

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL



MEJORAMIENTO Y USO PARA RIEGO DE LOS
EFLUENTES DE LA PLANTA DE AGUAS RESIDUALES
PUCHUKOLLO

Diseño e implementación de estanques con pulimento estacionario

Proyecto de grado presentado para la obtención del Grado de Licenciatura en Ingeniería

POR: VALENTÍN MAMANI CHOQUE

TUTOR: M.SC. ING. JAVIER GONZALO HERNANI DÍAZ

LA PAZ – BOLIVIA

Julio, 2016

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Proyecto de Grado:

**MEJORAMIENTO Y USO PARA RIEGO DE LOS EFLUENTES DE
LA PLANTA DE AGUAS RESIDUALES PUCHUKOLLO**

Presentado por:

Univ. Valentín Mamani Choque

Para optar por el grado académico de: *Licenciado en Ingeniería Industrial*

Nota Numeral:

Nota Literal:

Ha sido:

Director de la carrera de Ingeniería Industrial:

M.SC. Ing. Oswaldo Fernando Terán Modregón.....

Tutor:

M.SC. Ing. Javier Gonzalo Hernani Díaz

Tribunales:

M.SC. Ing. Mario Zenteno Benítez

M.SC. Ing. Freddy Gutiérrez Barea

M.SC. Ing. Hugo Mobarec Clavijo

M.SC. Ing. Boris Párraga Andrade

DEDICATORIA

*A mis padres y hermano Nicolás (†),
mi esposa con quien comparto éxitos y
fracasos que la vida me da; por ser el
alimento que mantiene con vida mi ser; a
mis hijos, Adriana, Valeria y Yuri, para
que sigan los pasos del conocimiento, y
que algún día con este ejemplo puedan
aportar significativamente a la grandeza
de nuestra patria.*

AGRADECIMIENTO

A la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Mayor de San Andrés, por acogerme en sus aulas. A todos los Docentes, por los conocimientos y experiencias impartidas en los años de mi formación.

Mi sincero agradecimiento, Apreciación y gratitud al M.SC. Ing. Javier Gonzalo Hernani Díaz Tutor del proyecto, por su asesoramiento científico, dedicación, supervisión y por toda la confianza depositada en esta investigación.

A la Empresa Pública Social del Agua y Saneamiento (EPSAS) por brindarme su apoyo, cooperación y realización del proyecto en sus instalaciones; al Ing. Diego H. Contreras Vargas Gerente Técnico y a Lic. Eunice M. Choque Alex Jefa de Laboratorio Puchukollo.

A Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego (VRHR) del Estado Plurinacional de Bolivia, por intermedio del Ing. Carlos R. Ortuño Yáñez, Ing. Alejandro Blanco Cano, Ing. María E. Choque y un exclusivo agradecimiento a Lic. José Luis Lahore Bernal por su cooperación.

Asimismo al Ing. Luís Guzmán de la cooperación alemana, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) PROAGRO.

A los tribunales: Ing. Mario F. Zenteno Benítez, Ing. Freddy Gutiérrez Barea, Ing. Hugo Mobarec Clavijo y Ing. Boris Párraga Andrade; por la revisión, paciencia corrección, sugerencias y recomendaciones para la mejora del documento final.

A todos y cada uno de ellos, ¡muchas gracias!

Valentín Mamani Choque

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO I: BASE CONCEPTUAL Y ALCANCE.....	3
1 CONSIDERACIONES GENERALES.....	3
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.2 OBJETIVOS.	3
1.2.1 Objetivo General.....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 METODOLOGÍA.....	4
1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	5
CAPÍTULO II: DIAGNÓSTICO DE LA EMPRESA.....	6
2 DIAGNOSTICO GENERAL DE LA PLANTA.....	6
2.1 DESCRIPCIÓN DE LA PTAR PUCHUKOLLO.	6
2.1.1 Recolección de las aguas residuales	9
2.1.2 Pretratamiento.....	9
2.1.3 Tratamiento primario.....	10
2.1.4 Tratamiento secundario	10
2.2 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA EN LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN	12
2.3 CALIDAD DE LAS AGUAS TRATADAS Y EFICIENCIA DE LA PTAR PUCHUKOLLO.....	14
CAPÍTULO III: DIAGNOSTICO DEL USO DE AGUAS RESIDUALES EN COMUNIDADES	17
3 IMPACTO DEL USO DE AGUAS RESIDUALES EN COMUNIDADES.....	17
3.1 CONSIDERACIONES.....	17
3.2 METODOLOGÍA.....	18
3.3 ACTIVIDAD DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA	19
3.3.1 Especies sembradas en zonas aledañas a los ríos Seco, Pallina y Catari.....	19
3.3.2 Uso de abonos y fertilizantes.....	19
3.3.3 Uso de plaguicidas.....	20
3.3.4 Destino de la producción	20

Tabla de contenido

3.3.5 Precios de venta de los productos.....	21
3.4 FUENTES DE AGUA	22
3.4.1 Procedencia de agua para riego	22
3.4.2 Periodos de riego en los cultivos	22
3.4.3 Mantenimiento, limpieza de pozos, acequias y organización comunal.....	23
3.5 EFECTOS DE AGUAS RESIDUALES, PROVENIENTES DE LA PTAR EN CULTIVOS Y AGRICULTORES	24
3.6 EFECTOS EN SUELOS.....	25
3.6.1 Efectos de aguas residuales provenientes de la PTAR en suelos	25
3.7 EFECTO DE AGUA RESIDUAL EN LA GANADERÍA.....	26
3.7.1 Consumo de agua en la crianza del ganado.....	26
3.7.2 Agua para cultivo de forrajes y tipos de forrajes.....	27
3.7.3 Producción pecuaria y sus beneficios.....	27
3.8 EFECTOS EN SALUD DE LOS AGRICULTORES	28
3.9 EFECTOS SOCIOECONÓMICOS	29
3.10 TECNICAS DE USO SEGURO DE LAS AGUAS RESIDUALES	30
3.11 ANÁLISIS DE LA ENCUESTA	30
CAPÍTULO IV: FUNDAMENTACION TEÓRICA DEL USO DE AGUAS RESIDUALES	32
4 TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES PARA RIEGO.....	32
4.1 MARCO CONCEPTUAL.....	32
4.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE AGUAS RESIDUALES	33
4.3 ALTERNATIVAS EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA REÚSO EN RIEGO.....	34
4.3.1 Proceso de electrocoagulación, electro floculación e intercambio iónico.....	34
4.3.2 Procesos de Micro filtración, Nano filtración y Osmosis inversa	36
4.3.3 Proceso de Humedales artificiales.....	41
4.3.4 Proceso aplicando Lagunas de Estabilización.....	44
4.3.5 Procesos en Sistemas de estanques de pulimento estacionario	48
4.4 CRITERIOS PARA SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS EN PROCESOS DE AGUA RESIDUAL DEL EFLUENTE DE LA PTAR PUCHUKOLLO.....	49

Tabla de contenido

4.5 ANÁLISIS DE LA MATRIZ CUALITATIVA EN EFICIENCIA Y COSTO.....	50
4.5.1 Procesos de Micro filtración, nano filtración y la osmosis Inversa	50
4.5.2 Procesos de Electro floculación y electrocoagulación.....	50
4.5.3 Procesos con Humedales artificiales	50
4.5.4 Procesos aplicando Lagunas de Estabilización.....	51
4.5.5 Procesos en Sistema de estanques de pulimento estacionario	51
CAPÍTULO V: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE ESTANQUES CON PULIMENTO ESTACIONARIO	52
5 IMPLEMENTACION DE ESTANQUES DE PULIMENTO ESTACIONARIO.....	52
5.1 CONSIDERACIONES GENERALES.....	52
5.2 PLANTEAMIENTO TEÓRICO PARA EL DISEÑO DE ESTANQUES ESTACIONARIOS.....	54
5.3 APLICACIÓN BALANCE DE MASA EN ESTANQUES DE PULIMENTO ESTACIONARIO	56
5.3.1 Base teórica para el cálculo de la masa	57
5.3.2 Base experimental para el cálculo de masa en laboratorio de (EPSAS).....	58
5.4 APLICACIÓN DE BALANCE DE ENERGÍA EN ESTANQUE DE PULIMENTO ESTACIONARIO	59
5.5 REQUERIMIENTO DE CALIDAD DE AGUA PARA RIEGO	62
5.6 PARÁMETROS FÍSICOS, QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS DEL AGUA DE RIEGO	62
5.6.1 Parámetros y características físicas	63
5.6.2 Parámetros y característicos químicos.....	64
5.6.3 Características biológicas	65
5.7 COMPARACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA RESIDUAL PARA EL RIEGO.	65
5.8 MÉTODO DE RIEGO CON AGUA RESIDUAL EN EL PROCESO PLANTEADO.....	66
5.9 NORMAS DE AGUAS RESIDUALES PARA USO EN RIEGO AGRÍCOLA.....	67
5.10 SELECCIÓN DE LAS VARIABLES DE CONTROL	69
5.10.1 Evaluación de los variables del sistema de riego.....	70
5.10.2 Caudal de salida de agua efluente de la PTAR Puchukollo.....	70
5.11 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMAS DE RIEGO EN PARCELAS	71
CAPÍTULO VI: DESCRIPCION Y ANALISIS DEL CULTIVO DE PAPA	74
6 CULTIVO DE PAPA EN PARCELAS DE EXPERIMENTACIÓN	74
6.1 GENERALIDADES EN CULTIVO DE LA PAPA.....	74

Tabla de contenido

6.2 CADENA PRODUCTIVA DE LA PAPA EN PARCELAS PILOTO.....	76
6.2.1 Preparación del terreno.....	76
6.2.2 Siembra de papa en parcelas de experimentación	78
6.3 SUMINISTRO DE AGUA TRATADA EN PARCELAS E IMPACTO DE ENERGÍA SOLAR.....	79
6.3.1 Balance de agua para riego.....	79
6.3.2 Energía en el desarrollo de la papa.....	80
6.4 LABORES CARACTERÍSTICOS EN EL CULTIVO DE LA PAPA.....	81
6.4.1 Aporque en las parcelas.....	81
6.4.2 Riego con diferentes tratamientos de agua residual	82
6.4.3 Control de malezas y aireación del suelo	83
6.4.4 Canopia, inflorescencia y maduración de los cultivos de papa	84
6.4.5 Monitoreo de las aguas del riego y evaluación de la producción.....	85
6.4.6 Cosecha de los productos en parcelas piloto de experimentación.....	87
6.5 ACTIVIDADES POST COSECHA DE LOS PRODUCTOS DE PAPA	87
6.5.1 Control de peso de los productos cosechados	88
6.5.2 Selección de productos por tamaño en diámetro	89
6.5.3 Control físico de los productos determinadas para estudio	91
6.5.4 Selección de muestras para análisis en Laboratorio	93
CAPÍTULO VII: RESULTADOS	95
7 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PRODUCCION DE PAPA	95
7.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS EN MEJORAMIENTO DE AGUA RESIDUAL.....	95
7.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PRODUCCIÓN DE PAPA HUAYCHA	97
7.3 ANÁLISIS TÉCNICO, ECONÓMICO, SOCIAL Y AMBIENTAL DE LA INVESTIGACIÓN:.....	101
CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	105
8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	105
9 BIBLIOGRAFÍA.....	107
10 ANEXOS	110

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 2-1: Características de las lagunas de la PTAR Puchukollo	12
CUADRO 2-2: Tiempo de retención estimado en lagunas de la PTAR Puchukollo.....	13
CUADRO 2-3: Tiempo de retención real en lagunas de la PTAR Puchukollo	13
CUADRO 2-4: Resultados de análisis en laboratorio de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de la PTAR Puchukollo.....	14
CUADRO 2-5: Resultados de análisis en laboratorio de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de la PTAR Puchukollo (Continuación)	15
CUADRO 4-1: Componentes Fisicoquímicos y Biológicos de aguas residuales.....	33
CUADRO 4-2: Remoción de constituyentes de aguas residuales	36
CUADRO 4-3: Proceso de separación por membranas más usadas.	36
CUADRO 4-4: Matriz comparativo en tratamiento de aguas residuales de riego	49
CUADRO 5-1: Densidad y Masa de agua residual contenido en cada recipiente	59
CUADRO 5-2: Directrices de calidad físico-químico de aguas para riego agrícola	66
CUADRO 5-3: Calidad parasitológica y microbiológica de las aguas residuales	68
CUADRO 5-4: Parámetros de la calidad de agua residual para riego	68
CUADRO 5-5: Variables registrados en aguas residuales tratadas para riego	70
CUADRO 6-1: Análisis de suelo en laboratorio IBTEN.	77
CUADRO 6-2: Datos del monitoreo de aguas tratadas con promedio mensual	86
CUADRO 6-3: Resultados de la cantidad en peso de papa cosechada en parcelas	89
CUADRO 6-4: Diámetro promedio de los productos cosechados.....	90
CUADRO 6-5: Diámetro promedio de los productos cosechados (Continuacion)	91
CUADRO 6-6: Calidad física de las muestras en diferentes tratamientos	92
CUADRO 6-7: Muestras enviadas al Centro de investigación de la COMIBOL.....	94
CUADRO 7-1: Calidad de agua residual evaluada en diferentes tratamientos	95
CUADRO 7-2: Volúmenes de agua recargada en los recipientes por periodos	96
CUADRO 7-3: Resultados de análisis Bromatológico en muestras	99

Índice de cuadros

CUADRO 7-4: Resultados obtenidos del análisis en muestras de los productos	99
CUADRO 7-5: Composición química de la papa certificado según FAO y OMS	100
CUADRO 7-6: Costos de inversión, operación y mantenimiento PTAR Puchukollo...	102
CUADRO 7-7: Costo de implementación para riego agrícola.....	102
CUADRO 7-8: Costo de implementación para riego agrícola (Continuación).	103

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 3-1: Cultivos sembrados en zonas aledañas a Río Seco, Pallina y Catari.	19
GRÁFICO 3-2: Abonos y fertilizantes utilizados por los agricultores	20
GRÁFICO 3-3: Especies relevantes producidos por los comunarios.	21
GRÁFICO 3-4: Precios de venta de los productos en ferias provinciales	21
GRÁFICO 3-5: Agua para riego en cultivos agrícolas.	22
GRÁFICO 3-6: Periodo de riegos en los cultivos.....	23
GRÁFICO 3-7: A-Mantenimiento y limpieza de infraestructura de riego y B-Existencia de una organización comunal.....	23
GRÁFICO 3-8: A-Efectos de sanidad en los cultivos. B-Uso de indumentaria	24
GRÁFICO 3-9: A – Efectos físicos en los suelos, B – Efectos químicos en suelos.	25
GRÁFICO 3-10: Agua para consumo de ganado.	26
GRÁFICO 3-11: A.- Agua para cultivo y B.- Forrajes sembrado	27
GRÁFICO 3-12: Precios de venta de ganados en municipios Pucarani y Viacha.....	28
GRÁFICO 3-13: A- Enfermedades en familias, B -Enfermedades en agricultores.	29
GRÁFICO 3-14: Consulta sobre posible reúso del agua Residual	30
GRÁFICO 7-1: Cantidad de productos cosechados en las parcelas	98

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1: Flujo de agua residual de la PTAR Puchukollo.	7
FIGURA 2-2: Vista satelital Afluente, lagunas y filtros de la PTAR Puchukollo.....	8
FIGURA 3-1: Ubicación de la zona de recopilación de información (encuestas).	18
FIGURA 4-1: Sistema de electro coagulación del agua residual.....	34
FIGURA 4-2: Sistema de electro floculación del agua residual.	35
FIGURA 4-3: Estructura del sistema “Ultra Filtración” Estándar (200 m ³ /día).....	38
FIGURA 4-4: Sistema de filtros en Nano filtración para purificar agua residual	39
FIGURA 4-5: Módulo de láminas en espiral en Osmosis Inversa.....	41
FIGURA 4-6: Humedal de flujo superficial expuesta a la atmósfera.	42
FIGURA 4-7: Humedal Subsuperficial de flujo vertical.	43
FIGURA 4-8: Esquema de tratamiento de agua residual en lagunas.....	45
FIGURA 4-9: Fenómenos físicos, químicos, y biológicos en laguna facultativa.	48
FIGURA 4-10: Mezcla de aguas residuales y claras del drenaje en reservorio.....	49
FIGURA 5-1: Flujo secuencial lógica de agua abajo para riego.	53
FIGURA 5-2: Forma geométrica de los tanques de pulimento y ecualizador	57
FIGURA 5-3: Sistema de tanques de ecualización de aguas residuales.	71
FIGURA 5-4: Parcelas para siembra de patatas y 5 tanques ecualizadores.....	72
FIGURA 5-5: Aducción de agua clara del drenaje a los recipientes	73
FIGURA 6-1: Roturado del terreno para siembra de papa	78
FIGURA 6-2: Abriendo surcos para la siembra de papa	79
FIGURA 6-3: Aporque realizado por sucos en las parcelas	82
FIGURA 6-4: Riego a los plantines con aguas tratadas en las parcelas	82
FIGURA 6-5: Labores agrícolas en el desarrollo de plantines en parcelas	83
FIGURA 6-6: Proceso de follaje e inflorescencia del cultivo de papa	84
FIGURA 6-7: Medición de parámetros en aguas del sistema de tratamientos	85
FIGURA 6-8: Cosecha y selección de productos (tubérculos)	87

RESUMEN

En la presente investigación, pretende determinar la viabilidad del proyecto con el diseño e implementación de estanques con pulimento estacionario, para mejorar las aguas efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Puchukollo para riego.

La (PTAR) Puchukollo, data su desempeño desde finales del siglo pasado (1998) con 13 Lagunas de Estabilización en dos series, que funcionan simultáneamente. Posteriormente se implementó con tres Filtros Percoladores, con el propósito de mejorar la remoción de contaminantes del agua residual proveniente de la ciudad de El Alto.

El diagnóstico realizado en las comunidades, analizadas las causas y efectos sobre las aguas residuales de la PTAR Puchukollo, incide impactos en el desarrollo normal del vivir de sus habitantes, de ahí la necesidad de plantear una solución al problema.

Para llevar a cabo la implementación de Estanques de Pulimento Estacionario han sido esbozados diferentes conocimientos en el tratamiento de aguas residuales para riego agrícola, pues el sistema planteado, es la más factible y consistente a partir del efluente de aguas residuales de la PTAR Puchukollo, asimismo las aguas tratadas son aplicadas para riego del cultivo de papa en parcelas de experimentación.

Con el cultivo de la papa Huaycha, evaluación de los productos, análisis de los parámetros nutricionales en laboratorios. A partir de estos resultados obtenidos, se determina que el producto (papa Huaycha) es apto para el consumo humano.

En el presente estudio pudo comprobarse que la mejora del efluente de aguas residuales de la PTAR Puchukollo en la empresa EPSAS es factible para riego agrícola; de manera que pueda haber una seguridad alimentaria en la región.

Palabras claves: Mejora, agua residual, comunarios, tratamientos, papa, nutrición.

SUMMARY

This research presents the following aimst: to determine the Project viability with the design implementation of ponds system with stationary polish in order to improve the effluent water of the treatment of sewage water plant the irrigation Puchukollo.

