contiene la síntesis de dicho recuento, describiendo además el tipo de tratamiento empleado en cada caso, así como el caudal total tratado. Esta tabla presenta al mismo tiempo, un recuento de las áreas a donde se descarga el agua tratada, con fines agrícolas.

Como puede verse a partir de la tabla III, solamente 13 de las 44 PTAR (29,5%) presentan un recuento del caudal tratado.

Tabla III. Sitios que cuentan con algún tipo de tratamiento de aguas residuales, a nivel nacional

No.	Municipio/Urbanización/Industria	Municipio	Tipo de Tratamiento	Caudal Tratado (l/s)	Uso Agrícola del Agua Residual	
					Superficie (Ha)	Caudal (l/s)
1	Lomas de Portugal	Guatemala	Fosa Sept. +Inflit.		14	
2	Molino de las Flores	Guatemala	Fosa Sept. + Inflit		1	
3	Santa Rita	Guatemala	Fosa Sept. + Inflit.			1 600,00
4	San Cristobal I	Mixco	Zanja de oxidación			880,00
5	San Cristobal II	Mixco	Imhoff + Infiltracion			
6	El Bosque	Guatemala	Imhoff			
7	Aurora I y II	Guatemala	Sedim/Imhoff/filtros/lagunas			
8	Elgin Sur	Guatemala	Filtros Torre			
9	Villasol	Villa Nueva	Sediment + Filt. Percolador			
10	Mezquitil	Guatemala	Sediment + Filt. Percolador			
11	Justo Rufino Barrios	Guatemala	Lagunas			
12	Villa Hermosa	Guatemala	Zanajas de Oxidación			
13	Riveras del Pacifico	Guatemala	Reactor Anaerobio			
14	Central de Mayoreo	Guatemala	Imhoff + Infiltración			
15	Ciudad Universitaria	Guatemala	Sedim. + Filt.Perc+Digest.			
16	Villa Lobos I	Guatemala	Sedim. + Filt.Perc+Digest.			
17	Villa Lobos II	Guatemala	Sedim. + Filt.Perc+Digest.			
18	Nimajuyu	Guatemala	Sedim. + Filt.Perc+Digest.			
19	Villa Canales	Villa Canales	Lagunas			
20	Guastatoya I	El Progreso	Lagunas + Inflit.	28		
21	Guastatoya II	El Progreso	Imhoff			
22	Sololá	Sololá	UASB + F. Perc+Riego			
23	Sanarate I	El Progreso	Fosa Sept.	1		
24	Sanarate II	El Progreso	Imhoff + Riego	15		
25	San Juan Comalapa	Chimaltenango	Sed. + Filtro Perc+Sed.Sec			
26	Patzún	Chimaltenango	Lagunas			
27	Tiquisate I	Escuintla	Imhoff	24		
28	Tiquisate II	Escuintla	Fosa Sept./Imhoff	11		
29	Casillas	Santa Rosa	Imhoff+Lag. Estabilización	3		
30	Flores Costa Cuca	Quetzaltenango	Lagunas	63		
31	Retalhuleu	Retalhuleu	UASB	15		
32	Catarina San Marcos	San Marcos	Lagunas	7		
33	Ipala	Chiquimula	Lagunas	20		
34	Atescatempa	Jutiapa	Lagunas	1		
35	Pasaco	Jutiapa	Imhoff	5		
36	Zacualpa	Quiché	Imhoff	4		
37	Sta. Elena Barillas	Villa Canales	Raffa + Filt. Perc+ Sed			
38	Pajapita	San Marcos	Lagunas			
39	Boca del Monte	Villa Canales	Lagunas			
40	Sanarate III	El Progreso	Fosa Séptica			
41	Estanzuela	Zacapa	Lagunas			
42	El Tesoro Mixco	Mixco	Imhoff			
43	Santa Lucía Cotz	Escuintla	Lagunas/Licorera			
44	Santa Cruz El Chol	Baja Verapáz	Fosa Séptica			
<b>Total</b>				<b>197</b>	<b>15</b>	<b>2 480,00</b>

Fuente: Solano, Álvaro Guillermo. Inventario de la situación actual de las aguas residuales domésticas en Guatemala, p. 3



Otro aspecto importante que resalta, es que el caudal tratado, de acuerdo a la tabla II, es ridículamente pequeño en comparación al producido, asumiendo que el número de PTAR no creció entre 2000 y 2006.

La gran mayoría de las descargas, se realizan directamente a cuerpos de agua, contaminándolos seriamente, como es el caso de los lagos Amatitlán y Atitlán, los cuales por ser cuerpos de agua cerrados, no son capaces de purificar las aguas que llegan a ellos vía sus ríos tributarios.

Es importante indicar que el descuido que se ha tenido en atender el tratamiento de las aguas residuales, ha tenido serias implicaciones no sólo en la salud, sino en la economía del país. En 1990, 1997 y 2000, hubo brotes de Ciclosporiosis en algunos estados de la Unión Americana. Específicamente, en 2000, 89 asistentes a una boda en el estado de Pensilvania, Estados Unidos fueron contagiados por dicha enfermedad. Según se investigó posteriormente, el pastel de boda contenía moras que a su vez contenían el virus de la Ciclosporiosis. Estas moras habían sido importadas desde Guatemala. Esto motivó a que ese país suspendiera la importación de mora y frambuesa proveniente de Guatemala.

Guatemala es signataria de varios tratados de libre comercio con diferentes países, especialmente de Latinoamérica. El continuar la irrigación de cultivos con aguas residuales sin ningún tratamiento, puede provocar la penalización en la exportación de ciertos productos agrícolas. Estas penalizaciones pueden dañar, no sólo al producto en si sino a otros, debido a quejas de los otros países, alegando desigualdad en los tratados.

Todo esto puede dañar la balanza comercial del país, aún con países del área centroamericana.

En otros cuerpos receptores como el río Samalá, las aguas contaminadas son utilizadas por poblaciones ubicadas en los márgenes, para irrigar cultivos especialmente de hortalizas. Esto incide directamente sobre la salud humana, ya que mucha de esta verdura se comercia de manera masiva en la región del altiplano.

Un aspecto que es necesario resaltar, es que ninguno de los procesos listados en la tabla III, posee un tratamiento terciario, por lo que se puede inferir que las aguas son descargadas, tanto a los cuerpos de agua como a las plantaciones, con contenidos considerables de patógenos.

## **1.2. Discusión sobre algunas caracterizaciones de aguas residuales, de muestras de agua tomadas en descargas de 2 municipios en el país**

En este apartado se analizan 2 reportes de laboratorio, los cuales contienen las caracterizaciones de muestras de aguas residuales, de dos descargas de dos municipios, uno ubicado en el occidente y otro en el oriente del país (ver tabla IV).