The Puchukollo data its performance since final pass century 1998 with 13 stabilization gaps in two series that work simultaneously after it is implemented with three percolar filters with the purpose of improve the removal of pollutants sewage water originating in El Alto city.

The communities had a diagnosis that was in effect and causes on the sewage water PTAR Puchukollo, impinges impacts in the normal population living it is to get solution of this problem.

For carry the implementation of ponds stationary polish has been outlined different knowledge in the treatment sewage water for agricultural irrigation, for the propound system, is the more feasible and consistent since of efficient sewage water the (PTAR Puchukollo), likewise the sewage water treated are applied for denied of cultivation potato in experimentation.

With the Huaycha cultivation potato, products evaluation, analysis of the nutritional parameters in laboratory and since the abstained result. Is determined that the product (Huaycha potato) is suitable for the human consumption.

This study can check that the fix of the residual water of the PTAR Puchukollo in the EPSAS EMPRESARY is feasible to agricultural irrigation for reason can exist an alimentary security in this region.

Keywords; sewage water, community, treatment, potato, improvement, nutrition.

JUK'A ARUNAKANA QHANANCHAWI

Aka qillqatanxa, amtatawa wakt'awi nayraru sartayaña ukasti askina wakicht'asina ukhamaraki phuqhayasina ukaxa uma tantañanaka *pulimentos* satakisa ukampi wakt'ayasina, ukhamana uma saririnaka askina askichañataki ukhamana *Planta de tratamiento de Aguas residuales* satakisa Phuch'uqullu ukaru sarayañataki.

PATAR Phuch'uqullu ukata chiqasa irnaqawipaxa jutiwa nayriri pataka maranaka qhipharirinatpacha ukaxa ma waranqa llatunk pataka llatunk tunk kimsaqalquni maranakatpacha ukasti kimsa uma utjayiri qutanakata pä amtarjama kawkiritixa askina sari. Ukharuxa kimsa *filtros Pelcoladores* ukanakampiwa sari ukasti jani q'añuchawinakaxa utxañapataki kawitixa uka q'añu uma sariri utjkipana aka El Alto markata

Kunatixa uka ayllu tuqinakana uñakipawi utjawaykipanxa, kawkitixa uñakipata juk'añata utjawaykipanxa ukaxa *PATAR* Phuch'uqullu ukata chiqasa jakirinakapana p'artawinakapanwa chikañchasi ukatawa utjixa chiqasa mä jan walt'awi askichañataki amuyunaka qhanstayaña.

Ukasti chiqasa kunatixa *estanques* satakisa ukanaka phuqhayañataki apaña chiqasa kunaymaninakarawa uñacht'ayata utjawayi ukaxa umanaka q'umachawina chikañchayañataki ukhamana yapunakaru qarpañataki, ukampisa kunatixa amtaxa utjawayki ukawa askixa ukhamarakiwa wakiskirisa ukasti uka q'umachata umanaka jutkipana *PTAR* satakisa ukata ukaxa phuch'uqullu ukata ukhamarakiwa uka umanakaxa askina q'umachata ukaxa ch'uqitaki juk'ampinakataki.

Ukampisa waych'a ch'uqi yapuchawina, ukhamaraki kunaymana achunakas uñakipawina ukasti mä laboratorio satakisa ukana ukampisa kuna amtawinakaya

Summary

ch'umstchi ukhamarjama irnaqaña chiqasa ukhamarjamaxa utjawayiwa amtawi ch'umstawixa uka waych'a ch'uqixa askitapa jaqixa manq'asiñapataki.

Aka yatxatawinxa chiqasa askina uñjata utjawayiwa ukaxa uma suma uñakipawinxá PTAR Phuch'uqullu ukata jutkipanxa ukasti *empresa EPSAS* ukanxa askitapa ukasti achuwinakaru qarpañataki ukasti askinarakiwa chikañchayataspaxa aski uñakipawi ukaxa manq'aña tuqina jani kunsá pist'awinaka utjaskañapataki.

YĀQANĀ ARUNAKA: Askichawi, q'añu uma, markachirinaka, q'umachawi, ch'uqi, manq'aña tuqi ch'ullqhiñchawi.

INTRODUCCIÓN

Uno de los retos del siglo XXI consistirá en gestionar juiciosamente los recursos hídricos. El crecimiento demográfico, industrial y los cambios climáticos están generando escasez de aguas dulces cada vez mayor y dando lugar al uso creciente de aguas residuales en la agricultura y otros usos. En algunas zonas de nuestro planeta, las aguas residuales son el único recurso hídrico en comunidades que tienen como base la agricultura en su economía. Si bien el uso de aguas residuales en la agricultura puede aportar beneficios por su contenido en nutrientes, su uso no controlado está relacionado con impactos negativos sobre la salud humana.

Existen diferentes técnicas y tecnologías que podrían adoptarse a objeto de acondicionar estas aguas para su uso seguro. Para este propósito es importante enfocarse inicialmente en resolver el problema de los patógenos, es decir disminuir el contenido de Coliformes fecales menores a límites establecidos por el RMCH ($\leq 1\ 000$ NMP/100ml).

También existen otros métodos convencionales, tales como: electrocoagulación, floculación, micro filtración, osmosis inversa, ozonización, humedales artificiales, lodos activados, zanjas de oxidación y otros, pero tienen la desventaja de tener altos costos de inversión, dificultades de operación y mantenimiento, requieren de desinfección microbiológica para garantizar una calidad comparable a lagunas de estabilización.

La técnica más utilizada por su simplicidad, bajos costos de operación y mantenimiento están las lagunas de estabilización debido a que sus procesos biológicos son naturales, por lo tanto no necesitan equipo electromecánico, combustible, ni energía eléctrica, adecuándose de manera a las posibilidades económicas en poblaciones y ciudades intermedias, donde es posible disponer espacio necesarios para su implementación.

Introducción

En estas unidades la remoción ocurre en forma espontánea, con proceso conocido como autodepuración o estabilización natural mediante fenómenos de tipo fisicoquímico, y biológico. Este proceso se lleva a cabo en casi todas las aguas estancadas con alto contenido de materia orgánica putrescible o biodegradable.

En Bolivia actualmente, se estima que el 10 % de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) existentes operan de manera eficiente, cumpliendo los límites permisibles para descargas establecidos en el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH). Entre los parámetros críticos cuyos límites son difíciles de alcanzar están los Coliformes fecales (≤ 1000 NMP/100 ml), el nitrógeno total (≤ 12 mg N/l), el fósforo como orto fosfato ($\leq 1,0$ mg/l), la DBO₅ (≤ 80 mg/l) y la DQO (250 mg/l).

El sistema de lagunas de estabilización y otras actualmente ha sido implementado en varios lugares de Bolivia. Las ciudades que cuentan con estas Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) están en las ciudades de: El Alto, Oruro, Cochabamba, Santa Cruz, Sucre, Tarija y Trinidad. En estas plantas la secuencia del sistema de lagunaje es similar con las secuencias:

- 1) Lagunas anaerobias.
- 2) Lagunas facultativas.
- 3) Lagunas de maduración.
- 4) Lagunas de pulimento estacionario.

Por tanto, este último por su especial importancia para el reúso en riego es considerado en la investigación. De acuerdo al diseño adecuado, el sistema es capaz de lograr una buena desinfección por la acción de la radiación UV del sol.

Con base en lo expuesto, considerando la alternativa planteada y seleccionada, el presente proyecto estará enfocada en presentar, con los criterios considerados la implementación del Sistema de Estanques de Pulimento Estacionario de las aguas del efluente de la PTAR Puchukollo para cultivo de papa.

CAPÍTULO I: BASE CONCEPTUAL Y ALCANCE

1 CONSIDERACIONES GENERALES

1.1 Planteamiento del problema

Las continuas actividades que se desarrollan en el centro urbano, tanto domésticas como industriales, evacuan sus aguas utilizadas en alcantarillas y estas al emisario principal a la Planta Puchukollo, pero el alto crecimiento demográfico la ciudad de El Alto en estos últimos años ha bajado la capacidad de remoción en la Planta, creando el problema del impacto ambiental, social e institucional. Es eminente, el clamor de los comunarios de curso de los ríos: Seco, Pallina, Catari y Bahía de Cohana por la mala gestión de las aguas residuales de la PTAR Puchukollo por la empresa EPSAS.

1.2 Objetivos.

1.2.1 Objetivo General.

Mediante información adecuada, desarrollar un método para la mejora de aguas del efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Puchukollo, que será útil en riego agrícola con calidad aceptable. Asimismo proponer pautas para el uso del agua tratada para otros usos y consumo humano, esta propuesta está en función del grado de culminación de la primera etapa, pero se recomendará en las conclusiones.

1.2.2 Objetivos específicos.

- Establecer visitas, entrevistas y encuestas a los pobladores, próximos a la PTAR Puchukollo y habitantes cercanos al cuerpo de los ríos donde fluyen las aguas residuales y obtener información sobre el efecto de las aguas residuales.

Capítulo I

- Seleccionar y aplicar metodologías para el mejoramiento de las aguas residuales de la PTAR Puchukollo.
- Describir el comportamiento hidrológico, fisicoquímico y bacteriológico en las aguas residuales de la PTAR Puchukollo.
- Operacionalizar un sistema de Estanques de Pulimento con Retención Estacionaria con las aguas del efluente de la PTAR, para el riego en cultivo de la papa,
- Analizar y evaluar cuantitativa y cualitativamente los productos obtenidos.
- Estimar los costos de la planta de diseño experimental.

1.3 Metodología

En la presente investigación, se aplicaran métodos cuantitativos y cualitativos que serán senderos más apropiados y convenientes para alcanzar el objetivo trazado, estos son los siguientes:

- **Método descriptivo.** Aplicado en la investigación con entrevista y encuestas a comunarios próximos a la PTAR Puchukollo, asimismo a las personas entendidas en el rubro, expertos e Ingenieros. Las cuales corroboraran en la indagación del problema y su veracidad.
- **Método experimental.** Método pragmático considerado empírico, aportará bastante en la investigación del problema sobre el reúso de aguas residuales, con las cuales se observará y analizará las variables necesarias para la mejora de aguas residuales de la PTAR Puchukollo.
- **Método analítico.** Método que disgrega en sus partes el conjunto del problema, para analizar y solucionar cada una de las partes del sistema propuesto a implementar, analizar las partes de las parcelas sembradas y sus componentes.
- **Método sintético.** Todo lo expresado, debe concluir con la sistematización de los métodos anteriores.

1.4 Alcances y limitaciones de la investigación

En la presente investigación es imperioso mencionar las trayectorias, que son limitantes en los diferentes aspectos y ámbitos tal como se indica:

- **Ámbito geográfico**

El proyecto está circunscrito en los Municipios de El Alto, Viacha y Pucarani, con mayor énfasis en las poblaciones próximo a PTAR Puchukollo, ríos: Seco, Pallina, Catari y la Bahía de Cohana

- **Ámbito académico**

El estudio se basa en conocimientos de operaciones unitarias, procesos fisicoquímicos, microbiología básica, diseño y construcción de plantas experimentales, preparación y evaluación económica de proyectos respectivamente.

- **Ámbito institucional**

Se coordinará con la empresa EPSAS, Gobierno Municipal de El Alto, el Gobierno Departamental y Ministerio de Medio ambiente y Agua (MMAyA).

- **Límite espacial**

El estudio e implementación de la mejora de aguas, parcelas de experimentación y otras actividades se ejecutará en los predios de la PTAR Puchukollo.

CAPÍTULO II: DIAGNÓSTICO DE LA EMPRESA

2 DIAGNOSTICO GENERAL DE LA PLANTA.

2.1 Descripción de la PTAR Puchukollo.

La Empresa Pública Social de Agua y Saneamiento (EPSAS) administra el servicio de agua potable y saneamiento básico en las ciudades de La Paz y El Alto. En esta última provee el servicio de tratamiento de aguas residuales a través de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Puchukollo, denominado por los comunarios “Puchukollo Bajo” ubicado al oeste de la ciudad de El Alto.

Se construyó la Planta con una inversión de 8,4 millones de dólares americanos, está emplazada en la zona Puchukollo Bajo, en el límite entre los municipios de Viacha (Provincia Ingavi) y Municipio de Laja (Provincia Los Andes), ubicada a $16^{\circ} 33' 23,35''$ de latitud sur, $68^{\circ} 15' 40''$ de longitud oeste y a una altura de 3.935 msnm.

La Planta inició su funcionamiento el 9 de noviembre 1998 con una capacidad diseñada de 430 l/s. La Planta tiene una extensión de 127 hectáreas, de las cuales 48 [ha], son empleados para la construcción de dos series de lagunas de estabilización.

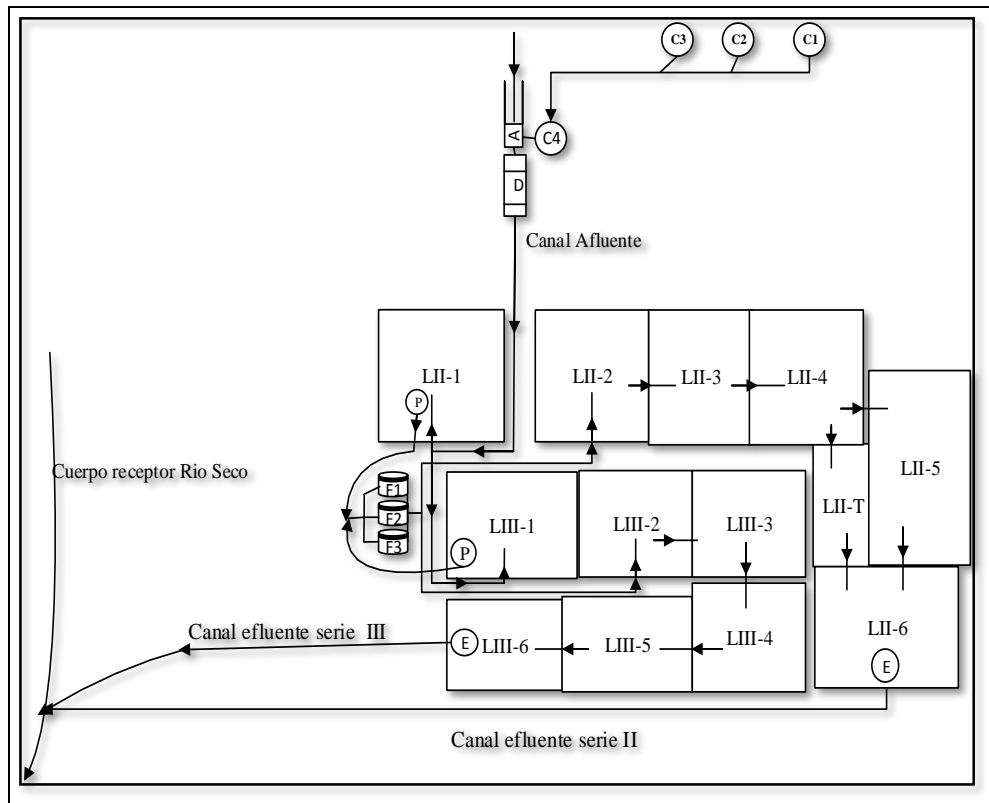
Entre los años 2008 - 2010 fue ampliada la infraestructura con la construcción de tres filtros percoladores cilíndricos con capacidad total de 542 [L/s], dotados de dos cárcamos con bombas sumergibles; una para alimentar a los filtros, otro para bombeo a las dos series de lagunas, construidas en una superficie de dos hectáreas y con un costo de 8,1 millones de dólares americanos, con el propósito de mejorar la calidad del efluente del PTAR Puchukollo.

Recientemente entre los años 2012 – 2014 EPSAS se construyeron cuatro cárcamos de bombeo para recolectar aguas residuales de los distritos 8 y 12 de la parte sur

Capítulo II

de la ciudad de El Alto, los cuales son aduccionado por medio de un tubo emisario de hormigón a la PTAR Puchukollo; las mismas son administradas por personal técnico y operadores de la Planta. El flujo de agua residual se muestra en la Figura 2-1, comienza con la recepción en el emisario principal (Afluyente) pasa por pretratamiento, tratamientos primarios, tratamientos secundarios, la salida es por las últimas lagunas (efluentes) y es evacuado al cuerpo del río Seco.

FIGURA 2-1: Flujo de agua residual de la PTAR Puchukollo.



Fuente: Elaboración con base a diagnóstico y observación

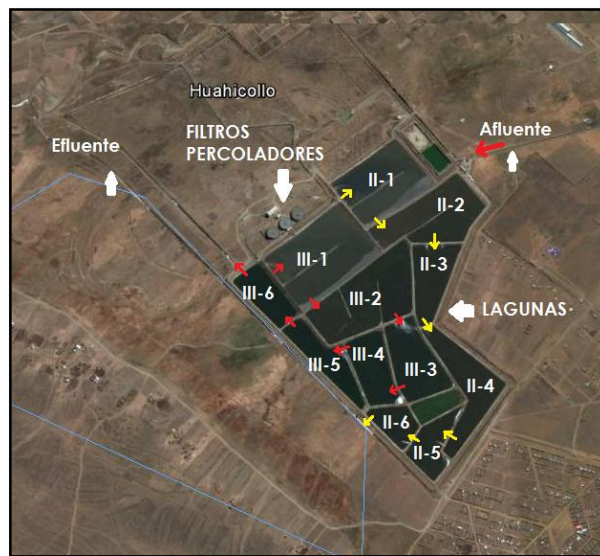
En el Figura 2-1 también podemos observar que: C1, C2, C3, C4 son cárcamos que recolectan aguas residuales de las alcantarillas y son bombeadas al emisario principal (A) que confluyen de los emisarios de menor caudal; pasa por el desbaste (D), separa sólidos y arena del agua residual; las lagunas LII-1 y LIII-1 son anaerobias que estabilizan las aguas residuales crudas.

Capítulo II

Los puntos (P) son afluentes, de las cuales son conducidos por canales de hormigón al cárcamo, de ella a los filtros percoladores F1, F2, F3, luego son evacuados por tubos de Hierro fundido a los puntos (E) a lagunas LII-2 y LIII-2. Las lagunas de LII-2 a LII-6 y LIII-2 al LIII-6 son facultativas, de maduración y de pulimento de las aguas residuales. La laguna LII-T es de experimentación con plantas de totora para su depuración.

Así mismo, como parte del diagnóstico se presenta la vista satelital de la Planta PTAR Puchukollo con sus configuraciones geométricas. Esta vista es la base de los estudios y análisis que se realizará en la planta para futuras investigaciones. Figura 2-2.

FIGURA 2-2: Vista satelital Afluente, lagunas y filtros de la PTAR Puchukollo



Fuente: Elaboración con base imagen Satelital Google Earth

Actualmente, las etapas de la PTAR Puchukollo comprenden las siguientes operaciones y procesos que serán descritas con bastante detalle:

- Recolección de las aguas residuales
- Pretratamiento
- Tratamiento primario
- Tratamiento secundario

2.1.1 Recolección de las aguas residuales

Las aguas residuales son colectadas por el sistema de alcantarillado implementado en la ciudad de El Alto. El sistema es conectado a un tubo de 1000 mm de diámetro, por gravedad el agua fluye al emisario principal, También son recolectados por alcantarillas a los cárcamos de bombeo C1, C2, C3, las aguas residuales provenientes de las zonas de los Distritos 8,12 y otros; son conducidos al cárcamo C4, de ella es bombeada al emisario principal. Luego confluyen al afluente (A) de la PTAR para el pretratamiento.

2.1.2 Pretratamiento

Consta de las siguientes tres operaciones:

Desbaste. En esta etapa se realiza la separación de sólidos gruesos flotantes mediante rejillas de retención de 50 mm de distancia entre varillas. Los sólidos retenidos, trapos, plásticos, animales, papel, etc., son evacuados manualmente con rastrillo y reunidos en un contenedor para su posterior retiro por la empresa de recojo de residuos sólidos Trebol- El Alto.

Desarenado. Durante esta etapa la grava y arena contenida en el agua residual (afluente); como sus densidades que varían de 1,3 a 1,7 g/cm³, son retenidas en el fondo por dos cámaras de retención, rectangulares de flujo horizontal que operan en paralelo. La arena retenida se evacúa mediante compuertas ubicadas en los fondos en forma piramidal truncada para disponerlos como material de relleno, según diseño y construcción (no funciona). Actualmente la carga es retirada manualmente usando picota y pala, el flujo de agua sobrenadante continua su recorrido por canales, casi libre de material sólido.

Regulación de caudal. El afluente ingresa al canal de distribución atravesando dos compuertas metálicas con las que se regula su caudal entre 300 a 500 l/s, el excedente se desvía por el canal By Pass directamente al cuerpo receptor del río Seco. Posteriormente, atraviesa unas rejillas finas de acero que retiene principalmente sólidos flotantes de menor dimensión y luego pasa por un canal Parshall, donde se registra el caudal efectivo de ingreso al sistema de lagunas de estabilización.

2.1.3 Tratamiento primario

Luego del pretratamiento, el agua residual pasa, a través de canales, a las lagunas anaerobias LII-1 y LIII-1 donde alrededor del 75% de los sólidos en suspensión son removidos por sedimentación en el fondo de estas dos lagunas. Asimismo, en estas lagunas comienza la fase de tratamiento biológico y químico, puesto que las aguas decantadas generan gases de sulfuro de hidrogeno (H_2S), metano (CH_4), monóxido (CO) y dióxido de carbono (CO_2). Estos gases son expulsados al medio ambiente y se puede detectar por el olor presente en el aire.

2.1.4 Tratamiento secundario

De los puntos (P) de las lagunas anaerobias LII-1 y LIII-1 son conducido por tuberías y canales de hormigón a un cárcamo, donde es bombeado por bombas sumergibles al sistema de tres filtros percoladores F1, F2 y F3; los fluidos son regados sobre cintas plásticas verticales que cumplen la función de filtros biológicos y por efecto gravitacional se escurren hasta el fondo de los filtros. Estos filtros tienen 6 metros de altura, 20 metro de diámetro y están rellenos con material sintético plástico denominado Sésil¹ en forma de cintas colgadas de una tarima de maderamen. El proceso en estos filtros es de tipo aeróbico, químico y biológico, en la superficie de las cintas se forma una película bacteriana de característica anaerobia en su interior y aerobia en su exterior.

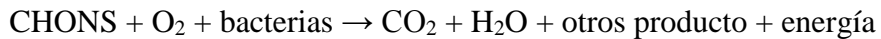
Del fondo de los filtros, las aguas residuales son recogidas en una plataforma de hormigón y conducidas mediante canales a un segundo cárcamo, donde son bombeadas a las siguientes lagunas de las dos series (LII-2 y LIII-2, facultativas) de donde por gravedad continúan su paso hacia las lagunas; LII-3, LIII-3 que también son facultativas. Las lagunas LII- 4, LIII- 4; LII-5, LIII-5 son de maduración de poca profundidad y finalmente las lagunas LII-6, LIII-6 son de afinado o pulimento.

¹Sésil¹ Material plástico donde se adhieren microorganismos.

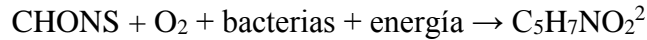
Capítulo II

Además como se mencionó existe una laguna LII- T de experimentación ecológica humedal, con vegetación de totoras, cuyo objetivo es remover los nutrientes, como nitrógeno amoniacal, orto-fosfatos para el desarrollo biótico. El proceso bioquímico sigue la secuencia:

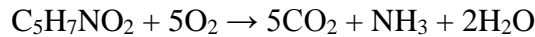
1. Oxidación de la materia orgánica.



2. Síntesis de la materia orgánica y la formación de nueva célula de bacteria.



3. Autooxidación o respiración endógena de la bacteria.



Posteriormente el amoníaco (NH_3) se oxida en nitrito (NO_2^-) luego en nitrato (NO_3^-) y se forma nitrógeno molecular, nutriente para el crecimiento vegetativo de algas y totoras. Esta purificación ayudó a la biodiversidad y al asentamiento de aves silvestres.

Después de pasar por lagunas, las aguas tratadas son evacuadas por canales de salida a través de aforadores Parshall, donde se registran los caudales; Este flujo es el efluente o de salida de la Planta, finalmente fluyen las aguas por canales abiertos hasta confluir al cuerpo del río Seco.

Las características y dimensiones de las lagunas se muestran en Cuadro 2-1. Según información de la Gerencia General de la PTAR y datos recopilados de EPSAS, las dos series de lagunas fueron construidas para retener un total de 972741,27 m³ de volumen de agua residual proveniente de la ciudad de El Alto, que con el flujo continuo procesará en 27 días teóricas aproximadamente.

² Fórmula química de célula de bacteria según Hoover y Porges, citado por Crites Tchobanoglous.

CUADRO 2-1: Características de las lagunas de la PTAR Puchukollo

Lagunas	Profundidad[m]	Área[m ²]	Volumen[m ³]
SERIE II			
II-1 – Anaerobia	4,82	54 873,00	190 818,09
II-2 – Facultativa	3,98	52 943,80	120 251,60
II-3 – Facultativa	2,80	29 898,00	64 653,43
II-4 – Maduración	1,60	36 304,40	34 342,51
II-5 – Maduración	1,44	17 950,00	16 590,98
II-5 – Totoras	1,67	9 723,75	9 456,94
II-6 – Afinado	2,56	13 411,50	23 730,40
Total Serie II		215 104,45	459 843,95
SERIE III			
III-1 – Anaerobia	4,66	71 282,50	224 418,95
III-2 – Facultativa	4,20	59 788,75	154 361,00
III-3 – Facultativa	1,76	34 987,50	39 085,27
III-4 – Maduración	1,75	25 772,50	27 463,63
III-5 – Maduración	1,80	24 043,25	28 225,98
III-6 – Afinado	2,55	20 794,25	39 342,49
Total Serie II		236 668,75	512 897,32
TOTAL GENERAL		451 773,20	972 741,27

Fuente: Datos del Departamento de Saneamiento (EPSAS 2014).

2.2 Tiempo de retención hidráulica en lagunas de estabilización

El sistema de lagunaje de la PTAR Puchukollo es considerado cuasi como un reactor de tipo flujo pistón caracterizando por: la masa que entra al sistema, pasa por la misma y es descargada en el mismo orden que ingresó sin difundir la masa uniformemente a sus alrededores, creándose corto circuitos con zonas muertas en cada una de ellas. En teoría cada elemento del líquido seguirá un patrón de agotamiento en la concentración de nutrientes, también se consideran las características geométricas, recorrido del flujo, los vientos, ubicación de las estructuras de entrada y salida en la retención de las aguas.

Según el diseño calculado, el tiempo de retención de las aguas residuales en lagunas de estabilización de la PTAR Puchukollo es de 28 días para las dos series.

Capítulo II

Pero el tiempo real de retención comprobado por el método de advección y difusión con trazadores es de 8 días para la Serie II y 9 días para la Serie III, como se indican en los Cuadro 2-2 y Cuadro 2.3 respectivamente.

CUADRO 2-2: Tiempo de retención estimado en lagunas de la PTAR Puchukollo

Serie II	Volumen [m ³]	Días	Horas	Serie III	Volumen [m ³]	Días	Horas
II-1, Anaerobia	242.925	12,48	300	III-1, Anaerobia	258.000	12,51	300
II-2, Facultativa	161.990	8,31	199	III-2, Facultativa	184.965	8,97	215
II-3, Facultativa	25.700	2,70	65	III-3, Facultativa	40.635	1,97	47
II-4, Maduración	35.739	1,83	44	III-4, Maduración	30.070	1,46	35
II-5, Maduración	30.509	1,57	38	III-5, Maduración	25.675	1,26	30
II-6, Afinado	21.840	1,12	27	III-6, Afinado	38.070	1,85	44
TOTAL	518.703	28,01	673	TOTAL	577.415	28,02	671

Fuente: Datos del Departamento de Saneamiento (EPSAS 2011).

CUADRO 2-3: Tiempo de retención real en lagunas de la PTAR Puchukollo

Serie II	Volumen [m ³]	Días	Horas	Serie III	Volumen [m ³]	Días	Horas
II-1, Anaerobia	190.818	4,30	103	III-1, Anaerobia	224.419	4,96	119
II-2, Facultativa	120.252	1,60	38	III-2, Facultativa	154.361	1,93	46
II-3, Facultativa	64.653	0,90	22	III-3, Facultativa	39.085	0,60	14
II-4, Maduración	34.343	0,46	11	III-4, Maduración	27.464	0,30	7
II-5, Maduración	16.591	0,60	14	III-5, Maduración	28.226	0,76	18
II-6, Afinado	23.730	0,26	6	III-6, Afinado	39.342	0,30	7
TOTAL	450.387	8,12	194	TOTAL	512.897	8,85	211

Fuente: Datos del Departamento de Saneamiento (EPSAS 2014).

Capítulo II

2.3 Calidad de las aguas tratadas y eficiencia de la PTAR Puchukollo

Según Crites Tchobanogluos. 2009, aún los sistemas de lagunaje no son muy eficientes en la producción de efluentes. Como se menciona, las aguas tratadas de la PTAR Puchukollo analizadas en laboratorio cumplen al menos con las Normas Internacionales de Aguas Residuales (AR) de clase B o C.

Con la implementación de los filtros percoladores como tratamiento secundario ha mejorado bastante en la remoción de las cargas orgánicas y contaminantes, según informe anual, del departamento de Laboratorio de EPSAS-2015, la PTAR en comparación con los años anteriores del año 2009, como se indica en el Cuadro 2-4.

CUADRO 2-4: Resultados de análisis en laboratorio de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de la PTAR Puchukollo

N°	Parámetros	Unidad	Ley Medio Ambiente	Afluyente Planta	Efluyente Serie II	Efluyente Serie III	Efluyente Planta	Eficiencia
1	DBO ₅	mg/LO ₂	80	531	114	123	72	87%
2	DQO	mg/LO ₂	250	1121	258	328	219	80%
3	Sólidos suspendidos	mg/L	60	415	55	99	60	86%
4	Aceites y Grasas	mg/L	10	17	5	9	2	86%
5	Fósforo	mg/L	-	14	6	7	5	64%
6	Nitrógeno Total	Mg/L	12	32	29	28	25	22%
7	Temperatura	°C	+/- 5°C	14,1	13,9	14,2	14,2	-
8	Ph	-	6<pH<9	8,6	8,1	8,2	8,1	-
9	Amoniaco Total	mg/L	2	25	24	21	19	23%
10	Coliformes Totales	NMP/100ml	-	1,2E+08	2,7E+05	2,7E+05	4,6E+05	98%
11	Coliformes Fecales	NMP/100ml	1,00E+03	1,0E+08	1,8E+05	2,4E+05	3,4E+05	98%
12	Fenoles	mg/L	5	0,140	0,008	0,024	0,0056	96%
13	Hidrocarburos totales	mg/L	-	5,1	-	-	2,8	46%
14	Cianuro	mg/L	0,2	0,003	0,002	0,003	0,001	67%
15	Detergentes Sintéticos	mg/L	0,5	0,2	0,1	0,3	0,1	67%
16	Como	mg/L	0,1	5,335	0,042	0,046	0,032	99%
17	Cadmio	mg/L	0,3	0,002	0,001	0,001	0,001	40%
18	Plomo	mg/L	0,6	0,018	0,018	0,013	0,012	31%

Fuente: Reporte base de datos Depto. Saneamiento EPSAS 2015.

Capítulo II

CUADRO 2-5: Resultados de análisis en laboratorio de los parámetros físicoquímicos y microbiológicos de la PTAR Puchukollo (Continuación)

N°	Parámetros	Unidad	Ley Medio Ambiente	Afluyente Planta	Efluente Serie II	Efluente Serie III	Efluente Planta	Eficiencia
19	Mercurio	mg/L	0,002	0,0022	0,001	0,0011	0,0013	41%
20	Arsénico	mg/L	1,0	0,016	0,007	0,009	0,007	58%
21	Sulfuros	mg/L	2,0	3,67	3,86	3,77	1,76	52%
22	Sólidos Sedimentables	mg/L	1,0	3,3	0,0	0,2	0,1	97%
23	Sólidos Totales	mg/L	-	1246	751	816	703	44%
24	Sólidos Disuelto Totales	mg/L	1500	831	696	717	644	23%
25	Oxígeno Disuelto	mg/L	>60%	0	2,8	3,3	2,9	-
26	Caudal	L/s	-	300	193	92	286	-
27	Carga Orgánica	KgDBO ₅ /día	-	21186	2124	2787	2955	86%

Fuente: Reporte base de datos Depto. Saneamiento EPSAS 2015.

Como se mencionó en párrafos anteriores, la PTAR Puchukollo trata aguas residuales de origen doméstico e industrial de la ciudad de El Alto con niveles de entrada en afluyente como: DBO₅ alrededor de 531 mg/LO₂, DQO de 1121mg/LO₂, Coliformes fecales de $(1,0 \cdot 10^8 \text{ NMP}/100 \text{ ml})^3$, Aceites y grasas 17 mg/l, Nitrógeno total de 32 mg/l, sulfuros de 3,67 mg/l entre otros significativamente.

Luego del proceso de tratamiento, el efluente presenta niveles mejoradas de DBO₅ de 72 mg/LO₂ (87% de remoción), DQO de 219 mg/LO₂ (80% de remoción), Coliformes fecales de $3,4 \cdot 10^5 \text{ NMP}/100 \text{ ml}$ (99,66% de remoción), Aceites y grasas de 2 mg/l (88% de remoción), Nitrógeno total de 25 mg/l (22% de remoción) y sulfuros de 1,76 mg/l (52% de remoción) con se aprecia en el Cuadro 2-4.

En el análisis del cuadro se mencionan, las cualidades de eficiencias presentada en el proceso de la PTAR Puchukollo de acuerdo al orden de magnitud corresponde a: Cromo con 99% de remoción, Coliformes fecales 98% de remoción, Sólidos sedimentables 97% de remoción, Fenoles 96% de remoción, DBO₅, con 87% de remoción y DQO con 80 % de remoción.

³ NMP/100ml: Número más probable en 100 mililitros.

Capítulo II

Mientras que las menores eficiencias se presentan para: Nitrógeno total, con 22% de remoción, Metales pesados como Mercurio, plomo con 41% y 31% de remoción respectivamente, excepto el cromo que reporta remoción alta, Sólidos disueltos totales, con 23% de remoción

De este análisis comparativo se puede concluir que en la PTAR Puchukollo predominan procesos principalmente físicos seguidos de biológicos. Físicos en la remoción de sólidos sedimentables, sólidos en suspensión, aceites y grasas, todos ellos por gravedad. Bioquímicos por la disminución en la DBO₅ y DQO a consecuencia de la actividad combinada de bacterias anaerobias y aerobias que ocurren en las primeras lagunas y los filtros percoladores.

En las tres lagunas siguientes adoptan un comportamiento facultativo con zonas superficiales, en ella existen bacterias aerobias y algas en una actividad simbiótica; zonas intermedias parcialmente entre aerobias y anaerobias donde la descomposición de residuos orgánicos es realizada por bacterias facultativas; y en las zonas anaerobias se descomponen los sólidos acumulados por acción de bacterias anaerobias.

Asimismo, de acuerdo a los límites establecidos en el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH), presente en la Ley 1333 de Medio Ambiente como se especifica en el Cuadro anterior, los Valores límites son admisibles de parámetros en cuerpos receptores (Efluente General).

La Calidad del efluente de la PTAR Puchukollo se encuentra ligeramente por encima de lo establecido como agua residual de clase C, principalmente en los parámetros DBO₅, DQO, sólidos suspendidos, nitrógeno, fósforo y Coliformes fecales.

Este último parámetro es limitante e importante para el reúso de estas aguas en riego agrícola, cuyo tratamiento se plantea como parte de la presente investigación, Pues la Planta PTAR Puchukollo, no cumple estrictamente con la ley de, Medio Ambiente.

CAPÍTULO III: DIAGNOSTICO DEL USO DE AGUAS RESIDUALES EN COMUNIDADES

3 IMPACTO DEL USO DE AGUAS RESIDUALES EN COMUNIDADES.

3.1 Consideraciones.

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR Puchukollo ha sido construida entre los años 1996 – 1998, en el dominio tripartito de las comunidades de Puchukollo Bajo, Huanokollo y Keluyo, para evacuar aguas residuales de la ciudad de El Alto. La empresa privada sueco-francés Aguas de Illimani S.A. (AISA) se hizo cargo de la gestión del proyecto, construcción y administración, el Gobierno Autónomo Municipal de El Alto es vigilante en el ámbito de su jurisdicción, en el desarrollo operacional y cumplimiento con los términos contractuales a la empresa concesionaria.

Desde el inicio de la obra los comunarios del lugar no estuvieron conformes, pese que recibieron un monto mínimo de dinero en dólares americanos como recompensa por los predios afectados; además ofertaron construir un sistema de agua potable y un sistema para riego agrícola con las aguas del efluente de la planta, (comentó don Alejandro Carvajal comunario de Huanokollo).

Con las protestas y convulsión social del 12 de enero 2005 en las ciudades de El Alto y de La Paz, tuvo que abandonar la empresa AISA la gestión y sus compromisos. Constituyéndose de esta manera la Empresa Pública Social del Agua y Saneamiento (EPSAS), donde todas las expectativas de los comunarios del lugar y otros fueron frustrados hasta la fecha. De ahí surge la idea de cómo solucionar esta problemática (investigación) sobre el reúso de aguas residuales de la PTAR Puchukollo para el riego agrícola.