Tabla IV. **Caracterizaciones de dos muestras de aguas residuales**

Parámetros (Físicoquímicos y Bacteriológicos)	Unidades	(a) San Pedro Sacatepéquez, San Marcos	(b) Ipala, Chiquimula
		Resultado	Resultado
Temperatura	C°	± 18	n/r
Material flotante	Ausencia/Presencia	Ausente	Ausente
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	330	320
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	850	880
Sólidos suspendidos	mg/L	300	200
Nitrógeno total	mg/L	38	47
Fósforo total	mg/L	10	32
pH		8	6,9
Color	U. Platino Cobalto	725	380
Coliformes Totales	NMP/100 ml	5,00E+08	3,00E+08

(a) Muestra tomada el 20 de junio de 2007

(b) Muestra tomada el 23 de noviembre de 2006

n/r= no reporta

En color gris, pueden verse los aportes de nutrientes de ambas muestras, así como la cantidad de coliformes totales

Fuente: elaboración propia.

Como puede verse, en cuanto a los parámetros básicos (DBO<sub>5</sub> y sólidos en suspensión), ambas muestras son bastante similares, considerando circunstancias externas como la temperatura imperante en ambos sitios.

Tabla V. **Parámetros típicos de aguas residuales municipales, según distintas fuentes**

Parametro	Unidades	Parametros típicos			
		Colombia	Córdoba <sup>1</sup>	USA	Rural USA
DQO	mg/litro	400	382	500	500
DBO <sub>5</sub>	mg/litro	200	190	220	210
Sólidos sedimentables	mg/litro			10	10
Sólidos suspendidos	mg/litro	200	160	220	210
Grasas y aceites	mg/litro			100	90
Color	UPT / Co				
Nitrógeno	mg/litro			15	13
Fosforo total	mg/litro			8	7
Coliformes fecales	NMP/100 ml		8,23E+06	5,00E+07	1,00E+05

Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, comparando las tablas IV y V, puede verse que las caracterizaciones de referencia, presentan concentraciones de fósforo y nitrógeno bastante altas, en comparación a los de otros países. Esto mismo sucede con los coliformes totales, para el caso de los municipios mencionados estas cantidades exceden en 3 ciclos logarítmicos a los parámetros reportados en la bibliografía revisada.

Como se verá en el siguiente apartado, la cantidad de nutrientes reportada rebasa la cantidad normada en la legislación guatemalteca, por lo que para cumplir con la misma, es necesario recurrir a soluciones que, como se verá más adelante, requieren tanto de costos iniciales de inversión como de operación y mantenimiento bastante altos.

Los trenes de tratamiento regularmente utilizados, únicamente rebajan, como se verá en el capítulo III, los parámetros básicos o parámetros de calidad ambiental, es decir, la DBO<sub>5</sub> y los sólidos en suspensión.



## **2. REVISIÓN DE LA NORMATIVA AMBIENTAL RELATIVA A LA DISPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES**

### **2.1. Normativas de cumplimiento nacional**

En 1986, fue promulgada la “Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente”, cuyo fin es velar por el mantenimiento del equilibrio ecológico y la calidad del medio ambiente para mejorar la calidad de vida de los habitantes del país.

Tres años después, el 7 de febrero de 1989, se promulgó el “Reglamento de Requisitos Mínimos y Límites Máximos Permisibles de Contaminación para la Descarga de Aguas Servidas” (60-89), el cual tuvo como objetivo precisamente el limitar la contaminación a los cuerpos receptores vía las descargas de aguas servidas. Las etapas definidas en el mismo eran de relativo fácil cumplimiento, ya que los parámetros de medición que determinaban las características de las aguas residuales, se limitaban prácticamente a la  $DBO_5$ , a la demanda química de oxígeno y a los sólidos en suspensión, como puede verse en la tabla VI.

**Tabla VI. Límites máximos de contaminación para la descarga de las aguas servidas municipales (según el Acuerdo Gubernativo 60-89 de fecha 7 de febrero de 1989)**

<b>Muestras</b>	<b>Sólidos</b>	<b>Unidad</b>	<b>Demanda Química de Oxígeno</b>	<b>Unidad</b>	<b>Demanda Bioquímica de Oxígeno</b>	<b>Unidad</b>
Muestra tomada al azar, máximo	1	ml/L				
Muestra mezcla de dos horas, máximo	1	ml/L	500	mg/L	250	mg/L
Muestra mezcla de 24 horas, máximo	1	ml/L	450	mg/L	200	mg/L

Fuente: Acuerdo Gubernativo 60-89.

Con este reglamento, se esperaba que los entes generadores cumplieran con instalar por lo menos procesos simples de tratamiento. A pesar de lo anterior, los esfuerzos que se hicieron por parte de los entes descritos fueron muy pocos. Prueba de ello es en parte la degradación de que son víctimas grandes e importantes cuerpos receptores, como el río las Vacas, el río Samalá, el lago de Amatitlán y el lago de Atitlán.

En el 2006, es promulgado el “REGLAMENTO DE LAS DESCARGAS Y REUSO DE AGUAS RESIDUALES Y DE LA DISPOSICIÓN DE LODOS” (Acuerdo Gubernativo 236-2006). Contrario al antecesor, este nuevo reglamento define como parámetros de medición, para determinar las características de las aguas residuales, los expresados en la tabla VII.

**Tabla VII. Parámetros de medición para determinar las características de las aguas residuales, según el Acuerdo Gubernativo 236-2006**

Temperatura
Potencial de hidrógeno pH
Grasas y aceites
Materia flotante
Sólidos suspendidos totales
DBO <sub>5</sub> a 20° C
Demanda química de oxígeno
Nitrógeno total
Fósforo total
Arsénico
Cadmio
Cianuro total
Cobre
Cromo hexavalente
Mercurio
Níquel
Plomo
Zinc
Color
Coliformes fecales

Fuente: Acuerdo Gubernativo 236-2006.

Como puede verse, este nuevo reglamento toma en cuenta la contaminación que produce la industria nacional a través de componentes químicos, los cuales modifican la composición y las características orgánicas del agua. Asimismo, considera también los efectos nocivos que representan los nutrientes (Nitrógeno total y Fósforo total) sobre los cuerpos receptores, especialmente aquellos cerrados (lagos y lagunas), los cuales sufren seriamente los efectos de la eutrofización.



Tabla VIII. Límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, según el Artículo 20 del Acuerdo Gubernativo 236-2006

Parámetros	Dimensiones	Valores Iniciales	Fecha máxima de cumplimiento			
			02/05/2011	02/05/2015	02/05/2020	02/05/2024
			Etapa			
			1	2	3	4
Temperatura	C°	TCR ± 7	TCR ± 7	TCR ± 7	TCR ± 7	TCR ± 7
Grasas y aceites	mg/L	1 500	100	50	25	10
Material flotante	Ausencia/Presencia	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos suspendidos	mg/L	3 500	600	400	150	100
Nitrógeno total	mg/L	1 400	100	50	25	20
Fósforo total	mg/L	700	75	30	15	10
pH		6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable/100 ml	<1x10 <sup>8</sup>	<1x10 <sup>6</sup>	<1x10 <sup>5</sup>	<1x10 <sup>4</sup>	<1x10 <sup>4</sup>
Arsénico	mg/L	1	0,5	0,1	0,1	0,1
Cadmio	mg/L	1	0,4	0,1	0,1	0,1
Cianuro total	mg/L	6	3	1	1	1
Cobre	mg/L	4	4	3	3	3
Cromo hexavalente	mg/L	1	0,5	0,1	0,1	0,1
Mercurio	mg/L	0,1	0,1	0,02	0,02	0,01
Niquel	mg/L	6	4	2	2	2
Plomo	mg/L	4	1	0,4	0,4	0,4
Zinc	mg/L	10	10	10	10	10
Color	Unidades Platino Cobalto	1 500	1 300	1 000	750	500

Fuente: Acuerdo Gubernativo 236-2006.

El Acuerdo Gubernativo referido, fija cuatro metas de cumplimiento, estableciendo para cada una distintos valores para cada parámetro. Es prudente decir que la tabla VIII, no presenta los límites establecidos para la DBO<sub>5</sub>, ya que no se considera importante, debido a que un buen tren de tratamiento primario y secundario, garantiza buenos resultados de reducción de este parámetro, al menos para aguas residuales de tipo doméstico.

Como puede verse, las metas de cumplimiento, especialmente para entes generadores nuevos, precisan de la utilización de tecnologías de muy alto costo, no sólo de implementación sino de operación y mantenimiento.

En febrero de 2010, se publicó el Acuerdo Gubernativo 51-2010 (Reglamento de Vertidos para Cuerpos Receptores de la Cuenca del Lago de Atitlán y su entorno). Este nuevo reglamento nace a partir de la urgencia que hay de limitar aún más las descargas de nutrientes, que se verifican en dicha cuenca, ya que estos se encargan de alimentar a las cianobacterias.

Este tipo de algas, tiene efectos nocivos sobre ecosistemas, como el lago de Atitlán, ya que su alta presencia (cianobacterias siempre existen en todo cuerpo de agua), hace que los mantos que se forman sobre la superficie de los lagos (en el lago de Atitlán estos se verifican en noviembre y diciembre) limiten el paso de luz solar a las capas inferiores. Esto a su vez restringe el crecimiento normal de seres vivos.

De forma individual, el Nitrógeno en forma de amoníaco, puede ejercer una demanda directa sobre el oxígeno disuelto (OD) siendo por lo tanto tóxico para la vida acuática. Por otro lado, el Nitrógeno en su forma de nitrato, puede estimular el crecimiento de algas y fitoplancton. El fósforo por su parte, también contribuye al crecimiento de algas.

La tabla IX, muestra los límites establecidos en dicho reglamento. Como puede verse, las concentraciones de Fósforo total y Nitrógeno total están limitadas a 1 ml/l cuando la descarga se verifica en forma directa a los ríos, riachuelos, quebradas, zanjones y lagos.

Tabla IX. **Límites máximos permisibles para entes generadores, según el Artículo 7 del Acuerdo Gubernativo 51-2010**

Parámetros	Dimensiones	Ríos, riachuelos, quebradas, zanjones	Lagos	Descarga en el subsuelo	Sistemas de alcantarillado público
Temperatura	C°	± 7	± 7	> 25	> 40
Grasas y aceites	mg/L	10	10	10	30
Material flotante	Ausencia/Presencia	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	50	30	50	100
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	100	60	100	200
Sólidos suspendidos	mg/L	60	40	60	125
Nitrógeno total	mg/L	1	1	5	10
Fósforo total	mg/L	1	1	10	2
pH		6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Color aparente	Unidades Platino Cobalto	30	30	30	30
Coliformes totales	NMP/100 ml	400	400	10 000	10 000

Fuente: Acuerdo Gubernativo 51-2010.

Es importante decir aquí, que si bien es cierto se busca proteger un cuerpo de agua muy importante, no sólo para los habitantes de las orillas del lago de Atitlán, sino para el país en general, no se toman en cuenta los altos costos de importar tecnologías sofisticadas de otros países. Esta es la razón que impulsa a buscar otras opciones de menor costo.

## **2.2. Normativas de cumplimiento específico**

Las descargas de aguas residuales producidas por cualquier ente generador, sea este nuevo o ya establecido, tienen que cumplir con los parámetros establecidos, ya sea en el Acuerdo Gubernativo 236-2006 (Reglamento de las Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos), si éstas se encuentran dentro de cualquier parte del territorio nacional, menos en la cuenca hidrográfica del lago de Atitlán, y con el Acuerdo Gubernativo 51-2010 (Reglamento de Vertidos para Cuerpos Receptores de la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno), si éstas se ubican dentro de dicha cuenca.

Según información reciente, debido a lo restrictivo del Acuerdo Gubernativo 51-2010, el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales MARN, está por publicar una “enmienda” al referido Acuerdo Gubernativo. Debido a que éste no ha sido publicado en el Diario Oficial, no se comentará al respecto.

## **2.3. Comparación de las características propias de las aguas residuales y las normas ambientales**

La tabla X, compara las caracterizaciones de las dos muestras de aguas residuales presentadas en la tabla IV, con los límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, según el Artículo 20 del Acuerdo Gubernativo 236-2006 (ver tabla VIII).

El propósito del ejercicio, es ilustrar la urgente necesidad de implementar sistemas de tratamiento de aguas residuales que traten toda la gama de contaminantes propios de las aguas residuales domésticas. Se comparan únicamente los parámetros de la cuarta etapa, por ser los más restrictivos y porque tal y como lo exige el Acuerdo Gubernativo en mención, es el que al final todos los entes generadores tienen que cumplir.

Como puede verse, a excepción del nivel de fósforo, para el caso del municipio de San Pedro Sacatepéquez, San Marcos, las unidades de Nitrógeno total y Fósforo total, se encuentran por encima de los exigidos en la norma nacional. Esto mismo sucede en el caso de los coliformes fecales.

Otros parámetros asociados con metales pesados no fue posible comparar debido a que no fueron tomadas al momento de efectuar las muestras en los municipios citados.

**Tabla X. Comparación de las características propias de las aguas residuales, producidas en dos municipios, con los límites establecidos en el Acuerdo Gubernativo 236-2006**

Parámetros	Dimensiones	Etapa 4 del Reglamento	Resultados Municipio de Sn. Pedro Sac., San Marcos	Resultados Municipio de Ipala Chiquimula.
Temperatura	C°	TCR ± 7	± 18	n/r
Grasas y aceites	mg/L	10	n/r	n/r
Material flotante	Ausencia/Presencia	Ausente	n/r	n/r
Sólidos suspendidos	mg/L	100	300	200
Nitrógeno total	mg/L	20	38	47
Fósforo total	mg/L	10	10	32
pH		6 a 9	8	6.2
Coliformes fecales	NMP/100 ml	<1,00E+04	5,00E+08	3,00E+08
Arsénico	mg/L	0.1	n/r	n/r
Cadmio	mg/L	0.1	n/r	n/r
Cianuro total	mg/L	1	n/r	n/r
Cobre	mg/L	3	n/r	n/r
Cromo hexavalente	mg/L	0.1	n/r	n/r
Mercurio	mg/L	0.01	n/r	n/r
Niquel	mg/L	2	n/r	n/r
Plomo	mg/L	0.4	n/r	n/r
Zinc	mg/L	10	n/r	n/r
Color	Unidades Platino Cobalto	500	725	380

n/r= no reporta

Fuente: Acuerdo Gubernativo 236-2006.