Capítulo III

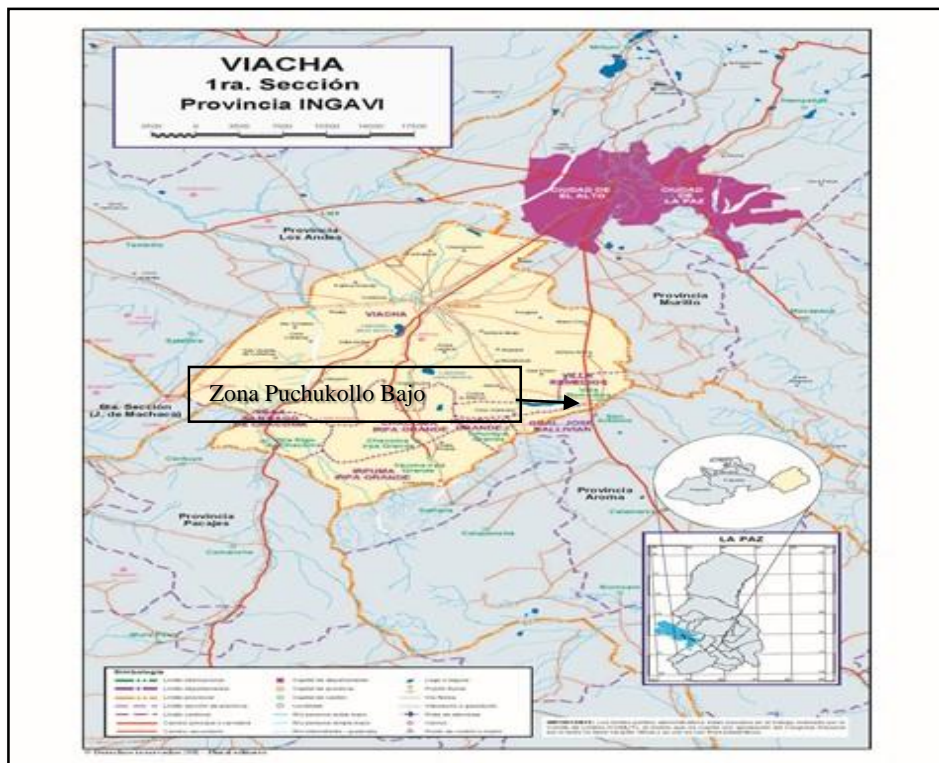
3.2 Metodología

La metodología aplicada en esta parte de la investigación, tiene un enfoque descriptivo considerando variables cualitativas y cuantitativas, también fue necesario el método de observación directa en el trabajo de campo.

Se recopiló información mediante encuestas y entrevistas realizadas a pobladores, varones y mujeres, en las comunidades ribereñas de los ríos: Seco, Pallina Catari y Bahía de Cohana, específicamente de las comunidades de Huanokollo, Keluyo, Chonchocoro, Mamani, Contorno y Quenacagua de los municipios de Viacha y Pucarani.

La encuesta se aplicó de manera aleatoria a un total de 15 personas y se levantó información necesaria en la investigación (Figura 3-1).

FIGURA 3-1: Ubicación de la zona de recopilación de información (encuestas).



Fuente: Elaboración con base información del (PDM) de Viacha.

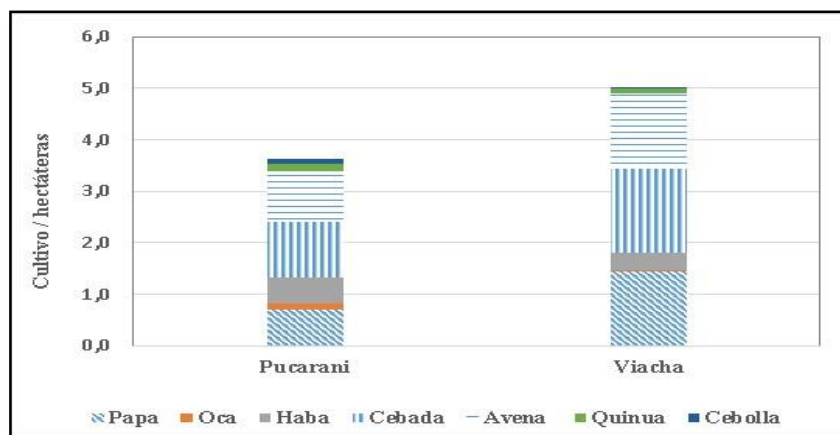
3.3 Actividad de producción agrícola

En la trayectoria de ha observado a los comunarios que viven aledaños a la PTAR Puchukollo, los comunarios ribereños de los municipios de Viacha y Pucarani se auto sustentan con la actividad agrícola y pecuaria, tiene pocas hectáreas de terreno para el cultivo y pastoreo

3.3.1 Especies sembradas en zonas aledañas a los ríos Seco, Pallina y Catari

Los agricultores de esta zona en su mayoría siembran papa. Adicionalmente siembran también cebada y avena como forraje para la producción lechera. Entre los cultivos que menos se producen están el haba, la oca y la quinua (Gráfico 3-1).

GRÁFICO 3-1: Cultivos sembrados en zonas aledañas a Río Seco, Pallina y Catari.

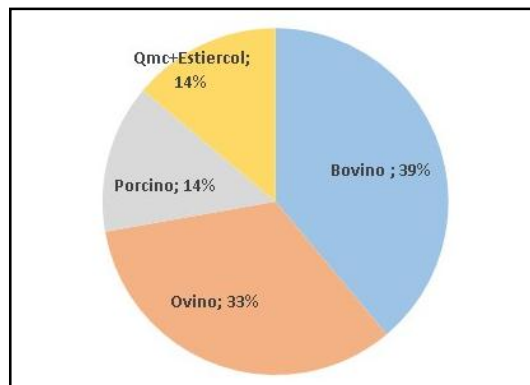


Fuente: Elaboración con base en datos de la encuesta y entrevista (véase anexo A1).

3.3.2 Uso de abonos y fertilizantes

La mayoría de los agricultores utilizan como fertilizante estiércol de su propio ganado. Pocos son los agricultores que utilizan fertilizantes químicos debido a que señalan que éstos dañan la capa del suelo y sus productos adquieren sabor agrio. Por esta razón, los fertilizantes químicos generalmente los utilizan en combinación con el estiércol. Ninguno de los agricultores entrevistados utiliza fertilizante químico puro (Gráfico 3-2).

GRÁFICO 3-2: Abonos y fertilizantes utilizados por los agricultores



Fuente: Elaboración con base en datos de la encuesta (véase anexo A2)

3.3.3 Uso de plaguicidas

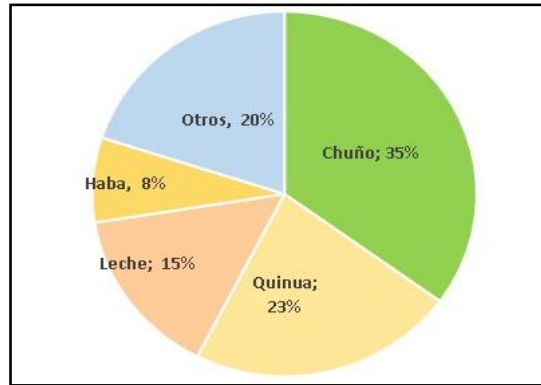
De los agricultores encuestados, sólo el 20% conocen y aplican plaguicidas en los cultivos de papa en etapas de crecimiento y floración utilizados principalmente para exterminar insectos. El resto de los agricultores no aplica ningún tipo de plaguicida.

3.3.4 Destino de la producción

Generalmente sólo el excedente de la producción de los cultivos es destinado para la venta. Así por ejemplo en el caso de la papa, una parte de la producción es comercializada en mercados locales, otra parte se destina para el procesamiento de chuño (papa deshidratada) y el restante para consumo de la familia del agricultor. En el caso de los cultivos que menos se producen, como haba, quinua, papaliza, oca y cañahua, todos son para autoconsumo (Gráfico 3-3). Los cultivos utilizados como forraje (cebada y avena) son destinados únicamente para alimento de ganado lechero.

La lechería en esta región se constituye como una actividad económica menor, que les permite comercializar leche y sub productos como queso para consumo humano, requesón y suero para alimento de ganado porcino que también aportan beneficios económicos a los comunarios.

GRÁFICO 3-3: Especies relevantes producidos por los comunarios.



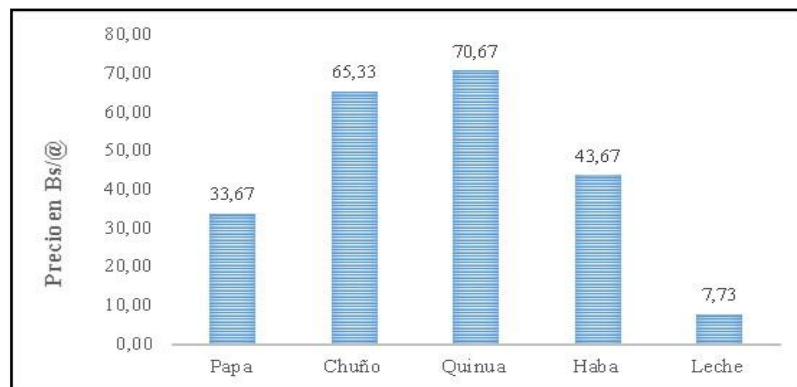
Fuente: Elaboración con base en datos de la encuesta (véase anexo A3)

3.3.5 Precios de venta de los productos

El valor de comercialización de los productos varía en función al tipo y calidad del producto. Así por ejemplo, el precio de venta de la quinua es de Bs 71 la arroba, del chuño Bs 65 la arroba.

Los precios más bajos corresponden a la papa y haba con Bs 34 y 44 la arroba; La leche es comercializada en ferias locales a un costo de Bs 6 a 8 en botellas de 2 litros según la demanda y oferta.

GRÁFICO 3-4: Precios de venta de los productos en ferias provinciales



Fuente: Elaboración con base en datos de encuesta y entrevista (véase anexo A4).

Capítulo III

Este producto también se vende a industrias procesadoras de productos lácteos como a empresas: PIL Andina, Delizia, SOALPRO y pequeñas plantas de Viacha y Batallas a razón de 3,50 Bs/litro (véase Gráfico 3-4).

3.4 Fuentes de agua

Los comunarios explican: captar agua y métodos de riego es tarea de los pobladores. Sin embargo la mayoría no cuentan con sistema de dotación de agua potable.

3.4.1 Procedencia de agua para riego

Los pobladores informan: el 65% no cuenta con sistemas de riego, practican la agricultura a secano o temporal de diciembre a marzo; el 13% dicen regar con agua de pozo acumulado en estanques elevados; otro similar 13% usa agua de manantiales para regar. Solamente 9% de la zona de influencia de la PTAR Puchukollo, afirman que usan aguas residuales para regar cultivos (Véase Gráfico 3-5).

GRÁFICO 3-5: Agua para riego en cultivos agrícolas.



Fuente: Elaboración con base en datos de entrevistas y encuesta (véase anexo A5)

3.4.2 Periodos de riego en los cultivos

El 72 % de los agricultores indican que los sembradíos se mantienen húmedos gracias a la época de lluvias que ocurre entre diciembre a marzo, 14% complementan el riego con pozos o manantiales con una frecuencia de 15 a 30 días, principalmente para las cebollas y otras hortalizas, como se muestra en el (Gráfico 3-6).

GRÁFICO 3-6: Periodo de riegos en los cultivos.

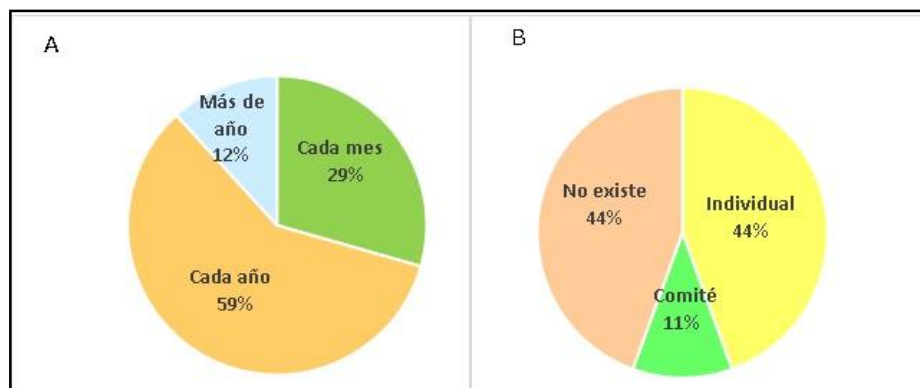


Fuente: Elaboración con base en datos de entrevistas y encuesta (véase anexo A6)

3.4.3 Mantenimiento, limpieza de pozos, acequias y organización comunal

El 59% de los agricultores, de manera organizada, limpian los pozos y algunas acequias cada año con ayuda de sus familias. El 12% manifiesta limpiar sus pozos más de una vez al año y el 29 % limpia mensualmente los canales y manantiales (Gráfico 3-7A). El 44% de los pobladores indican que no están afiliados a organizaciones productoras, esperan época de lluvias para el cultivo, asimismo el 44 % realizan la limpieza y mantenimiento de sus canales por familia. Sólo el 11 % dicen que existe comité de agua para abastecimiento domiciliario (Gráfico 3-7B)

GRÁFICO 3-7: A-Mantenimiento y limpieza de infraestructura de riego y B- Existencia de una organización comunal.



Fuente: Elaboración con base en datos de entrevistas y encuesta (véase anexo A7)

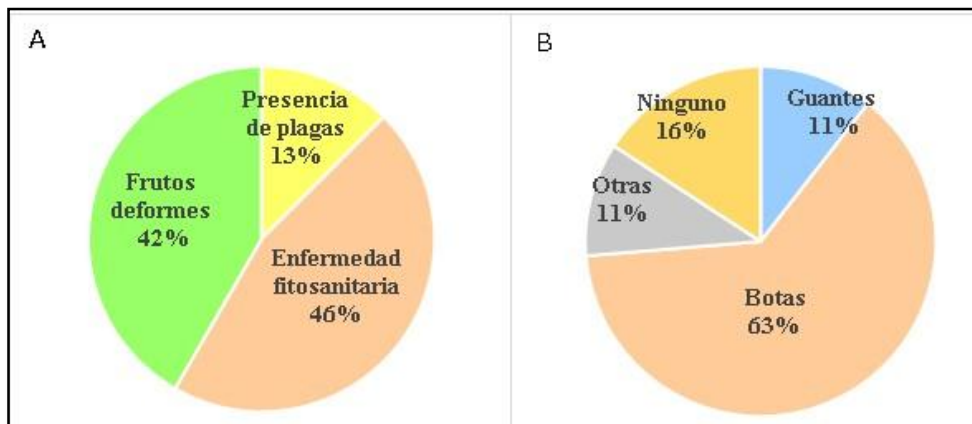
3.5 Efectos de aguas residuales, provenientes de la PTAR en cultivos y agricultores

Los agricultores entrevistados y aplicados en las encuestas, manifiestan que, si riegan con aguas residuales afectan el cultivo de alimentos, pastizales y forraje para animales.

El 46 % de los encuestados, relacionan a las aguas residuales causantes de enfermedades fitosanitarias que se presentan durante el crecimiento del cultivo agrícola, el 42 % menciona que los productos presentan malformaciones en los tubérculos, frutos en granos, en las vainas de las habas, otros 16% indican observación de moscas diminutas volando en el aire y larvas en los charcos de agua estancada (Gráfico 3-8A).

Respecto a las medidas de seguridad adoptadas por los agricultores, para salvaguardarse de las inundaciones con aguas residuales en épocas de lluvia: el 63 % de los entrevistados indican que usan botas de goma, el 11 % guantes, el 16% no utilizan ninguna protección y otros protectores el 11%. En el caso de los comunarios próximos a la PTAR Puchukollo, éstos señalan utilizar botas principalmente para cruzar el rio durante pastoreo de sus ganados (Gráfico 3-8B).

GRÁFICO 3-8: A-Efectos de sanidad en los cultivos. B-Use de indumentaria



Fuente: Elaboración con base en datos de encuesta(véase anexo A8).

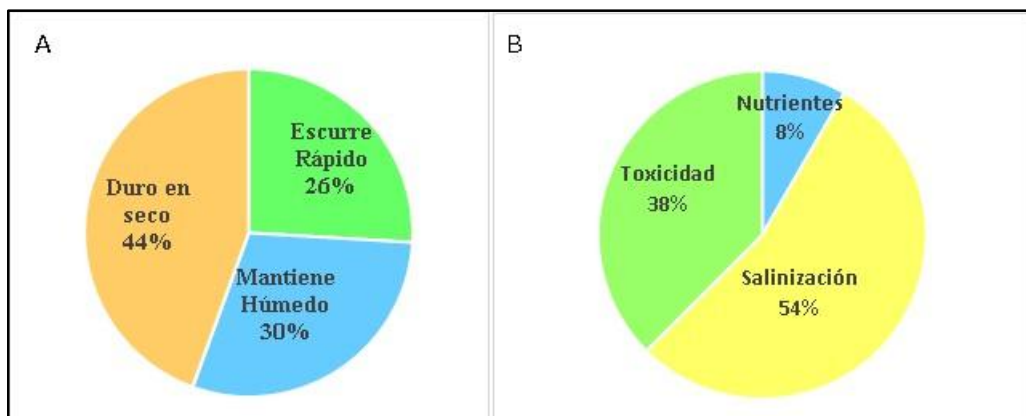
3.6 Efectos en suelos

3.6.1 Efectos de aguas residuales provenientes de la PTAR en suelos

Los agricultores indican que las aguas residuales dañan a suelos por el acarreado de elementos tóxicos y basuras. En épocas de lluvias las parcelas se inundan por el desborde del río. Luego de estos eventos, los suelos llegan a quedarse secos y duros, luego las aguas de lluvia escurre rápidamente y en pocos lugares se mantiene la humedad (Gráfico 3-9A)

Manifiestan que las aguas contaminadas cambia la estructura del suelo, se hacen salitrosos el 54%, son tóxicos por la presencia de residuos de origen industrial 38 %, se observa con claridad cuando secan los suelos. Señalan también que las aguas estancadas drenan lento y no se percibe que traigan beneficios en el rendimiento de los cultivos. Pocos agricultores manifiestan, que las aguas residuales podrían traer nutrientes y mejorar los suelos (Gráfico 3-9B).

GRÁFICO 3-9: A – Efectos físicos en los suelos, B – Efectos químicos en suelos.



Fuente: Elaboración con base en datos de entrevistas y encuesta (véase anexo A9).

3.7 Efecto de agua residual en la ganadería

En esta sección se describe sobre la problemática de agua para el consumo pecuario, pues siempre están propensos a beber el agua contaminada proveniente de la PTAR Puchukollo.

3.7.1 Consumo de agua en la crianza del ganado

Los problemas más recurrentes está en los ganados expuesto a las aguas residuales, indican que están relacionados con la reducción de la leche, la dermatofitosis, enfermedad caracterizada por la formación de escamas en la piel externa que ocasionan la caída de lana y pelo en el ganado ovino, la deformación de pezuñas y la presencia de parásitos intestinales, fiebre aftosa y otros

La mayoría de las personas entrevistadas informan y declaran que usan agua de pozo o atajados para consumo de sus ganados, El agua es extraída mediante motobombas o rondanas a sogas accionadas manualmente y dispuesta en bebederos de cemento. En la encuesta indican, el 34 % recolectan agua pluvial en atajados o Q'otañas, 41 % extraen agua de los pozos y el 24 % de los entrevistados aseveran que sus animales están expuestos al agua contaminada que fluye por el río (Gráfico 3-10).

GRÁFICO 3-10: Agua para consumo de ganado.