### **3. EFICIENCIA DE LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO DISPONIBLES EN EL PAÍS, CONTRA LOS PARÁMETROS ESTABLECIDOS EN LA NORMATIVA AMBIENTAL VIGENTE**

Los trenes de tratamiento, para aguas residuales de tipo ordinario más utilizados en Guatemala, se basan en la oxidación de la materia orgánica, básicamente a través de procesos anaeróbicos y aeróbicos.

El primero de ellos, se fundamenta en la descomposición u oxidación de compuestos orgánicos, en ausencia de oxígeno libre (de ahí la palabra anaeróbico, sin aire), para obtener la energía requerida, para el crecimiento y el mantenimiento de los organismos anaeróbicos. Este proceso es menos eficiente que el proceso aeróbico, sin embargo, goza de una amplia popularidad en países del tercer mundo, porque sus requerimientos energéticos son mucho menores.

Como se puede ver en la figura 3, contrario de necesitar energía, este tipo de procesos la genera a través del gas metano, que a su vez es generado por la fermentación.

Otra ventaja es que el mismo reactor, produce menos lodos, con la ventaja de que estos (en la misma cámara del reactor) ya salen estabilizados.

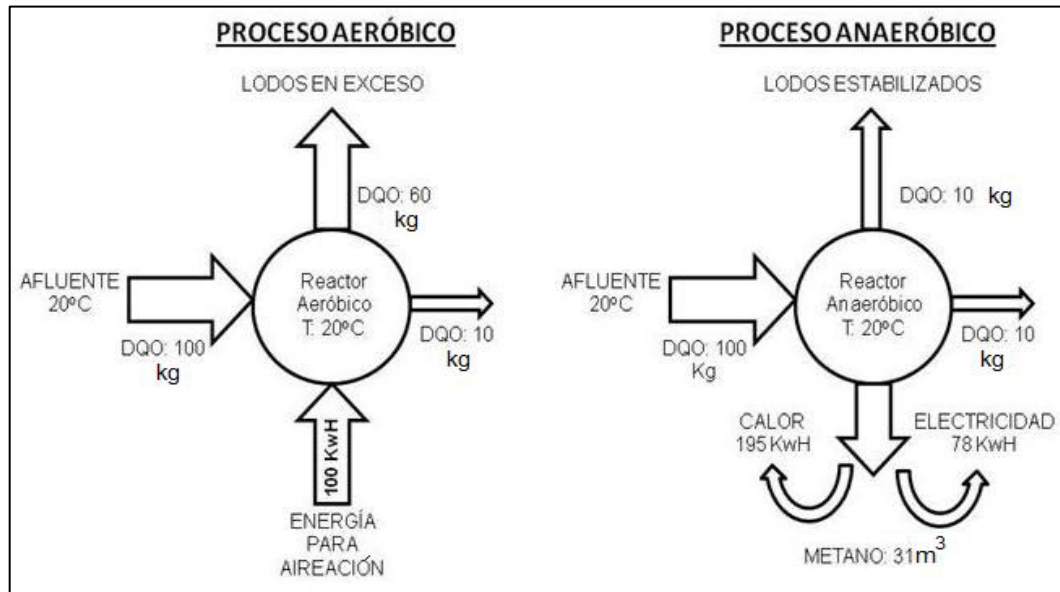


El gran inconveniente es que requieren de grandes áreas y por ende grandes inversiones iniciales, para el desarrollo de PTAR, por los tiempos de retención hidráulica a los que se somete el agua a ser tratada. Otra gran ventaja de este tipo de tratamiento, es que los costos de operación y mantenimiento son mínimos.

Usualmente, estos tratamientos van sucedidos de filtros percoladores, en donde se degrada una dosis de  $DBO_5$  de tipo soluble. En estos filtros, el tratamiento que se verifica es de tipo aeróbico, ya que el agua se hace pasar por los intersticios que forman piedras volcánicas (o material plástico), por donde asciende aire.

Los tratamientos aeróbicos son mucho más eficientes que los primeros. Usualmente, las bacterias son los organismos más importantes, en el tratamiento aerobio de las aguas residuales, porque son excelentes oxidadores de la materia orgánica y crecen bien en estas aguas. Para lograr las condiciones aeróbicas, se requiere de inyectarle al agua grandes cantidades de oxígeno. Esto hace que al contrario del proceso anaeróbico, se requiera de un alto costo en la operación y mantenimiento de las PTAR.

Figura 3. **Análisis energético de sistemas anaeróbicos y aeróbicos**



Fuente: elaboración propia.

Ambos tipos de tratamientos han sido útiles para degradar tanto los sólidos en suspensión como la demanda bioquímica de oxígeno. Las nuevas exigencias ambientales requieren que las plantas traten otra serie de parámetros que corresponden a la clasificación descrita en los siguientes numerales.

### 3.1. Parámetros de calidad ambiental

Desde el punto de vista del contenido de las aguas residuales, actualmente se reconocen tres calidades: calidad ambiental, calidad sanitaria y calidad agronómica (ver figura 4).

Figura 4. **Calidad de las aguas residuales en función de su contenido**



Fuente: Moscoso Cavallini, Julio; *et al.* El agua como recurso sustentable de uso múltiple, p. 178

Se llaman parámetros de calidad ambiental, a aquellos que impactan directamente sobre los ecosistemas. Básicamente, los parámetros de calidad ambiental son 2: la demanda bioquímica de oxígeno y los sólidos en suspensión. La DBO o demanda bioquímica de oxígeno de las aguas residuales, es la cantidad de oxígeno necesario para oxidar químicamente las sustancias orgánicas presentes, es la cantidad de oxígeno demandada por microorganismos para degradar biológicamente la materia orgánica contenida en las aguas residuales.

Usualmente, el agua residual contiene alrededor de un 1% de sólidos en suspensión. Estos sólidos dan al agua residual el color turbio, retirarlos de estas aguas requiere dos prácticas básicas: hacer pasar el agua por un tamiz, para retirar los sólidos de gran tamaño o bien controlar la velocidad del agua para que la quietud que se gana, haga que el peso mismo de muchas de las partículas, haga que se sedimenten.

De forma general las plantas de tratamiento de aguas residuales hasta ahora construidas, han sido fabricadas bajo el criterio de reducir la demanda bioquímica de oxígeno y los sólidos en suspensión.

### **3.2. Parámetros de calidad sanitaria**

Los parámetros de calidad sanitaria, son aquellos relacionados con la cantidad de coliformes fecales (expresado en NMP/100 ml) y huevos de helmintos presentes en el agua residual.

Desde el punto de vista de la salud pública, la presencia de ambos en el agua presupone la presencia de patógenos causantes de enfermedades entéricas en el ser humano.

La palabra coliforme significa; con forma de coli, refiriéndose a la bacteria principal del grupo, la *Escherichia coli*, descubierta por el bacteriólogo alemán Theodor von Escherich en 1860. Usualmente, la presencia de estas bacterias (colimetría fecal) sobrepasa los  $1 \times 10^7$  unidades (ver tabla X).

Los tratamientos comunes, difícilmente rebajan esta cantidad en uno o dos ciclos logarítmicos, números que desde la perspectiva de la salud humana son peligrosos.

Cuando las aguas de un cuerpo receptor a donde se disponen las aguas ya tratadas por una planta de tratamiento, van a ser usadas por otra población con fines de abastecimiento domiciliar, la probabilidad de enfermedades hídricas es altamente factible.

En el país, una gran mayoría de ríos están seriamente contaminados con heces humanas, lo cual es preocupante por las razones arriba expuestas. Es importante resaltar aquí, que la mayoría de los sistemas de tratamiento que se han construido en el medio, no eliminan de forma sustancial la presencia de ningún tipo de parásitos. La tabla XI corrobora este hecho. Esta tabla muestra las eficiencias de la utilización de cloro y de radiación ultravioleta con fines de comparación.

Tabla XI. **Remoción esperada de microorganismos**

Proceso de Tratamiento	Reducción de Órdenes de Magnitud o Unidades Logarítmicas			
	Bacterias	Helmintos	Virus	Quistes
Sedimentación simple	0 a 1	0 a 2	0 a 1	0 a 1
Con coagulación previa	1 a 2	1 a 3	0 a 1	0 a 1
Lodos activados	0 a 2	0 a 2	0 a 1	0 a 1
Biofiltros	0 a 2	0 a 2	0 a 1	0 a 1
Zanja de oxidación	1 a 2	0 a 2	1 a 2	0 a 1
Desinfección	2 a 6	0 a 1	0 a 4	0 a 3
Laguna aireada	1 a 2	1 a 3	1 a 2	0 a 1
Lagunas de estabilización	1 a 6	1 a 3	1 a 4	1 a 4

Fuente: Moscoso Cavallini, Julio; *et al*, El agua como recurso sustentable de uso múltiple, p. 172

Es de recordar, que muchas ciudades o bien se asientan en la ribera de los ríos o toman agua de estos para suplir necesidades básicas. En las aguas se concentran una gran cantidad de parásitos, no es de extrañar el brote de epidemias que de cuando en cuando se presentan en el país.

### 3.3. Parámetros de calidad agronómica

Finalmente se tienen los parámetros de calidad agronómica, y que desde el punto de vista del presente trabajo, son los más importantes. Estos parámetros están asociados a la presencia de nutrientes como el Fósforo total y el Nitrógeno total, ambos a su vez presentes en las excretas humanas y en detergentes. Hasta hace unos años, la presencia de estos nutrientes constituía un importante desafío para su remoción. La importancia de su eliminación o reducción antes de que las aguas tratadas sean descargadas a cuerpos receptores, es que propician, como ya se dijo, el desarrollo de microorganismos que como en el caso de las cianobacterias, limitan la disponibilidad de luz solar a las capas inferiores y con ello restringen el crecimiento normal de seres vivos en los ecosistemas, especialmente los lacustres.

En países del primer mundo, usualmente se aplican métodos por demás inaccesibles para países como Guatemala, para la eliminación de nutrientes. Básicamente se conocen tres métodos para la remoción tanto del Nitrógeno como del Fósforo: la extracción del amoníaco, por medio de arrastre con aire, el intercambio iónico selectivo y el uso de cloro al *break point* o punto de quiebre.

Cada uno de los sistemas mencionados en el párrafo anterior tiene sus ventajas y sus desventajas, con relación a los otros: la extracción del amoníaco por medio de arrastre con aire, requiere la construcción de una torre alta para poner en contacto el agua con el aire mediante caída.

Exige a la vez el constante movimiento de un ventilador para provocar el ascenso del aire, así como grandes cantidades de cal o soda cáustica para elevar el pH del agua por tratar; el segundo requiere la adición de algunos compuestos químicos, cuyo costo es alto; y el tercero además de requerir grandes cantidades de gas cloro, requiere además un procesos ulterior de decloración.

En países como Guatemala, otra dificultad a añadir sería la asistencia de personal altamente entrenado para monitorear cualquiera de los procesos descritos. Esto tendría como desventaja los altos costos de operación.

## **4. MANEJO DE LOS NUTRIENTES Y LOS PATÓGENOS; EXPERIENCIAS EN OTROS PAÍSES DEL MUNDO**

### **4.1. Experiencias en Europa y Estados Unidos**

La reutilización de las aguas servidas con fines de irrigación, es de amplia difusión en países como los Estados Unidos y otros muchos de Europa. Cada país ha fijado normas de acuerdo a los fines con que se va a utilizar el agua. En los Estados Unidos por ejemplo, para irrigar plantaciones cuyos frutos se comen crudos, el valor guía es de 23 NMP/100 ml, siendo el máximo 200 NMP/100 ml. Para cultivos que no se comen crudos la norma es 200 NMP/100 ml como valor guía y 800 NMP/100 ml como valor máximo.

Alemania, fija un solo valor (valor guía) igual a 200 CFU. El valor guía en Francia es igual a 1 000 CFU e Italia (región de Sicilia) 1 000 CFU. La tabla XII refiere algunas experiencias en Francia.



Tabla XII. **Experiencias de reutilización de aguas residuales en Francia**

<b>Proyecto</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Tipo de cultivo</b>	<b>Tipo de tratamiento</b>
Moint Saint Michel	265	Pradera y maíz	Fangos activados + lagunas de oxidación
Saint Armel	120	Viveros	Laguna de oxidación
Porquerolles	35	Papas, coliflor y maíz	Fangos activados + lagunas de oxidación
Noirmoutier-La	220	Papa	Fangos activados + lagunas de oxidación
Ars en Ré	90	Campos de golf	Fangos activados + cloración
Baden	7	Campos de golf	Lagunas

Fuente: elaboración propia.

En España era común el uso de aguas residuales sin tratamiento. No fue sino hasta mediados de la década 1990-1999 que se sometió un decreto para la reutilización de las aguas residuales. A principios de la década pasada, existía un gran interés en las ciudades costeras de utilizar las aguas residuales para la irrigación de campos de golf y jardines de zonas hoteleras. En el campus de la Universidad de Espinardo, Murcia, se tiene la experiencia con una laguna profunda (6,5 m) y largo tiempo de retención (100 días). La depuración es tan buena que esta agua se utiliza directamente en el riego de áreas verdes.

#### **4.2. Experiencias en Latinoamérica**

En América Latina, varios países efectúan ya la irrigación de cultivos, utilizando aguas residuales tratadas (ver tabla XIII). Perú es tal vez uno de los países pioneros en esta práctica como respuesta al crecimiento desordenado del área urbana, de su capital Lima.

El proyecto Santa Bartola, al sur de la capital peruana, el agua residual se ha conducido por más de 17 kilómetros, hasta una región desértica, donde después de ser tratada se aprovechará para irrigar cerca de 8 000 hectáreas agrícolas y forestales.