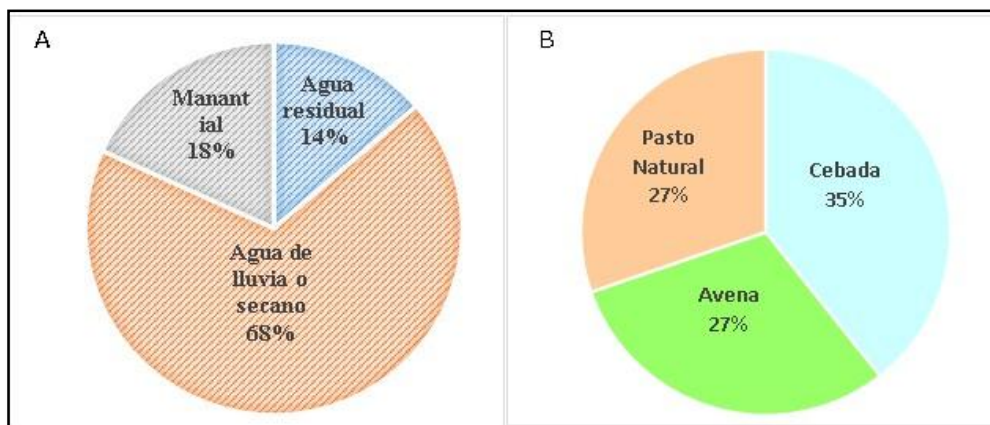
Fuente: Elaboración con base en datos de encuesta (véase anexo A10).

3.7.2 Agua para cultivo de forrajes y tipos de forrajes

El cultivo de los forrajes es temporal o secano generalmente se recoge en época de lluvias 68%, el 18% de los agricultores riegan con agua de manantial, caso los de cantón Quenacagua y Iquica. Sólo el 14 % de los agricultores próximos al PTAR Puchukollo riegan con agua residual (Gráfico 3-11A).

Los comunarios del lugar argumentan no es bueno alimentar al ganado con forrajes contaminados. Sin embargo en el trayecto se observó que desvían aguas residuales para regar forrajes: el 27% en cultivos de cebada, el 35 % en cultivos de avena o alfalfa, y el 27% en pastizales naturales del lugar (Gráfico 3-11B).

GRÁFICO 3-11: A.- Agua para cultivo y B.- Forrajes sembrado



Fuente: Elaboración con base en datos de encuesta (véase anexo A10).

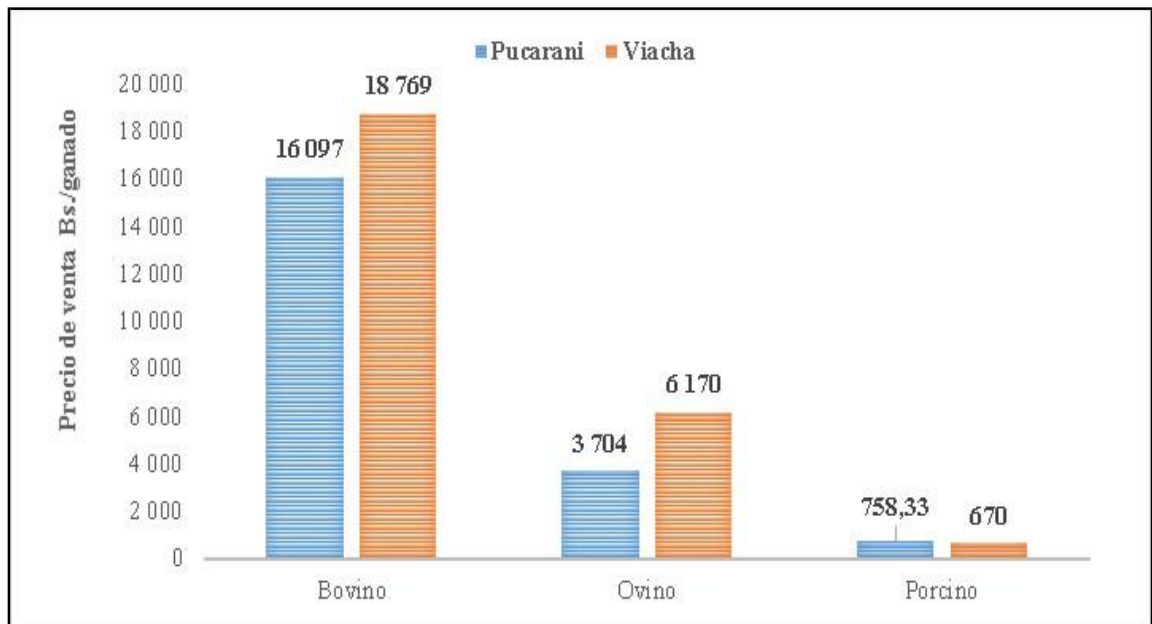
3.7.3 Producción pecuaria y sus beneficios

La producción pecuaria en la región contribuye a la generación de ingresos económicos para sus familias. El ganado bobino aumenta en peso de 180 a 200 kilogramos a 4 años en promedio, ideal para su venta a precio razonable; el ovino en peso de 18 a 20 Kg. a 2-3 años y porcinos en peso de 50 a 70 Kg.

Capítulo III

Otros animales de corral (aves) no es de impacto significativo en la economía familiar, la crianza de estos animales es para autoconsumo y para solventar algunos gastos menores, según indican los comunarios (Gráfico 3-12)

GRÁFICO 3-12: Precios de venta de ganados en municipios Pucarani y Viacha.



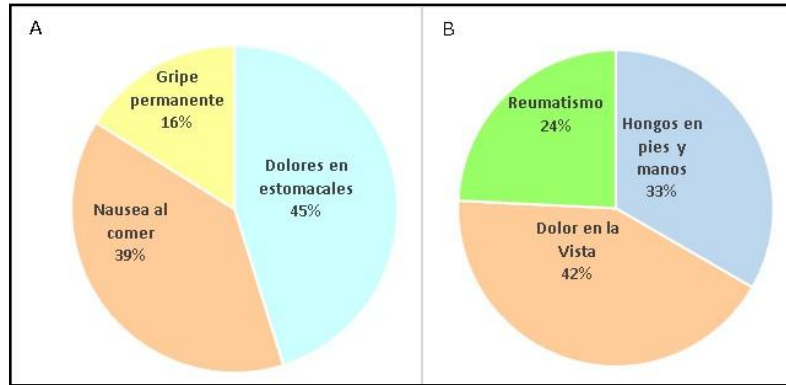
Fuente: Elaboración con base en entrevistas en ferias y encuesta (véase anexo A11).

3.8 Efectos en salud de los agricultores

Todos los entrevistados manifiestan que sus familias adolecen frecuentemente de enfermedades en épocas secas e invernales los meses de: abril, mayo, junio, julio y agosto; como gripe, diarreas crónicas, asma en los pulmones, náuseas al comer (Gráfico 3-13A).

Asimismo, señalan que las personas que eventualmente manipulan o cruzan aguas contaminadas del río presentan enfermedades reumáticas, hongos en los pies y dolores en la vista (Gráfico 3-13B).

GRÁFICO 3-13: A- Enfermedades en familias, B -Enfermedades en agricultores.



Fuente: Elaboración con base en datos entrevistas y encuesta (véase anexo A12).

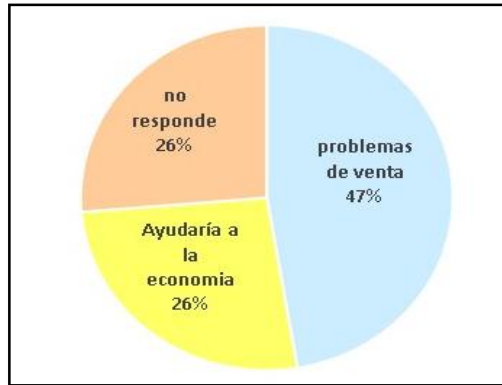
3.9 Efectos socioeconómicos

La mayoría de los entrevistados mencionan que no tienen problemas para vender sus productos agrícolas, pues no utilizan agua contaminada del río en esta parte del altiplano, dicen nosotros de ninguna manera nos beneficiamos, como en las comunidades de Valencia, Río Abajo, Huaricana, Mecapaca y otros usan aguas contaminadas para su riego.

Asimismo afirman que los consumidores de menos recursos económicos continúan comprando los productos como: zanahoria, lechuga, haba, choclos y otros hortalizas; a sabiendas del origen de los cultivos, tal como sucede con productos procedentes de las comunidades mencionados que utilizan aguas contaminadas del río Choqueyapu y sus riachuelos ríos abajo.

Consultados sobre la mejora en el reuso de aguas residuales en el riego y sus posibles beneficios indican: el 26 % no responde positivamente sobre el beneficio de aguas residuales, el 47 % aseveran que la venta de los productos regados con agua residual tendrían problemas y el 26% de los entrevistados indican que ayudaría a mejorar sus economías, (Gráfico 3-14).

GRÁFICO 3-14: Consulta sobre posible reúso del agua Residual



Fuente: Elaboración con base de datos de la encuesta (véase anexo A13).

3.10 Técnicas de uso seguro de las aguas residuales

En el trayecto de la zona encuestada, se ha observado que existen agricultores de las zonas aledañas al PTAR Puchukollo que desvían las aguas contaminadas del río con motobombas para sembradío de cebada o simplemente para regar bofedales.

Indican que estas aguas ayudan en el crecimiento de los pastos, pero no conocen las técnicas para el manejo de las aguas residuales. Frente a este hecho, manifiestan su necesidad de capacitarse en técnicas que les permita utilizar estas aguas de manera segura o sin mayor riesgo.

3.11 Análisis de la encuesta

Según la información recogida y procesada, en la zona de influencia de la PTAR Puchukollo los principales cultivos en orden de predominancia son la papa, haba, oca y otros productos menores del lugar. Entre los forrajes sembrados están principalmente la cebada y la avena para consumo animal. Asimismo, el fertilizante más utilizado para mejorar sus cultivos corresponde al estiércol de su mismo ganado.

Por lo tanto podemos concluir que:

Capítulo III

El excedente de los productos es destinado para la venta en las ferias provinciales y locales. Los sembradíos en su mayoría son a secano o regados con agua de lluvia. Sin embargo, de acuerdo a las encuestas se practica el riego con agua de pozos, manantiales y en mínima cantidad con agua residual proveniente del río.

Cada agricultor realiza las gestiones para regar sus parcelas, no existen organizaciones de regantes propiamente para tal objetivo.

Según los agricultores, el uso de las aguas residuales para riego afecta la productividad agrícola debido a que degrada los suelos. Adicionalmente, los animales expuestos a estas aguas tienen problemas en las pezuñas y en la piel, pueden contraer la enfermedad de dermatofitosis que promueve la caída de los pelos en el ganado ovino, y disminuyen su capacidad en la producción de leche.

Los entrevistados señalan que tanto los agricultores como sus familias están expuestos a los efectos de aguas residuales, presentan problemas de salud como dolores estomacales, reumatismo, dolencias en la vista y otros.

Finalmente, indican no percibir beneficios con aguas residuales provenientes de la TAR Puchukollo. Respecto a las expectativas sobre el mejoramiento de aguas residuales, argumentan que estarían dispuestos a colaborar y participar en el manejo de aguas residuales en el futuro y en mejorar su calidad de vida.

CAPÍTULO IV: FUNDAMENTACION TEÓRICA DEL USO DE AGUAS RESIDUALES

4 TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES PARA RIEGO.

4.1 Marco conceptual.

Las aguas residuales son aquellas cuyas características originales han sido modificadas por actividades humanas y que por su calidad requieren un tratamiento previo, antes de ser reusadas, vertidas a un cuerpo natural de agua (Mara, 2007).

Entre los objetivos centrales de la Agenda XXI sobre Medio Ambiente y Desarrollo se encuentra el relacionado a fomentar el uso racional de las aguas residuales para riego en agricultura, forestación y/o en acuicultura, ya que se considera una práctica que contribuye al desarrollo sustentable de los países. Actualmente a nivel mundial se estima que existen alrededor de 20 millones de hectáreas regadas con aguas residuales tratadas, crudas o mezcladas (Hamilton, *et al*, 2006).

En una remoción efectiva del agua residual para el riego, se necesita un tratamiento más allá del secundario convencional para la eliminación de compuestos tóxicos y excesos de materia orgánica o sólidos en suspensión, es entonces necesario recurrir a un tratamiento terciario específico. Las principales tecnologías utilizadas para esta etapa son biológicas o físico-químicas como: la adsorción, el intercambio iónico, la ósmosis inversa, la precipitación química y la filtración (Levine *et al*. 1991).

La generación de aguas residuales (AR) provenientes de las distintas actividades económicas, el avance tecnológico en tratamiento de aguas residuales y los problemas sociales generados por el déficit de agua para abastecer a las ciudades y para el riego agrícola, son elementos que posicionan al reúso del agua residual tratada como el nuevo paradigma del presente siglo.

4.2 Características generales de aguas residuales

La composición de agua residual es la combinación de sólidos y líquidos evacuados de: residencias, centros comerciales e instituciones, también de actividades industriales, agrícolas, aguas subterráneas y precipitaciones pluviales que se agregan en aguas residuales; conducidos por los alcantarillados, emisarios conducidos a un reactor. Para su descripción (Metcalf & Eddy, 2004) las clasifica por propiedades en:

CUADRO 4-1: Componentes Fisicoquímicos y Biológicos de aguas residuales

Característica	Variables	Procedencia
Propiedades físicas	Color	Aguas residuales (AR) domésticas e industriales desintegración natural de materiales orgánicos.
	Olor	AR en descomposición, vertimientos industriales.
	Sólidos	Aguas de suministro, AR doméstica e industriales, erosión del suelo, infiltraciones y conexiones incontroladas.
	Temperatura	AR domésticas e industriales.
Constituyentes Químicos orgánicos	Carbohidratos	AR comerciales e industriales
	Grasas y aceites	AR domésticas, comerciales e industriales.
	Pesticidas	Residuos agrícolas.
	Fenoles	Vertidos industriales.
	Proteínas	AR domésticas y comerciales.
	Agentes termo activos	AR domésticas e industriales.
	Otros	Desintegración natural de materias orgánicas.
Constituyentes Químicos inorgánicos	Alcalinidad	AR domésticas, agua de suministro, infiltraciones subterráneas.
	Cloruros	Agua de suministro, AR doméstica, infiltración subsuelo.
	Metales pesados	Vertimiento industrial, AR doméstica y residuo agrícola.
	Nitrógeno	AR domésticas y residuos agrícolas.
	pH	Vertimientos industriales.
	Fósforo	AR domésticas, industriales, esorrentía residual.
	Azufre	Aguas de suministro, residuales, domésticas e industria.
	Compuestos tóxicos	Vertidos industriales.
Constituyentes Biológicos	Animales	Cursos de agua y plantas de tratamiento.
	Plantas	Cursos de agua y plantas de tratamiento.
	Bacterias	AR domésticas y plantas de tratamiento.
	Coliformes	AR domésticas y plantas de tratamiento.
	Virus	AR domésticas.
Constituyentes gaseosos	Sulfuro de hidrógeno	Descomposición de AR domésticas.
	Metano	Descomposición de AR domésticas
	Oxígeno	Agua de suministro, infiltración de agua superficial.

Fuente: Elaborado con base en Metcalf & Eddy ingeniería de aguas residuales 1994.

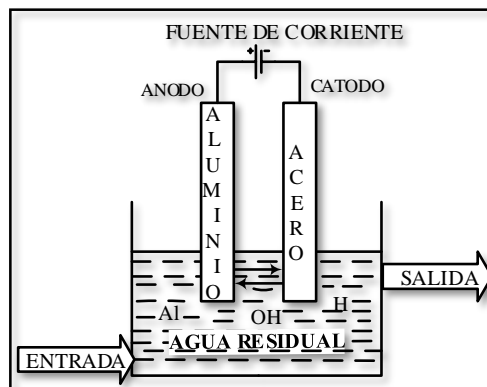
4.3 Alternativas en tratamiento de aguas residuales para reúso en riego

Para el uso seguro de las aguas residuales, después del tratamiento primario y secundario; existen varios procesos fisicoquímicos y biológicos que se han implementado en países desarrollados. Mediante la presente investigación se detallan alternativas para de remover componentes nocivos para el reúso en riego, de las cuales se indica:

4.3.1 Proceso de electrocoagulación, electro floculación e intercambio iónico

La electrocoagulación es una tecnología capaz de tratar cualquier líquido o gas sin importar cuál sea el contaminante, la tecnología disocia las moléculas contaminantes, libera los gases al medio ambiente sin ningún riesgo, los sólidos ligeros se transforman en natas y espumas y los más pesados se precipitan como lodos inertes. El efecto de radiación iónica producida por la actividad electromagnética de la luz afecta las moléculas ajenas al medio, disociándolas, modificando y alterando sus características contaminantes, como resultado es la neutralización (Rajeshwar e Ibáñez, 1997; Mollah et al., 2001; Souza, 2003)

FIGURA 4-1: Sistema de electro coagulación del agua residual.



Fuente: Ecosystem, 2002 aplicada en planta la Totora, Ayacucho Perú.

La floculación o electro floculación es un proceso electro químico que por el bombardeo de los electrones generados por la actividad electromagnética, se ioniza produciendo la separación de moléculas contaminantes mediante energía eléctrica de baja

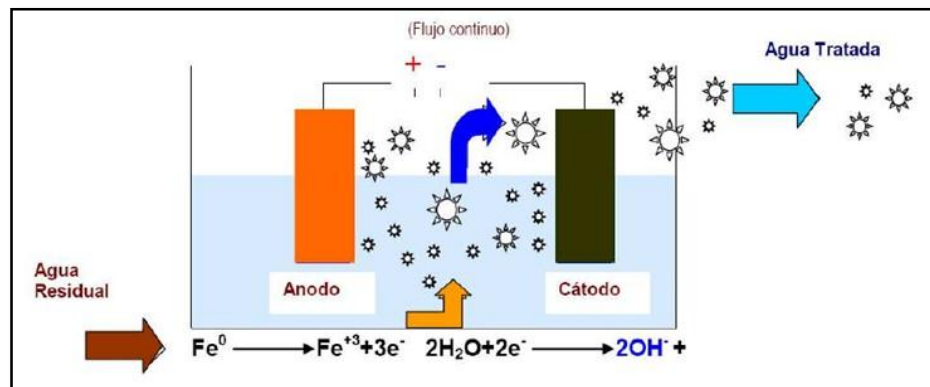
Capítulo IV

intensidad de corriente que sustrae los electrones de enlace de las moléculas ajenas al agua (Pletcher, 1991)

Es un tratamiento aplicable en afluentes de aguas residuales domésticas, municipales, industriales, lixiviados, hexaclorados, biotóxicos provenientes de hospitales, minas y otros. También es aplicable en purificar aguas de los pozos, lagunas, ríos, presas, manantiales y cualquier fuente de agua insegura, siempre que no sean radioactivas. (Patoczka et al, 1998).

Las aguas del efluente pueden ser vertidos al cuerpo de los ríos, para uso de riego agrícola, potabilización para consumo, para la industria y otras actividades humanas. Potabilización rápida se puede monitorear mediante un sistema de cómputo en forma remoto (Figura 4-2)

FIGURA 4-2: Sistema de electrofloculación del agua residual.



Fuente: <http://www.cepis.ops-oms.org/es> www/

El principio se fundamenta con las teorías de electroquímica; la teoría de disociación de Avante Arrhenius (1884) la teoría orbital de Schrödinger (1926), principio de incertidumbre de Heinsenberg y Niels Bohr (1927)

Capítulo IV

Este sistema remueve las partículas en (10–60) segundos, ocupa menor espacio de (50-60%), que las unidades biológicas y químicas. Son unidades compactas, fáciles de operar; cuyo rendimiento se muestra en el Cuadro 4-2.