Tabla XIII. **Área agrícola, regada con aguas residuales en América Latina**

País	Área (ha)
Argentina	3 070
Bolivia	1 200
Chile	74 000
Colombia	327 000
México	350 000
Perú	5 100

Fuente: Ramos Fernández, Lía. Reuso de las aguas residuales en la agricultura, p. 7

En San Agustín, al Norte de Lima, el ente encargado de la salubridad de aquel país, amenazó con decomisar toda la producción agrícola, ya que los agricultores utilizaban aguas residuales crudas para irrigar sus cultivos. Esto propició que después de llegar a acuerdos entre los campesinos, se destinara un área actualmente en producción, para la construcción de una laguna de estabilización. El agua una vez tratada en dicha laguna podrá ser irrigada sin mayores restricciones.

La tabla XIV, refleja lo que se conoce como el valor agronómico del agua residual. Pueden verse importantes diferencias entre utilizar agua superficial o de pozo (usualmente cara) para la irrigación de cultivos o utilizar aguas residuales con algún tipo de tratamiento (experiencia en Tacna Perú).

Tabla XIV. **Valor agronómico de las aguas residuales, según mediciones llevadas a cabo en Tacna, Perú**

<b>Tipo de Cultivo</b>	<b>Rendimiento utilizando agua superficial o de pozo</b>	<b>Rendimiento utilizando agua residual</b>	<b>Diferencia en el rendimiento (%)</b>
Alfalfa	10	12	20
Maíz	2	5	150
Trigo	2	3	50
Cebada	2	4	100
Avena (para forraje)	12	22	83
Tomate	18	35	94
Chile (Ají)	7	12	71

Fuente: Moscoso Cavallini, Julio; *et al.* El agua como recurso sustentable de uso múltiple, p. 181

Otro ejemplo exitoso de este tipo de práctica, es el que se lleva a cabo en la ciudad de Mendoza en Argentina. Esta ciudad de 1 500 000 habitantes produce 1,7 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales, la cuales son tratadas en una planta consistente en lagunas de estabilización. Esta planta es administrada por una empresa privada que cobra alrededor de \$0,05/m<sup>3</sup> que recibe. Debido a la situación de aridez del área que circunda esta ciudad, las aguas tratadas empezaron a irrigarse, especialmente en época seca. La tabla XV, recoge las hectáreas regadas con estas aguas.

Tabla XV. **Tipo de cultivos y superficie irrigada con aguas residuales, tratadas en la ciudad de Mendoza, Argentina**

<b>Cultivo</b>	<b>Superficie irrigada (ha)</b>
Hortalizas	820
Viñedos	460
Pastos	340
Producción forestal	210
Árboles frutales	100

Fuente: Moscoso Cavallini, Julio; *et al.* El agua como recurso sustentable de uso múltiple, p. 178

Agricultores dedicados a la producción de ajo, han reportado mejores rendimientos de sus cosechas desde que las mismas son irrigadas con estas aguas.

#### **4.3. Algunas experiencias nacionales**

La cabecera departamental de Sololá, cuenta con dos plantas de tratamiento de aguas residuales. Antes de la construcción de estas plantas, las aguas sin tratar caían al río Kisqab', siendo el destino final, el lago de Atitlán.

La mayor parte del caudal generado en esta ciudad (aproximadamente 19 l/s), es tratado en estas plantas denominadas San Bartolo y San Antonio. El resto es depositado en un zanjón aledaño a la planta San Bartolo.

Desde la construcción de ambas PTAR (San Antonio en 1995 y San Bartolo en 1998), el agua tratada es conducida hacia varios terrenos con fines de irrigación, beneficiando a casi 100 usuarios agrícolas. En el caso de la planta de tratamiento San Bartolo, 8 litros/segundo se dedican al sistema de riego y 4 litros/segundo se lanzan a una quebrada o zanjón. Finalmente, una pequeña parte de este último caudal llega al lago de Atitlán.

En el caso de la planta de tratamiento San Antonio, 5,5 litros/segundo se utilizan para el sistema de riego y el caudal restante (más o menos 2,5 litros/segundo) se descarga al río Kisqab' que finalmente desemboca en el lago de Atitlán.

A pesar de que no está permitido el cultivo de foliares, como brócoli, lechuga, repollo y otros como la arveja, que generalmente se comen crudos, los campesinos hacen caso omiso de ello. Cultivan además cebolla y papa, así como pastos y hierbas para forraje como hierba mora, bleado, grama y zacatón (cultivos permitidos).

Cabe citar en este apartado, la experiencia que se lleva a cabo en los municipios de Zunil y Almolonga, ambos del departamento de Quetzaltenango. Durante muchos años, los campesinos del área han utilizado el agua del río Samalá como fuente de riego para sus hortalizas (lechuga, zanahoria, col, cebolla, etc.). La cuenca hidrográfica del río Samalá presenta una alta presencia de *Escherichia coli*. La producción de estas legumbres, es abundante, llegando incluso a comercializarse con algunos países vecinos.

#### 4.4. Guías de la OMS respecto a la reducción de patógenos en las aguas residuales

Como puede verse, a partir del apartado anterior, a pesar de que las aguas residuales tratadas pueden servir para paliar en parte el déficit hídrico en una zona, existe como ya se estableció arriba un riesgo potencial en utilizar indiscriminadamente las aguas residuales para riego.

La Organización Mundial de la Salud, reconoce que el mayor riesgo para la salud pública, lo constituye la presencia de patógenos de todo tipo.

En 1989 publicó nuevas directrices sobre la calidad microbiológica y parasitológica para el uso de aguas residuales en la agricultura, con un enfoque más severo que limita la presencia de huevos de nematodos intestinales. Estas restricciones se enumeran en la tabla XVI.

Tabla XVI. **Directrices de la OMS sobre la calidad microbiológica y parasitológica para uso de aguas residuales en la agricultura**

Condiciones de reutilización	Nematodos intestinales
Irrigación de cultivos que se consumen crudos, campos de deporte, parques públicos y campos de golf	< 1 huevo/L
Irrigación de cereales, cultivos industriales, forraje, pastos y árboles	≤ 1 huevo/L
Irrigación localizada de cultivos en la categoría anterior cuando ni los trabajadores ni el público están expuestos	No es aplicable

Fuente: Castro, M.C.; Gutiérrez, F. J.; Marquez, L. Peligro de la presencia de nematodos patógenos en verdura y hortalizas, p. única

#### **4.5. Miedo al cambio, actitud a vencer por parte de promotores sociales en el área**

Este apartado, se refiere a que en muchos casos la posición de muchos guatemaltecos impide la implementación de nuevas ideas. Existen actualmente muchas soluciones de bajo costo que tienen que ver con la producción de energía limpia, por ejemplo. Guatemala por su posición privilegiada recibe una gran cantidad de radiación solar. Asimismo, el régimen de vientos podría hacer que la implementación de granjas eólicas produjera suficiente energía para ir sustituyendo las fuentes clásicas. El miedo a cambiar es lo que hace que estas ideas no sean siquiera evaluadas.

Con relación al tema que ocupa el presente trabajo, como ya se indicó en los numerales arriba descritos, un tratamiento adecuado de las aguas residuales, acompañado de una correcta disposición final de las aguas efluentes al suelo, podría muy bien ser la solución para todos aquellos casos, donde estas no sólo son un estorbo desde el punto de vista estético para una población en particular sino y principalmente, un generador de enfermedades de origen hídrico.