CUADRO 4-2: Remoción de constituyentes de aguas residuales

Parámetros	Porcentaje de remoción (%)
DBO	>90
DQO	>90
Aceites y grasas	>95
Nitrógeno Total	>80
Fosforo Total	>70
Sólidos suspendidos	>95
Coliformes fecales	>99 (*)

Fuente: Ayers y Westcot, 1987

4.3.2 Procesos de Micro filtración, Nano filtración y Osmosis inversa

Estos sistemas modernos purifican aguas residuales. Son membranas asimétricas filtrantes semipermeables (Applegate, 1984); elimina sales, solidos suspendidos, son capaces de eliminar bacterias, proteínas, partículas, colorantes y otros constituyentes disueltas). Los procesos de filtración por sus características de poros y retención de partículas por tamaños microscópicas se describen en (Cuadro 4-3).

CUADRO 4-3: Proceso de separación por membranas más usadas.

Proceso de separación	Alimentación	Tamaño de partículas retenidas
Microfiltración	Líquida o gas	0,02-10 μm
Ultrafiltración	Líquida	100-1000Å
Nanofiltración	Líquida	10-100 Å
Ósmosis inversa	Líquida	1-10 Å

Fuente: <http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/>, Bailey *et al.* 1994

4.3.2.1 Proceso de Micro filtración (MF)

La Microfiltración como técnica de filtración por membrana permite retener partículas en el rango de 0,02-10 μm (Bailey *et al.* 1994), separa esencialmente partículas en suspensión que se colmatan sobre las membranas (Véase Figura 4-3).

Las características del sistema es considerado como: tratamiento tecnológico de punta, ocupa menor espacio físico y bajo riesgo para alcanzar agua tratada de calidad, costos razonables en operación y mantenimiento. Apto para funcionamiento en campamentos, comunidades aisladas y otros. Para su funcionamiento requiere operaciones unitarias. Este proceso consta de:

Tratamiento primario comienza con la recepción de agua cruda en la rejilla (1) luego fluye hacia la cámara que regula la carga hidráulica con sedimento y flotación de los sólidos (2). Desde la tercera cámara (3) el agua es bombeada hacia la planta de tratamiento por una bomba sumergible, adjunto esta la cámara (4) para almacenamiento de lodos, asimismo requiere aguas residuales con características restringidas.

- Recepción de agua residual afluyente con carga orgánica: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) de 300-350 mg/l Sólidos Suspendidos Totales (SST) de 350- 400 mg/l.
- Descarga agua tratada efluente de calidad: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) < 10 mg/l Sólidos Suspendidos Totales (SST) < 10 mg/turbiedad menor 1 Unidades Nefelometrías, < 1 UNT.

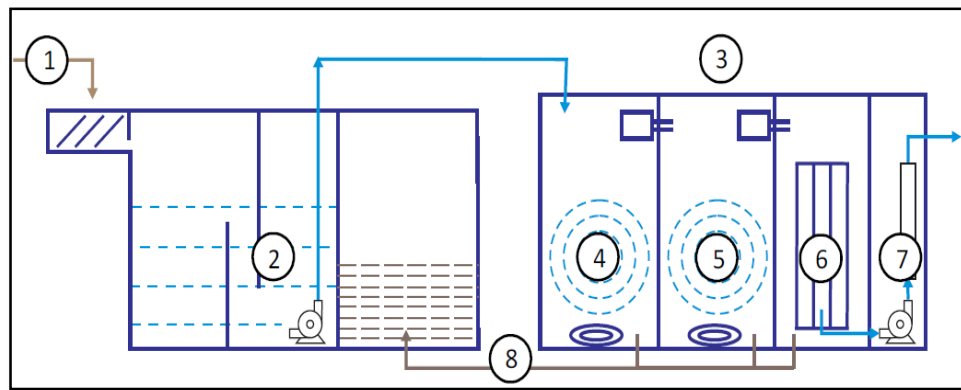
Tratamiento secundario está basada en combinación de tecnologías, Reactores de Lecho Móvil (MBBR) y Micro Filtración por vacío (VMF) (4 y 5) llenados con el biomedio para incrementar la superficie activa, una cámara de micro filtración (6), el bioreactor (4) actúa como un reactor agitador para controlar los picos de carga y remueve mayor cantidad de DBO. El reactor (6) es de pulido, diseñado para evacuar agua efluente tratada de calidad.

Capítulo IV

En los bioreactores de material orgánico es oxidado con la ayuda de las bacterias aerobias convirtiendo en agua (H_2O) y dióxido de carbono (CO_2); el oxígeno requerido para llevar la oxidación es inyectado por los sopladores al sistema de distribución de aire de burbujas ubicado en el fondo de los tanques, asimismo el aire mantiene el biomedio y la biomasa condicionada es mezclada por el movimiento circular como medio de transporte.

En la cámara (6) los sólidos suspendidos son separados por succión al vacío por medio de una membrana con poros de 0,1 a 0,2 micrones, luego el agua tratada pasa hacia el sistema de desinfección Ultravioleta UV (7) Finalmente el efluente es conducido a un reservorio (tanque) para ser reutilizado como agua de buena calidad. Los lodos (8) son enviados automáticamente a la cámara de recepción y descargado a un lecho del secado de lodos.

FIGURA 4-3: Estructura del sistema “Ultra Filtración” Estándar (200 m³/día)



Fuente: www.lenntech.com.España, 2015

Como se puede observar, en este esquema la secuencia del proceso es:

1. Entrada de Agua Residual Cruda.
2. Tanque de Recepción (primario).
3. Tanque de lodos.
4. Primer Bio-Reactor tipo MBBR Agitador.

5. Segundo Bio-reactor tipo MBBR pulido.
6. Cámara de Micro Filtración.
7. Sistema de Desinfección luz UV.
8. Drenado automático de lodo.

4.3.2.2 Proceso de Nano Filtración (NF)

La nano filtración es una tecnología más avanzada que surge poco antes de la tecnología de osmosis inversa, su aplicación es reciente consiste en la separación de contaminantes de tamaño molecular de las aguas residuales, el propósito es remover los cationes polivalentes, precursores de sub-productos de materia orgánica, nitratos, herbicidas y metales como trivalente, cromo hexavalente, plomo, etc. Las membranas de nano filtración tienen un tamaño de poros más eficientes en orden de 10 angstrom (Elmaleh y Abdelmoumni, 1997) como se aprecia en la Figura 4-4.

FIGURA 4-4: Sistema de filtros en Nano filtración para purificar agua residual



Fuente: <http://www.cepis.ops-oms.org/eswww>, Unutek 2015

4.3.2.3 Proceso de Ósmosis Inversa

Es un sistema de membranas que opera por medio de la presión ejercida, del solvente (agua) de una solución, se transfiere a través de una membrana densa el agua

Capítulo IV

residual y se retiene sales, iones, bacterias, virus y otros solutos de bajo peso molecular; obteniéndose de esta manera agua pura y esterilizada.

La geometría de los filtros varían: son planas con separadores, tubulares y membranas envueltos en forma espiral que son los más comunes, también existen membranas orgánicas, cerámicas inorgánicas y mixtas (Israel New Tech, 2010).

En esta alternativa para mejora de agua residual, la ecuación que sustenta la velocidad de flujo está dada por el análisis de Darcy y Reynold (1856) que considera flujo laminar, indicando que el flujo de permeabilidad (J) es directamente proporcional a la variación de la presión aplicada (ΔP) e inversamente proporcional a la viscosidad (μ) y al grosor de la cama (L) como se indica.

$$J \propto \frac{\Delta P}{\mu L}$$

Entonces: $J = \frac{K\Delta P}{\mu L}$

Sí $R = \frac{L}{K}$ y $\Delta P = P - \sigma\Delta\pi$

Siendo $\sigma\Delta\pi$ la presión osmótica del medio que fluye el solvente.

Luego: $J = \frac{P - \sigma\Delta\pi}{\mu R}$

Donde:

J = Densidad de flujo permeado del solvente [l/h]

K = Constante específica de la membrana [m^2]

μ = Viscosidad dinámica [Kg/l-h]

ΔP = Diferencia potencial osmótica [Kg/l-s²]

L = Espesor de capa activa [m]

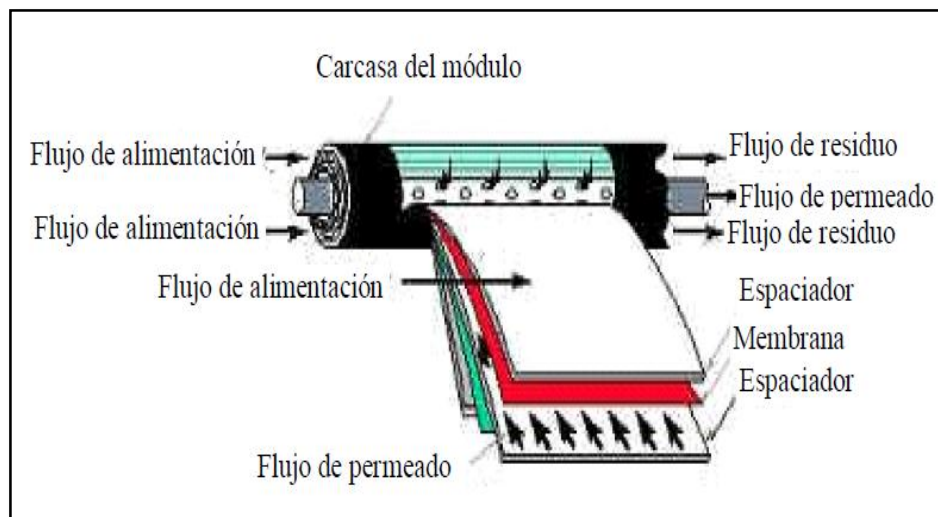
En este método de osmosis inversa, con geometría en espiral con sus membranas combinadas con espaciadores características, el agua residual es alimentada previo pre

Capítulo IV

tratamiento, entonces siendo (J) el flujo de permeabilidad laminar, el agua residual de alimentación es transversal al condicionamiento de las membranas micro porosas.

Las sustancias coloidales, sólidos suspendidos de menor tamaño, iones metálicos, los microorganismos y virus se quedan en la entrada del agua residual o adherida en las membranas. La presión osmótica es ejercida por la misma densidad del agua residual y el líquido permeado sale por otro extremo del tubo espiral, luego el agua tratada pasa a desinfección para el uso humano como se muestra en el Figura 4-5.

FIGURA 4-5: Módulo de láminas en espiral en Osmosis Inversa.



Fuente: [http://www. Pure Aqua, Inc.](http://www.PureAqua.com) All Rights Reserved.2012.

4.3.3 Proceso de Humedales artificiales

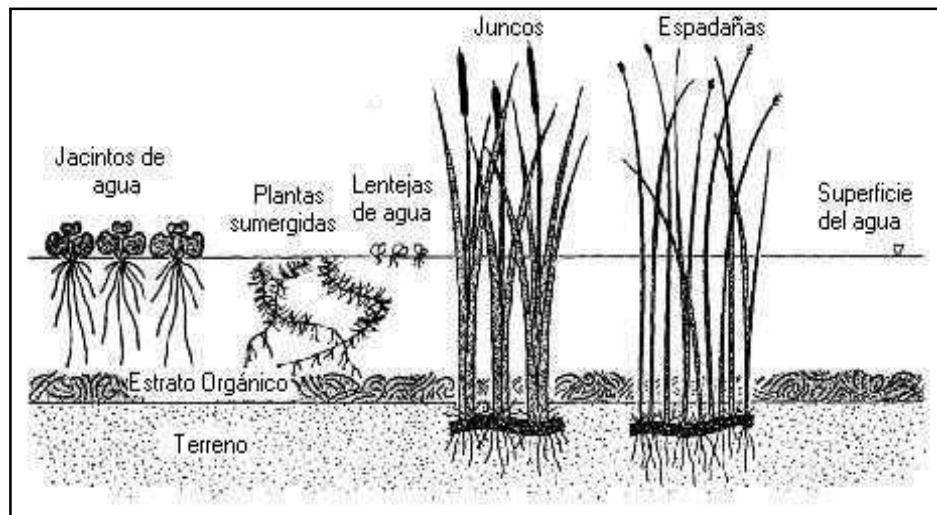
Los humedales artificiales son construidos por el hombre en áreas de extensión moderada, tienen una función fundamental en el tratamiento de aguas residuales, son sistemas cuasi-naturales de tratamiento; la remoción es realizada por una serie de procesos físico-químicos y biológicos que ocurren simultáneamente, los cuales se efectúan en un ambiente natural como sedimentación, la adsorción a las partículas del suelo, la asimilación por las plantas y la transformación microbiana.

Capítulo IV

Asimismo, por la filtración se remueve la materia particulada, se reduce los nitratos en nitrógeno, el fósforo es asimilado para el crecimiento de las plantas y los metales pesados adsorbidos por ionización y el número de patógenos es reducido por muerte natural por efecto de la luz ultravioleta (Gersberg et al, 1989).

Para la depuración de aguas residuales existen dos tipos de humedales artificiales: el humedal de flujo superficial y el de flujo subsuperficial. En el humedal de flujo superficial el agua residual circula a través de los tallos en las plantas y está expuesta directamente a la atmosfera, es recomendable para la adaptación de especies de peces, anfibios, aves, etc.; (Lara, 1999), Figura4-6.

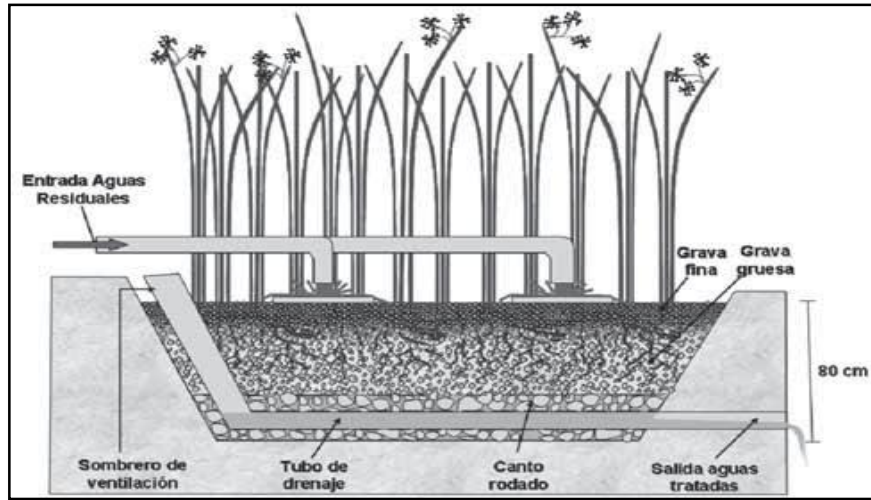
FIGURA 4-6: Humedal de flujo superficial expuesta a la atmósfera.



Fuente: Metcalf & Eddy 2004

Según (Brix y Kolb, 1998), en humedales artificiales de flujo Subsuperficial, se aplican en aguas residuales tratadas en forma continua y con recirculación con cama de tierra o arena y grava, plantando macrófitos acuáticas. Toda la cama está cubierta por una membrana impermeable para evitar filtraciones en el suelo con los contaminantes como se muestra en el (Figura 4-7)

FIGURA 4-7: Humedal Subsuperficial de flujo vertical.



Fuente: Metcalf & Eddy 2004

Según Sánchez (2005). Los humedales artificiales para el escurrimiento, sugiere las ecuaciones básicas para determinar el caudal de agua residual, área y tiempo de escurrimiento, obteniendo la expresión:

$$Q = \frac{Qe + Qa}{2}$$

Dónde: Q = Caudal medio del humedal en [m³/día]

Qa = Caudal del afluente [m³/día]

Qe = Caudal del efluente [m³/día]

Determinación del área superficial está dada por la ecuación.

$$As = \frac{Q(\ln(\text{DBO})a - \ln(\text{DBO})e)}{Kt * y * n}$$

$$Kt = K_{20} (1,06)^{T_a - 20}$$

$$K_{20} = 1,2404 \text{ d}^{-1}$$

Dónde: K_{20} = Constante de temperatura [d⁻¹]

As = área superficial [m²]

$\ln(\text{DBO}) a$ = Concentración del contaminante al ingreso (afluente mg/l)

Capítulo IV

L_n (DBO) e = Concentración del contaminante de salida (efluente mg/l)

K_t = Constante de temperatura en el humedal [°C]

y = Profundidad del humedal [m]

n = Porosidad las capas filtrantes volumen disponible sobre volumen total en [%]

La retención hidráulica para alcanzar los niveles de contaminación aceptable para descarga se basa en la relación:

$$TRH = \frac{As * y * n}{Q}$$

Donde: TRH = Tiempo de retención hidráulica en días

La ecuación que determina la relación largo y ancho del humedal es:

$$W = \frac{1}{y} \sqrt{\frac{Q * As}{m * Ks}}$$

Donde: W = Ancho del humedal [m]

Q = Caudal/ N° de unidades [m³/día]

m = Pendiente del lecho en %

Ks = Conductividad hidráulica [m³/d²]

As = Área superficial/ N° de unidad [m²].

4.3.4 Proceso aplicando Lagunas de Estabilización

Según Matsushita, 1972; una laguna de estabilización consiste en un sistema de proceso biológico para tratamiento de aguas residuales que se caracteriza por su simplicidad, eficiencia y bajo costo.

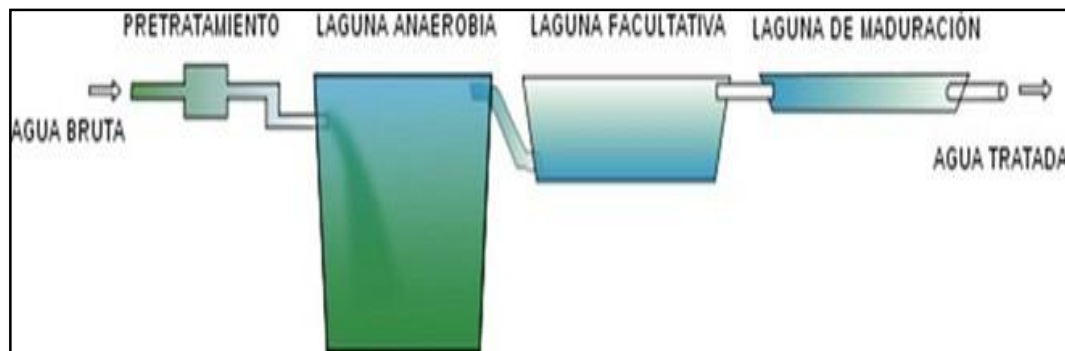
Las lagunas de estabilización son estanques artificiales poco profundos de 4 o 5 metros, cuyo fin es la depuración biológica de aguas residuales del afluente por medio de retención hidráulica durante varios días, lo cual permite el desarrollo natural del ecosistema. La degradación de la materia orgánica es desarrollada por mecanismos bioquímicos como la oxidación bacteriana, la fotosíntesis de las algas y otras actividades químicas (Mara y Pearson, 1998).

Capítulo IV

Estos sistemas de lagunaje se clasifican en: anaerobias, facultativas, maduración y aerobias o de pulimento como se describía en el capítulo anterior; diagnóstico PTAR Puchukollo. Asimismo indica que en lagunas primarias, reciben agua residual cruda directamente del emisario o pretratamiento, las lagunas secundarias reciben aguas residuales que ha sido sometido a tratamiento primario y las de pulimento o afinado que mejora el efluente para su reúso.

El sistema de tratamiento del agua residual en Lagunas de Estabilización opera en su generalidad siguiendo el esquema que se muestra en el (Figura 4-8).

FIGURA 4-8: Esquema de tratamiento de agua residual en lagunas



Fuente: Escuela Colombiana de Ingeniería. 1994

Considerando que el flujo hidráulico en una laguna de estabilización no es más que un reservorio, en la cual se proporciona masa de agua, con cierta materia orgánica con tiempo suficiente de retención para que sea estabilizada.

El caudal agua tratada que abandona en cada laguna estará sujeta a diversas fuentes de ingreso: el agua retenida o caudal del afluente, más de las precipitaciones pluviales menos las aguas que se evaporan por la acción del sol. La salida neta (Q_e), se puede estimar con la ecuación indicada:

$$Q_e = (Q_0 + Q_p) - Q_{ev}$$

Dónde: Q_e = Caudal del efluente o salida [$m^3/día$]

Capítulo IV

Q_0 = Caudal del afluente o de entrada [$m^3/día$]

Q_p = Caudal de precipitación atmosférica [l/h]

Q_{ev} = Caudal de evaporación por acción solar [l/día]

De acuerdo a las características geométricas de lagunas, el flujo de aguas residuales puede ser: tipo pistón cuando la relación longitud y ancho es mayor a 4:1, existe cortocircuitos o zonas muertas, el perfil de flujo es laminar.

Cuando la mezcla es completa no existen zonas muertas ni corto circuitos, la carga orgánica se distribuye uniforme. Un flujo de tipo disperso es cuando están entre los dos extremos citados, la carga orgánica se distribuye con diferentes velocidades en una dirección, también se considera la dirección de vientos, temperatura, su relación geométrica largo, ancho menor a 2:1, no existen zonas muertas.

Para un flujo laminar del fluido y de mezcla dispersa, homogénea; se aplica el modelo matemático según la ley de Fick, la variación de la concentración respecto a variación del tiempo dada por la ecuación:

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} = D \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} - \mu \frac{\partial C}{\partial X}$$

En función de las variables adimensionales la ecuación queda como:

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} = \left(\frac{D}{vL} \right) \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} - \frac{\partial C}{\partial X}$$

Donde:

C = Concentración de la materia orgánica e inorgánica [$Kg/m^3.h$]

L = Longitud del reactor o laguna [m]

D = Coeficiente de dispersión [m^2/s]; sí: $d = (D/vL)$ es adimensional

X = Longitud adimensional (X/L)

v = Velocidad media [m/s]

θ = Tiempo adimensional (t/m)

Capítulo IV

Con base a la ecuación de Fick, los investigadores determinaron valores reales de los parámetros por diferentes métodos así por ejemplo Thirumurthi (1969) asumiendo una cinética de primer orden, ha calculado la remoción de materia orgánica empleando la solución estacionaria de Wehner-Wilhen como:

$$\frac{S_e}{S_a} = \frac{4 * a * e^{\frac{1}{2d}}}{(1 + a)^2 * e^{\frac{1}{2d}} - (1 - a)^2 * e^{\frac{1}{2d}}}$$

$$\text{Siendo: } a = \sqrt{1 + 4 * K * \theta * d}$$

Dónde: S_a = Concentración de DBO_5 en el afluente [Kg/m^3]

S_e = Concentración de DBO_5 en el efluente [Kg/m^3]

K = Constante cinética del decaimiento de primer orden [l/día]

d = Número de dispersión [D/vl]

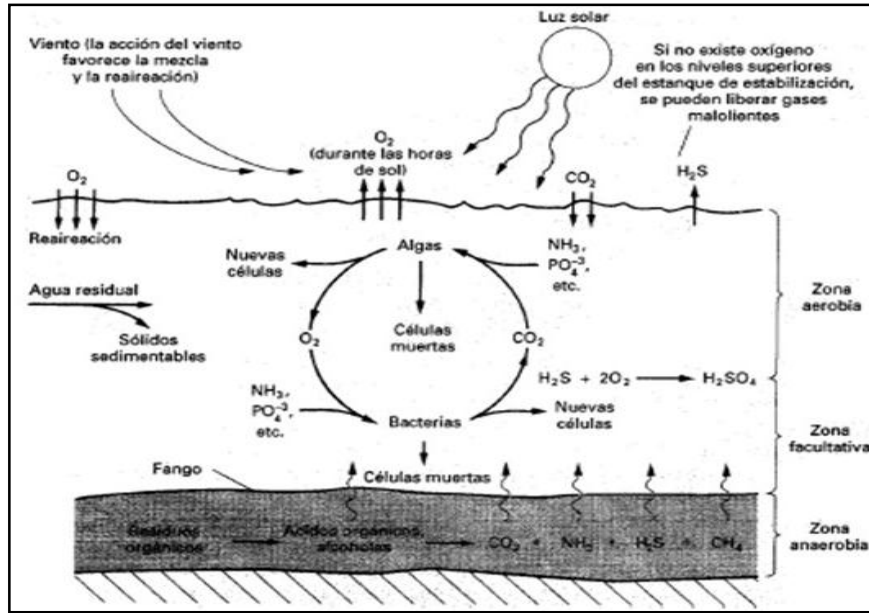
θ = Tiempo de retención hidráulica [h]

En lagunas de estabilización para procesos bioquímicos, Metcalf y Eddy. 2004, describe que en lagunas anaerobias de profundidad de 4 a 5 metros, se descomponen las materias orgánicas, donde en el fondo de lagunas se precipitan las cargas orgánicas por su densidad formando lodos y generando gases observable en la superficie de las aguas en forma de burbujas.

En lagunas facultativas y maduración, se efectúa la transformación simbiótica de algas y bacterias, las materias orgánicas disueltas se transforman en nuevos compuestos también orgánicos, como células vivas unicelulares, protozoarios donde se desarrollan y mueren espontáneamente por acción de los fenómenos naturales (Véase Figura 4-9).

En estas lagunas el comportamiento fisicoquímico y biológico de las aguas residuales es bastante compleja, no se puede describir con un modelo matemático simple, para el control se podrá simular con un ordenador.

FIGURA 4-9: Fenómenos físicos, químicos, y biológicos en laguna facultativa.



Fuente: Metcalf & Eddy 2004

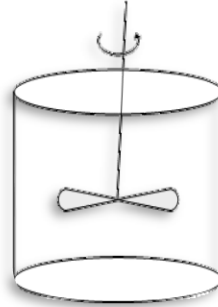
4.3.5 Procesos en Sistemas de estanques de pulimento estacionario

Es un sistema propuesto en esta investigación para mejorar el agua residual, bastante económico en su construcción, su operación, no requiere personal especializado para su mantenimiento, además el efluente de salida es reusado para el sistema de riego agrícola.

Esta técnica simple, consiste en la construcción de un sistema de estanques de ecuilización con retención estacionario, la mezcla de agua residual del efluente y aguas claras del drenaje del sub suelo de la misma PTAR es agitada y considerado está como tercer tratamiento; la mezcla es retenida durante el tiempo de 5 a 7 días o más tiempo según su capacidad volumétrica para el pulimento y uso para riego.

El tipo de reactor es batch discontinua, tanque agitado manualmente que se implementa en esta investigación. En estanques de mayor capacidad en volumen el agitado puede ser mecánica o automatizado según la necesidad, (Véase Figura 4-10)

FIGURA 4-10: Mezcla de aguas residuales y claras del drenaje en reservorio



Fuente: Elaboración con base a conceptos bibliográficos.

4.4 Criterios para selección de alternativas en procesos de agua residual del efluente de la PTAR Puchukollo

Para la selección de la alternativa eficiente y con el propósito en mejorar la calidad de agua residual para reúso en riego agrícola, se construye una matriz con características cualitativas de los procesos citados en este capítulo y considerando los criterios factibles para su implementación.

Los criterios tomados son: la Inversión Económica Financiera, Costo de la Infraestructura, Costo de la Tecnología e Insumos, Eficiencia del sistema, Contratación del personal calificada y no calificada para su operación, mantenimiento con menor costo posible en renovación de equipos, compra de insumos y otros. Parámetros de calidad significativos que se puedan adecuarse a nuestro medio, Cuadro 4- 4.

CUADRO 4-4: Matriz comparativo en tratamiento de aguas residuales de riego

Procesos	Inversión	Eficiencia	Tecnología Insumos	Operación mantenimiento
Micro, Nano filtración y Osmosis inversa	Alta	Alto	Alta	Medio Alta
Electro floculación y electrocoagulación	Alta	Alta	Medio	Medio Alta
Humedales artificiales	Medio bajo	Medio	Medio	Bajo
Lagunas de Estabilización	Medio	Medio bajo	Medio bajo	Bajo
Sistema de estanques de retención estacionaria.	Baja	Medio bajo	Medio bajo	Bajo

Fuente: Elaboración con base a información bibliográfica cualitativa de los procesos.

4.5 Análisis de la matriz cualitativa en eficiencia y costo

De acuerdo a la matriz cualitativa que se presenta en el cuadro anterior y sintetizando las consideraciones cualitativas en las anteriores secciones analizadas sobre tratamiento de aguas residuales, implementadas en países desarrollados; de estas alternativas se elige las que ofrecen más bondades en la implementación, como se puntualiza a continuación:

4.5.1 Procesos de Micro filtración, nano filtración y la osmosis Inversa

Estas tres tecnologías sofisticadas alternativamente son similares, se diferencian por su grado de remoción de contaminantes; el micro filtración requiere menor costo en su implementación, los efluentes vertidos son aguas de tipo A o B recomendable para riego de hortalizas. La osmosis inversa es de alta tecnología y eficiencia se requiere de personal capacitado para operación, implementación y mantenimiento de costo elevado.

4.5.2 Procesos de Electro floculación y electrocoagulación

Al igual que la alternativa anteriormente citada ocupa menor espacio, el costo de inversión es alta en el aprovisionamiento de energía eléctrica, alta eficiencia remueve los metales pesados, elimina los microorganismos, operación y mantenimiento se justifica por su costo medio.

4.5.3 Procesos con Humedales artificiales

El costo de inversión es medio bajo en función del diseño, eficiencia media remueve los contaminantes en mayor lapso de tiempo, en la operación del sistema no requiere personal con alta capacitación, pero requiere de extensión superficial para el efluente en escurrimiento.

4.5.4 Procesos aplicando Lagunas de Estabilización

Se necesita de extensión de terreno considerable para construir lagunas para estabilizar agua residual, se remueve al menos en un mes los contaminantes eficientemente, una vez construida tiene una vida útil entre 15 a 20 años, no necesita personal capacitado para la operación, puesto que no es dificultoso el trabajo.

4.5.5 Procesos en Sistema de estanques de pulimento estacionario

Esta alternativa es económica, fácil de implementar, el mantenimiento de este Sistema de Estanque de pulimento con Retención Estacionaria es de menor costo, los repuestos de insumos se encuentra en el mercado común; la operación esta encomendado a personal no calificado.

El agua residual retenido en reservorios ayuda el proceso bioquímico natural, asimismo la contribución de los rayos solares favorece la eliminación de microorganismos por efecto de radiación ultra violeta UV, el cual mejora la calidad de agua.

Como resultado del análisis de la matriz comparativa de los procesos alternativos para mejorar las aguas residuales, se puede considerar la opción de Estanques de Pulimento con Retención Estacionaria para la mejora de la calidad de agua residual del efluente de la PTAR Puchukollo para riego agrícola.

El método es económico, de fácil implementación; menor costo, no necesita mayor inversión para captar aguas residuales, se puede adecuarse como modelo en las comunidades agrupadas en familias para abastecerse de agua para el riego.

Los comunarios agricultores pueden construir en menor tiempo este sistema, con mínimo asesoramiento y capacitación en el manejo de este sistema de riego utilizando agua residual a su alcance.

CAPÍTULO V: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE ESTANQUES CON PULIMENTO ESTACIONARIO

5 IMPLEMENTACION DE ESTANQUES DE PULIMENTO ESTACIONARIO

5.1 Consideraciones generales

En la actualidad, no han sido suficientemente descritos los factores que afectan la muerte de bacterias en lagunas de pulimento. La mayoría de estas unidades se diseñan con métodos empíricos y semi-empíricos a partir de fórmulas desarrolladas para las lagunas facultativas. Sin embargo, algunos de los estudios reportados revelan que la muerte de estos microorganismos depende principalmente de parámetros ambientales y climatológicos. Los parámetros que han sido supuestos los que interfieren la estabilización son:

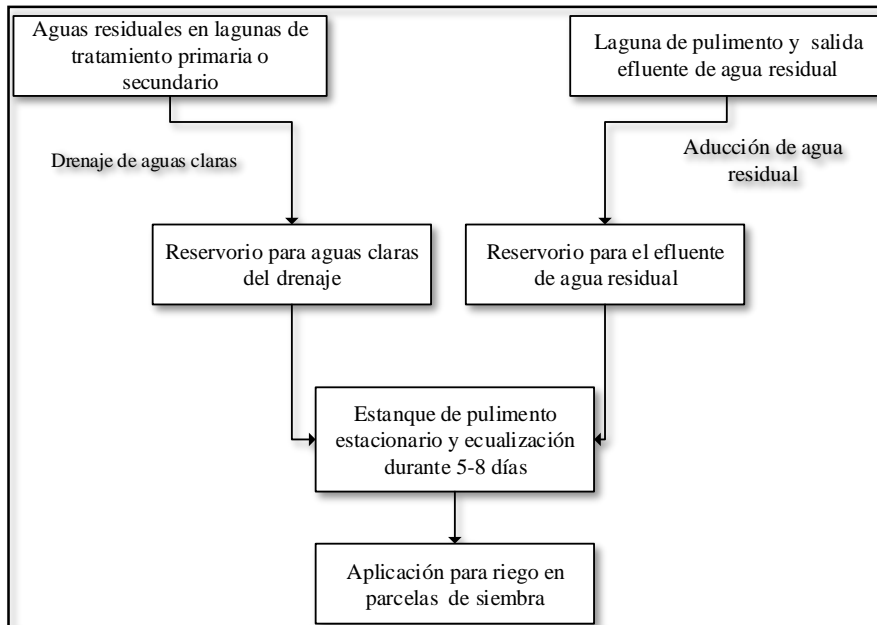
- El pH alto (Parhad y Rao).
- La producción de compuestos tóxicos producidos por las algas (Davis y Gloyna).
- El agotamiento de los nutrientes (McGarry et al.).
- La intensidad de exposición al sol luz UV y duración (Kapuscinski et al; Moller et al.).
- La temperatura.
- La carga orgánica
- El tiempo de retención hidráulica.
- La profundidad del agua.

Entre las consideraciones de varios estudios realizados por los expertos de los factores citados, se ha logrado determinar que las lagunas de pulimento estacionario deben tener una profundidad de 0,9 a 1,5 m, el tiempo de retención que dependerá de la eficiencia requerida en la remoción de patógenos y la prueba a los Coliformes fecales como indicadores, aunque hay modelos que incluyen la remoción de huevos de helmintos.

El sistema de Estanque de Pulimento Estacionario propuesto, considera las fundamentaciones teóricas en el campo fisicoquímico y biológico. Es una alternativa de tratamiento avanzado que mejora aguas residuales del efluente; además utiliza aguas claras de drenaje de los subsuelos provenientes de lagunas primarios o secundarios del mismo sistema, que confluyen por gravedad a una canaleta y conducidos a un reservorio y aduccionado al estanque de pulimento para su posteriormente para reuso en riego.

Asimismo con la técnica se obtiene agua de clase B, aceptable para riego agrícola según recomiendan las normas internacionales como la FAO, OPS y OMS. Por lo tanto este método al reducir la carga orgánica y otros influyentes del agua residual por dilución y retención estacionaria, tiene las siguientes etapas en el proceso en depuración y uso.

FIGURA 5-1: Flujo secuencial lógica de agua abajo para riego.



Fuente: Elaboración con base en investigación y diseño.

5.2 Planteamiento teórico para el diseño de estanques estacionarios

En el estudio del prototipo de lagunas de pulimento estacionario y de estabilización diluido es necesario tener claro el concepto y definición de disolución. Una disolución es una mezcla homogénea de dos o más sustancias en una sola fase, por simplicidad se considera dos sustancias líquidas; donde el componente en mayor proporción se denomina Disolvente y de menor proporción es el Solute en la disolución.⁴

Dilución es la adición del disolvente a una solución madre, al añadir la cantidad de disolvente a una disolución madre se establece la relación:

$$V_i * C_i = V_f * C_f$$

Donde: V_i = volumen de la disolución madre [m³]

C_i = Concentración de la disolución madre [kg/m³.d]

V_f = Volumen que se desea preparar la disolución final o diluida [m³]

C_f = Concentración de la disolución final o diluida [kg/m³.d]

Para el diseño de Estanques de Pulimento Estacionario, también se consideró el modelo análogo a la ecuación de Crites Tchobanoglous (2009). Una laguna de estabilización con agua residual es un reactor de flujo discontinua, donde para remover los componentes fisicoquímicos y biológicos toma en cuenta las variaciones de las concentraciones de cada componente.

Este modelo matemático no estacionario muestra que: La variación de la concentración respecto al tiempo (dC/dt), es función de la concentración de salida (Cf) menos la concentración de entrada (Ci), más la generación de otros constituyentes del producto de la reacción (RC); es decir un balance de materia general de sus componentes de agua residual, dentro de las fronteras del volumen de control está sustentada por la siguiente ecuación:

⁴Conceptos de química básica según François Raoult (1830-1901)

Capítulo V

Acumulación = Salida – Entrada + Generación por reacción química

$$\frac{dC}{dt} V = Q C_f - Q C_i + RCV$$

Como es un modelo discontinuo el caudal, $Q = 0$, el volumen V del reactor es constante.

Entonces:
$$\frac{dC}{dt} = RC$$

La velocidad de cambio de concentración de acumulación es igual a la velocidad de generación o degradación de los constituyentes. Asimismo la velocidad de la generación de reacción es: $RC = kC$, donde k [mg/l-d]; es el coeficiente cinético de remoción. Entonces para una reacción cinética de primer orden en remoción de la concentración, se tiene la ecuación:

$$\frac{dC}{dt} = -kC$$

Resolviendo esta ecuación diferencial de primer orden para $K = cte$.

Se tiene:

$$\int_{C_i}^C \frac{dC}{C} = -k \int_0^t dt$$
$$\ln \frac{C}{C_i} = -Kt$$
$$C = C_i e^{-kt}$$

Donde:

dC / dt = Variación de concentración de acumulación respecto al tiempo
[kg/m³.d]

Q = Caudal o flujo hidráulico [m³/d]

V = Volumen del recipiente [m³]

t = Tiempo de retención hidráulica [d]

k = coeficiente cinético de reacción [1/.d]

RC = Velocidad de generación o degradación [g/m³]

C_f = Concentración final de reacción [g/m^3]

C_i = Concentración inicial de la reacción [g/m^3]

5.3 Aplicación Balance de masa en estanques de pulimento estacionario

El balance de materia de un estanque abierto estacionario de aguas residuales, en general se considera como: la masa que ingresa por vertimiento de aguas, más, precipitación pluvial, que será igual a la masa de agua retenida en el estanque, menos evaporación por radiación solar y la infiltración diluida al subsuelo de los componentes como: Carbono (C), Hidrógeno (H), Oxígeno (O), Nitrógeno (N), Fosforo (P) y otros.