El aprovechamiento de las aguas residuales, podría significar nuevas fuentes de trabajo, amén de mejores ingresos para varios campesinos. Por otro lado, las disputas tan frecuentes, especialmente en el área del altiplano entre productores agrícolas y usuarios de la poca agua que existe, podrían desaparecer. Es prudente entonces evaluar los conceptos aquí vertidos para encontrarle solución a varios problemas.

## **5. LAGUNAS DE MADURACIÓN, ELEMENTOS DE MUY BAJO COSTO PARA LA REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN EL AGUA**

La función principal de una laguna de maduración, es reducir el número de patógenos presentes en un agua residual, principalmente bacterias fecales y virus, a un nivel aceptable para ser usada con fines agrícolas o acuícolas.

La DBO y los sólidos en suspensión (SS), son retenidos pero en cantidades muy pequeñas, al igual que los nutrientes, aunque en un sistema de lagunas bien construida y bien operada, en donde se tiene un tren bien conformado (laguna anaeróbica, laguna facultativa, y una serie de lagunas de maduración), se logra una buena remoción de DBO, SS y nutrientes.

La alta remoción de E coli es también posible, desde  $5 \times 10^7/100$  ml en el agua cruda entrante, hasta 30/100 ml en el efluente de una tercer laguna de maduración -una remoción de 6 unidades logarítmicas, o 99,9999% (el efluente de una segunda laguna de maduración conteniendo  $< 1\ 000$  E coli/100 ml, es aceptable para un tipo de irrigación sin restricciones, es decir, aquella que se puede verificar sobre cultivos de vegetales que se pueden comer crudos, por lo tanto no habría porqué utilizar una tercer laguna de maduración.



La profundidad típica de una laguna de maduración, es mayor a un metro, cuando las lagunas son de menor profundidad, se logran mejores tasas de remoción de patógenos y virus, debido a la mayor penetración de luz solar, sin embargo, también hay crecimiento de macrofitas. Éstas proveen un ambiente propicio para la proliferación de mosquitos.

### **5.1. Ventajas y desventajas de estos elementos**

La gran ventaja de este tipo de sistemas, es su relativo bajo costo de construcción ya que se pueden llegar a construir de terraplenes hechos con tierra. Otra ventaja es que la operación y el mantenimiento son casi nulos. Una tercera ventaja es que en países como Guatemala, la radiación solar es muy buena durante casi todo el año. Esto como ya se indicó en el numeral anterior, es bueno para la disminución de patógenos. Finalmente, otra ventaja es que si bien es cierto, la superficie de las lagunas está en función de la temperatura imperante, este parámetro no es determinante para su construcción.

Tal vez la principal desventaja de esta solución, es el requerimiento de tierra para su construcción. Especialmente en países como Guatemala donde la agricultura es mayoritariamente minifundista.

## 5.2. Consideraciones de diseño

Una laguna de maduración, es una laguna de pulimiento (usualmente se ubica como última etapa en un “tren” o serie de lagunas). Las etapas que la preceden usualmente, son lagunas de tipo aeróbica y lagunas de tipo facultativa. También pueden ser precedidas de PTAR, donde se ha verificado un tratamiento primario y uno secundario. La tabla XVII que se presenta a continuación condensa las características típicas de una laguna de maduración.

Tabla XVII. **Características típicas de las lagunas de maduración**

Parámetro	
Área (ha)	0,8 a 4
Tiempo de retención (d)	5 a 20
Profundidad (m)	0,9 a 1,5
pH	6,5 a 10,5
Temperatura °C	0 a 30
Temperatura óptima °C	20
COS,kg DBO/ha-d	≤ 17

Fuente: Romero R., Jairo A. Tratamiento de Aguas Residuales por Lagunas de Estabilización,  
p. 141



## 6. PROPUESTA DE IRRIGACIÓN

### 6.1. Irrigación a través de canales

El riego con aguas residuales, al igual que el que se verifica con aguas limpias, conlleva algunos cuidados, para no comprometer ni la calidad de los suelos ni la de los acuíferos. Por esta razón, el agua a aplicar debe ser de acuerdo al tipo de cultivo a irrigar. Esto conlleva el utilizar las láminas de agua justas, en función de la profundidad de la raíz de la planta (PR), el grado de humedad inicial del suelo y el grado de humedad posterior al riego, esto es, la capacidad del campo de cultivo. La siguiente fórmula define la lámina de riego ( $L_r$ ).

$$L_r = P_r(\theta_{cc} - \theta_o)$$

Sustituyendo la fórmula la lámina de riego se presenta de la siguiente manera:

$$L_r = k_c P_r(\theta_{cc} - \theta_o)$$

Donde  $k_c = 1-k$ ; para muchos cultivos  $k_c = 0,7$

Otro factor importante a considerar en el manejo del riego con aguas residuales, es la forma de aplicación, esto conlleva a considerar a la vez tanto la calidad de las aguas, como la infraestructura disponible para el riego. El riego por desbordamiento, es el más económico para irrigar suelos con agua de baja calidad. En este caso el riego se restringe al sentido de la pendiente, obteniéndose un rectángulo que recibe el agua por uno de sus lados mayores. Este tipo de riego exige un caudal entre 20 y 40 l/s. El riego bajo este sistema se recomienda en cultivos que no sean de consumo humano.

En el riego por surcos, otro sistema de irrigación, el agua se reparte sin desbordarse, infiltrándose de manera lateral. Este requiere de menor caudal por surco (2 l/s) y pendientes no mayores a 2,5%. Este tipo de irrigación no se recomienda para suelos con problemas de salinidad, como tampoco para aguas de baja calidad fisicoquímica. Otra restricción es que no se debe utilizar para cultivos de consumo humano directo.

El riego por aspersión, está limitado para aguas tratadas cuya calidad fisicoquímica sea mejorada considerablemente. Esto por problema de taponamiento en los aspersores. Este tipo de irrigación puede ser utilizado en cultivos de forraje y granos para procesamiento industrial.

El riego por goteo, conocido también como riego por microaspersión o riego localizado, se aplica por medio de emisores situados en tuberías, requiere bajos caudales, mantiene la humedad sólo en el área de la raíz. El agua llega desde un embalse a través de un sistema a presión.

Este tipo de irrigación tiene el inconveniente que requiere un agua de muy buena calidad fisicoquímica y bacteriológica. El contenido de sólidos debe ser casi nulo, debido a que pueden taponar los emisores. Con este sistema se pueden irrigar cultivos de hortalizas y frutas.

En referencia a la selección de los cultivos, estos deben ser seleccionados en función de la calidad del agua y los límites de contaminantes establecidos por normas. Parámetros fisicoquímicos importantes en el agua a irrigar son el tipo y la concentración de sales, ya que existen diferentes rangos de tolerancia en la salinidad en los cultivos, factor que se relaciona de forma directa con su rendimiento (ver tabla XVIII).

**Tabla XVIII. Clasificación de cultivos de acuerdo con su tolerancia a las sales**

<b>TIPO DE CULTIVO</b>	<b>GRADO DE TOLERANCIA A LAS SALES (dS/m)</b>
Cultivos productores de fibra y semilla (algodón, jojoba, caña de azúcar)	Tolerantes (6 a 10)
Pastos, cultivos forrajeros (Pasto bermuda, zacate Alkali)	Tolerantes (6 a 10)
Cultivos productores de fibra y semilla (avena, soya y trigo)	Moderadamente tolerantes (3 a 6)
Pastos, cultivos forrajeros (Pasto Ryegrass italiano, pasto sudán)	Moderadamente tolerantes (3 a 6)
Cultivos productores de fibra y semilla y azúcares (maíz, arroz, caña de azúcar)	Moderadamente tolerantes (1 a 3)
Cultivos productores de fibra y semilla y otros (frijol, cebolla, zanahoria, limón, mango y durazno)	Sensibles (< 1,3)

Fuente: Instituto Mexicano de tecnología del agua, coordinación de tecnología de riego y drenaje, Perspectiva de aprovechamiento de las aguas residuales en la agricultura, p. 74

El potencial productivo de los cultivos, debe manifestarse cuando se rieguen con aguas cuya CE es igual o menor a 0,7 dS/m. Si este factor aumenta arriba de 3,0 dS/m, el potencial productivo se reduce.

Las aguas residuales tratadas, pueden alcanzar una concentración de sales de 0,7 a 3,0 dS/m, dependiendo el origen de las mismas y del sistema de tratamiento empleado.

Finalmente otro aspecto a considerar es la concentración de metales pesados. La concentración de los mismos está restringida en el Acuerdo Gubernativo 236-2010 (ver tabla VIII).

## CONCLUSIONES

1. La situación del agua a nivel mundial, es cada día más preocupante, si se toma en cuenta la dinámica poblacional. Se prevé que para el 2030, unos 5 mil millones de personas (447 veces la población de Guatemala) no tendrán acceso a este vital líquido. El 80% de las enfermedades que castigan a países en vías de desarrollo, se deben a la carencia y/o a la mala calidad del agua que se consume. En Guatemala, cerca del 75% de sus habitantes no tiene acceso a aguas de buena calidad.
2. La agricultura en general, demanda una porción considerable del balance hídrico nacional para la producción agrícola. En áreas como Huehuetenango y San Marcos, los productores agrícolas entran en serias disputas con poblaciones rurales sobre el uso del agua, especialmente en época de estío.
3. El manejo integrado a nivel de cuencas hidrográficas brinda una mejor manera de administrar el recurso hídrico, al permitir la focalización de los problemas que se tienen en cada una de ellas.
4. Casi 338 millones de metros cúbicos de aguas residuales al año, cantidad que va en aumento, es descargada sin ningún tratamiento, castigando seriamente no sólo a los cuerpos receptores sino a comunidades que habitan aguas debajo de donde se verifican las descargas. Un gran ejemplo de esto, lo constituye toda el agua residual que es descargada por la ciudad capital en el río las Vacas.



5. Es importante considerar las implicaciones que el descuido de no tratar las aguas, con las que se irrigan algunas plantaciones, puede llevar a dañar la economía del país. Las implicaciones pueden no ser directamente sobre los productos agrícolas afectados, sino sobre otros, dañando la balanza comercial que tiene nuestro país con otros países tanto del área centroamericana como fuera de ella.

## RECOMENDACIONES

1. Es conveniente que los reglamentos para el vertido de aguas residuales a cuerpos receptores (Acuerdo Gubernativo 236-2006 y Acuerdo Gubernativo 51-2010), sean seriamente tomados en cuenta por todos los entes involucrados (gobierno, municipalidades, industrias, etc.), para detener la degradación ambiental de que son víctima, grandes e importantes cuerpos receptores.
2. La reutilización de las aguas residuales tratadas, es la mejor solución para la disposición de las aguas residuales, ya que no sólo no contamina a los cuerpos receptores, sino que aprovecha el contenido de nutrientes presentes en estas aguas.
3. La reutilización debe ir acompañada, por lo menos en las etapas iniciales, de su implementación como opción al saneamiento, de un fuerte monitoreo por parte de laboratorios certificados, los cuales no solo garantizarían la calidad de las aguas irrigadas, sino la estabilidad de los suelos a irrigar. Es prudente llamar la atención, que en el pasado se han impulsado políticas que por no medir sus consecuencias, tuvieron impactos negativos.
4. La práctica de irrigación con aguas provenientes del río Samalá, por ejemplo, es un problema que hay que atacar desde la raíz, ya que buena parte de la verdura que se produce a orillas de este río, es irrigada con sus aguas, mismas que registran presencia alta de coliformes fecales.

5. Es conveniente que el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, inicie desde ya con la implementación de plantas de tratamiento que integren lagunas de maduración. Esto permitiría no sólo una mejor calidad de vida para los habitantes de la zona, al consumir verdura de mejor calidad, sino que paralelamente, mejoraría la economía tanto del área de dicha cuenca como del país entero, al elevar las exportaciones de productos de mejor calidad a los países donde esta verdura ya se exporta.
  
6. El tratamiento de las aguas residuales tiene también incidencia en la economía del país. La experiencia negativa que sufriera el país ante Estados Unidos, con relación al brote epidémico provocado por el virus de la ciclosporiasis y la consecuente suspensión permanente de la exportación de mora y frambuesa, debería constituir un incentivo para retomar otra ruta en cuanto a la correcta desinfección de las aguas residuales, previo a disponerlas como agua para riego.
  
7. Es urgente un cambio generalizado de pensamiento, no sólo de aquellos que ocupan una posición en el gobierno sino de todos los pobladores del país, para que aprovechando la experiencia de otros países con características similares a Guatemala, se busquen soluciones sencillas a los problemas

## BIBLIOGRAFÍA

1. CRITES, Ron; Tchobanoglous, George. *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados (tomo 1)*, Colombia: McGraw-Hill, 2000. ISBN: 9584100432.
2. FAIR, Gordon *et al.* *Ingeniería sanitaria y de aguas residuales: purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales*. Ayanegui J., Salvador (trad.) Colombia: Limusa, 1968, 763p. ISBN: 968-18-0167-9.
3. MARA, Duncan. *Domestic wastewater treatment in development countries*. London: Earthscan, 2003. 293 p. ISBN: 1-84407-019-0.
4. METCALF & EDDY, Inc. *Tratamiento y depuración de las aguas residuales*. Trillo Monsoriu, Juan de Dios; Virto Albert, Luis (trad.). Barcelona: Labor, 1977. 837p. ISBN: 84-335-6416-1.
5. OAKLEY, Stewart M. *Lagunas de estabilización en Honduras. Manual de diseño, construcción, operación y mantenimiento monitoreo y sostenibilidad*. Honduras: FIHS, USAID y RRAS-CA, 2005.
6. ROMERO, Jairo Alberto. *Tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización*, Colombia: Alfaomega, 2000. 281 p. ISBN: 970-15-0403-8.