Para el estudio el **sistema de estanques de pulimento estacionario**, se realizó cálculos con el efluente de la laguna III-6 variando su carga contaminante por dilución con aguas claras del canal de drenaje que provienen de lagunas de la misma PTAR. En este sentido, se dispusieron de cinco tanques en los que se consideran las siguientes composiciones:

- Tanque I: Efluente 100% (1:0); geometría cono truncado.
- Tanque II: Efluente 75%, Agua clara 25% (3:1); geometría cilíndrica.
- Tanque III: Efluente 50%, Agua clara 50% (1:1); geometría cilíndrica.
- Tanque IV: Efluente 25%, Agua clara 75% (1:3); geometría cilíndrica.
- Tanque V: Agua clara 100% (0:1); geometría cilíndrica.

Por tanto el volumen de cada estanque del sistema, considerando sus geometrías se tiene: el estanque para agua residual al 100%, tiene geometría de cono truncado con diámetro inferior base 110 cm, (radio, $r = 55\text{cm}$) diámetro superior abierto 128 cm (radio; $R = 64\text{cm}$) y de altura ($h = 96\text{ cm}$); los otros recipientes tienen forma cilíndrica con diámetro 56 cm (radio $r = 28\text{cm}$) y altura ($h = 80\text{cm}$) como de muestra en la Figura 5-1.

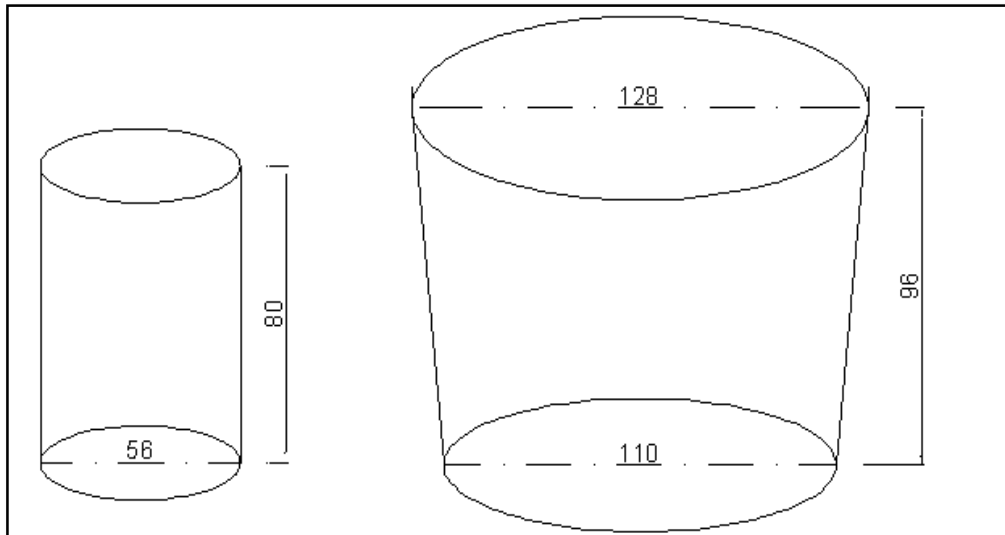
Luego el volumen de los estanques totalmente llenos son:

Capítulo V

Volumen del cono truncado: $V = ((\pi h(R^2 + r^2 + Rr)))/3 = 1,06975 \text{ m}^3$.

Volumen del cilindro: $V = \pi hr^2 = 0,19704 \text{ m}^3$, volumen de los 4 estanques

FIGURA 5-2: Forma geométrica de los tanques de pulimento y equalizador



Fuente: Elaboración con base a las medidas de los recipientes.

5.3.1 Base teórica para el cálculo de la masa

Para el cálculo de la masa aproximada de agua tratada y contenida en cada recipiente, se consideró los valores de volúmenes ya evaluados de los recipientes respectivamente. Para la densidad aparente de agua residual se asumió el valor promedio 923,53 mg/l equivalente a $0,924 \text{ Kg/m}^3$ del parámetro de Sólidos Diluidos Totales reportada de muestras de aguas del efluente laguna III-6 (Laboratorio de EPSAS, 2015) Suponiendo las aguas claras del drenaje tiene una densidad de 1 g/ml entonces se tiene:

$\rho_{ac} = 1000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$, densidad de agua clara del drenaje.

$\rho_{AR} = 0,924 \text{ [kg/m}^3\text{]}$, densidad de agua residual.

Capítulo V

El cálculo de la masa retenida en cada reservorio diluida es el producto de la densidad y volumen respectivo de cada componente es decir:

Masa de agua clara, $M_{ac} = \rho_{ac} * V$ y

Masa de agua residual, $M_{AR} = \rho_{AR} * V$ en proporciones.

Entonces la densidad de la Mezcla es:

$$\rho_{Mz} = \frac{M_{ac} + M_{AR}}{V}$$

Luego la masa de la mezcla diluida será:

$$M_{Mz} = \rho_{Mz} * V, \text{ para cada tratamiento.}$$

Loa cálculos con los valores supuestos, las densidades de los componentes de la mezcla, evaluados con las fórmulas teóricas son aproximadas a valores de los datos experimentales del Laboratorio.

5.3.2 Base experimental para el cálculo de masa en laboratorio de (EPSAS)

Para determinar los valores de densidad de los diferentes tratamientos de agua residual en laboratorio de EPSAS, se procedió con los siguientes pasos:

- Recepción de muestras de aguas diluidas en pequeños bidones codificados,
- Calibración de la balanza analítica y peso de vaso precipitado de 250[ml]
- Medida de agua residual tratada en probeta de 500 [ml] de capacidad.
- Pesaje del vaso precipitado con 200 [ml] de agua tratada del cual se registró el peso y volumen respectivamente.
- Para de las diferentes muestras de agua tratada se realizó con el mismo método previo limpieza de los equipos de Laboratorio.

Capítulo V

Los valores determinado en el laboratorio a una temperatura ambiental de 17°C, volumen constante del llenado 200ml y peso del vaso 94 ml cuya fórmula es:

$$\text{Peso del agua tratada} = \text{Peso total} - \text{Peso del vaso precipitado}$$

Los resultados obtenidos en densidad y masas de las aguas tratadas después de la retención periódica de 7 días, como se muestra en el Cuadro 5-1.

CUADRO 5-1: Densidad y Masa de agua residual contenido en cada recipiente

Estanques	Volumen [m ³]	Densidad [Kg/m ³]	Masa [Kg]
TI-C 100% Agua residual	1,069750	965,00000	1032,30875
TII- 75% Agua residual	0,197000	967,50000	190,59750
TIII -50% Agua residual	0,197000	970,00000	191,09000
TIV -25% Agua residual	0,197000	977,50000	192,56750
TV - 0% Agua residual	0,197000	995,00000	196,01500

Fuente: Elaboración propia con los datos geométricos y de laboratorio de EPSAS

Luego estas aguas tratadas son utilizadas para el riego en parcelas de experimentación, también es considerado estos valores para el cálculo de volumen total de agua aplicado al sistema de riego posteriormente.

5.4 Aplicación de Balance de energía en estanque de pulimento estacionario

Los aportes del flujo energético en estanques de pulimento estacionario son aquellas provenientes de aguas residuales industriales y la energía solar; la pérdida de energía térmica en sistema considera, como la energía por convección, la de evaporación y la irradiación del sistema al medio.

Las investigaciones actualizadas, empleadas en simulación de la dinámica de fluidos y para determinar los perfiles de temperatura (Sweeney et al 2004) plantea: la conservación de la energía para cualquier sistema, se puede expresar con la ecuación:

Capítulo V

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (u \cdot \nabla)T = k\nabla^2 T + \frac{Q}{\rho c_p}$$

Dónde: k = es la difusividad térmica en flujo laminar o turbulento [m^2/s]
 C_p = capacidad calorífica o calor específico [$\text{Kcal}/\text{Kg. } ^\circ\text{C}$]
 ρ = densidad calculada en función de las temperaturas [Kg/m^3]
 U = velocidad media del fluido [m/s]
 Q = tasa volumétrica de calentamiento interno de la masa del fluido [Kcal/m^3]
 T = temperatura [$^\circ\text{C}$]

Siendo:
$$\rho = \rho_0[1 - \beta(T - T_0)]$$

Que la densidad del flujo es función de la densidad (ρ_0), determinada a la temperatura de referencia (T_0) y el coeficiente de expansión volumétrica (β) del fluido.

También se indica que: A los calores de reacción química, se añade el calentamiento interno por la absorbanza de la energía lumínica en la superficie de la laguna como se expresa:

$$Q = \alpha I_0 \gamma e^{\gamma z}$$

Dónde: I_0 = intensidad de radiación solar [W/m^2]
 α = coeficiente de absorbanza [$[\text{W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{K})]$]
 γ = coeficiente de extinción según la ley de Beer [$[\text{W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{K})]$].

En las condiciones de frontera superficial del fluido y el medio ambiente, la ecuación del balance energético en un estanque de pulimento estacionario está dada por la ecuación:

$$k\nabla^2 T + \frac{Q}{\rho c_p} = 0$$

Capítulo V

Entonces el flujo neto de calor en la superficie del estanque es el resultado conjunto por la acción de los calores de convección, radiación y evaporación, viene dado por la siguiente expresión:

$$Q_c + Q_R + Q_E = -kA \frac{\partial T}{\partial X}$$

Dónde la pérdida de energía térmica por convección (Q_c) se relaciona con los valores constantes y variables como: (h) coeficiente de transferencia de calor por convección, (A) área superficial y T la temperatura:

$$Q_c = hA (T - T_{\text{aire}})$$

Asimismo la pérdida de energía de radiante (Q_R) en la superficie se relaciona con parámetros que se indica; siendo (α) constante de Stefan-Boltzmann, (ε) emisividad de la superficie (A) del agua T temperatura absoluta.

$$Q_R = \alpha \varepsilon A (T^4 - T_{\text{aire}}^4)$$

La pérdida de energía por evaporación (Q_E) se obtiene por las correlaciones empíricas (Fritz et al, 1980); k es una constante (0,1587 para el sistema de lagunaje), \bar{U} velocidad promedio de los vientos sobre el estanque como se indica:

$$Q_E = kA\bar{U}_{\text{viento}} (E - E_{\text{aire}})$$

$$E = 25,374R_h e^{17,62 - \frac{5271}{T}}$$

Los valores de: R_h , A, T son; la humedad relativa en la superficie del agua, área superficial del estanque y la temperatura absoluta respectivamente, que se utiliza para la evaluación del balance energético.

5.5 Requerimiento de calidad de agua para riego

Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (USEPA, 1973) la calidad del agua tiene un impacto importante en el crecimiento de la vegetación, por ende en el rendimiento del cultivo. Es así que la calidad del agua está en función de los siguientes factores:

- Condiciones climáticas locales, propiamente del lugar del riego.
- Características geológicas, físicas y químicas del suelo.
- Tolerancia en la germinación, crecimiento del cultivo elegido.
- Prácticas agronómicas (manejo del cultivo) y método del riego.

En la calidad del agua, los parámetros fisicoquímicos más relevantes que se evalúan son:

- Salinidad o concentración total de sales disueltas en el agua.
- Conductividad eléctrica del agua.
- La tasa de absorción de sodio (Na) o relación de absorción de sodio (RAS) en la infiltración del suelo.
- El efecto de los iones de sodio en agua es riego en la tasa de infiltración en suelos relativamente respecto a los iones de calcio, magnesio y otros metales.

5.6 Parámetros físicos, químicos y microbiológicos del agua de riego

Los valores características de los parámetros de aguas residuales para el riego en nuestro país no está reglamentado, sin embargo indican autores e instituciones internacionales como: Organización panamericana de salud (OPS), Organización mundial de salud (OMS), Centro panamericana de ingeniería sanitaria (CEPIS) y otros, que el agua de riego debe cumplir los siguientes requisitos:

5.6.1 Parámetros y características físicas

Algunas de las características físicas son observables y otras no, solo se pueden cuantificar con instrumentos en campo experimental, entre ellas son las siguientes:

Conductividad Eléctrica.

Mide la calidad del agua residual que será útil para el riego agrícola, como también para seleccionar los cultivos. Sí el agua de riego tiene una Conductividad Eléctrica (CE) menor a 0.7 mili Siemens por metro (mS/m) se pueden regar casi todos los cultivos. Y si la conductividad eléctrica (CE) se encuentra en el rango de 0.7 a 3.0 (mS/m), se recomienda sembrar aquellos cultivos que tengan moderada tolerancia a salinidad (Ayers y Westcot, 1987)

Sabor y Olor.

Estos parámetros organolépticos y de determinación subjetiva, no es observable ni medible con algún instrumento, sin embargo se han establecido ciertas reglas.

Las aguas adquieren un sabor salado a partir de 300 ppm de ion Cloruro (Cl^-), las aguas con un gusto salado y amargo tienen más de 450 ppm de (SO_4^{--}), las aguas con dióxido de carbono es de gusto picante y los fenoles u otros compuestos orgánicos son de sabor desagradable.

Entonces el agricultor debe tomar recaudos para el cultivo de las plantas con los cualitativos del agua del riego, (Ayers y Westcot, 1987).

Color

El agua pura es bastante incolora, solo en grandes cantidades se observa un color azulado, en presencia de colores inducidos por los materiales orgánicos en los suelos o metales se distingue como:

Color amarillento debido a los ácidos húmico ejemplo sulfuros.

Capítulo V

Color rojizo, suele significar la presencia de hierro.

Color negro indica la presencia de manganeso.

Las medidas de color se hacen en laboratorio por comparación, suelen medirse en ppm de platino (Pt), las aguas subterráneas no suelen sobrepasar las 5 partes por millón de platino, (ppm, Pt) pero las superficiales pueden alcanzar varios cientos de partes por millón de platino (ppm, Pt). La eliminación suele hacerse por coagulación-floculación y posterior filtración o la absorción en carbón activo (Ayers y Westcot, 1987).

Turbidez

Es la dificultad del agua para transmitir la luz debido a los materiales insolubles en suspensiones coloidales muy finos, son difíciles de filtrar estas partículas suspendidas. La unidad de medida está en Unidades Nefelométrica de Turbidez (NTU). Esta característica se debe tomar en cuenta para reutilizar en riego agrícola, si está bastante turbia indica eutrofización⁵ del agua residual (Metcalf y Eddy, 2004.)

5.6.2 Parámetros y característicos químicos.

El parámetro más significativo que determina el agua residual para un sistema de riego es el pH que indica la acidez o alcalinidad extremas, y moderada para el cultivo. Para los cultivos agropecuarios se recomienda valores moderados de 6.5 a 8,5 pH.

Los otros parámetros químico y agronómicos importantes que se considera en la calidad del agua para riego son: cationes de Sodio (Na^+), Calcio (Ca^{+2}) y Magnesio (Mg^{+2}) y Potasio (K^+); y los aniones: Carbonato (CO_3^{-2}), Bicarbonatos (HCO_3^{-2}), Cloruro (Cl^-), Sulfato (SO_4^{-2}) y Nitrato (NO_3^-). Los iones tóxicos contenidos comúnmente son el cloro, el sodio y el boro.

Los metales pesados existentes en agua residual son considerados por sus efectos nocivos sobre la salud humana, estas son: Arsénico, Cadmio, Cobre, Cromo, Mercurio,

⁵ Eutrofización: enriquecimiento desmedido de nutrientes que perjudica la biodiversidad.

Capítulo V

Níquel, Plomo y Zinc, los límites establecen la misma normatividad de referencias internacionales para cada uno de ellas (Ayers y Westcot, 1987).

5.6.3 Características biológicas

Según la Organización Mundial de Salud (OMS) y Organización Panamericana de Salud (OPS). Los parámetros biológicos o bacteriológicos importantes que consideran en la calidad del agua residual son: Coliformes Fecales (CF) y los Huevos de Helmintos (H.H.) determinantes para el riego agrícola. Son indicadores internacionales para establecer la contaminación del agua por bacterias, parásitos y virus, causantes de enfermedades gastrointestinales en humanos. Es muy importante determinar su presencia o ausencia en agua para cultivo de alimentos, las calidades sanitarias de los productos, caso contrario susceptibles de contraer enfermedades en los productores y consumidores.

5.7 Comparación de la calidad de agua residual para el riego.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (USEPA, 2001) señala que la calidad de agua está definida según las características físicas, químicas, biológicas y estéticas (apariencia, color y olor). Es decir, el agua saludable debe contener una cantidad balanceada de nutrientes y fluctuaciones normales de salinidad y temperatura, debe contener un porcentaje alto de oxígeno y recibir suficiente luz solar.

Considerando el Cuadro 2-4, los datos de análisis en laboratorio de la empresa EPSAS, los parámetros más relevantes son aceptables para el riego agrícola, comparativamente están dentro el rango de las restricciones, Cuadro 5-2.

CUADRO 5-2: Directrices de calidad físico-químico de aguas para riego agrícola

Parámetros	Unidad	Grado de restricción para su uso			
		Ninguno	Ligero-moderado	Severo	
Salinidad	dS/m	<0.7	0.7–3.0	>3.0	
Sólidos disueltos totales	mg/l	<450	450–2000	>2000	
Sólidos suspendidos totales	mg/l	<50	50–100	>100	
Relación de absorción de sodio	RAS	meq/l	>5.0 EC	5.0–2.9 EC	<2.9 EC
Sodio (Na ⁺) riego aspersión	meq/l	<3	>3		
Sodio (Na ⁺) Riego superficial	meq/l	<3	3–9	>9	
Cloruro (Cl ⁻) riego aspersión	meq/l	<3	>3		
Cloruro (Cl ⁻) riego superficial	meq/l	<4	4–10	>10	
Cloruro (Cl ₂) Total residual	mg/l	<1	1–5	>5	
Bicarbonato (HCO ₃)	mg/l	<90	90–500	>500	
Boro (B)	mg/l	<0.7	0.7–3.0	>3.0	
Sulfuro de hidrógeno	mg/l	<0.5	0.5–2.0	>2.0	
Hierro (Fe) en riego goteo	mg/l	<0.1	0.1–1.5	>1.5	
Manganeso (Mn) en riego goteo	mg/l	<0.1	0.1–1.5	>1.5	
Nitrógeno total	mg/l	<5	5–30	>30	
pH		Amplitud normal 6.5–8			

Fuente: Ayers y Westcot, 1987

5.8 Método de riego con agua residual en el proceso planteado

Por método de riego se entiende como la forma o manera de aplicar el agua en la superficie de las parcelas de producción, es decir, es un conjunto de etapas o pasos a seguir durante la aplicación de agua al suelo (Rueda, 2010).

Según (Dueñas, *et al.* 1981) riego por surcos es el método más aplicado cuando se utilizan aguas residuales, permite que los nutrientes y la materia orgánica (sólidos) se adhieran al suelo en forma directa.

Según otros autores, el método recomendable de riego es por goteo para optimizar el volumen de agua disponible (riego agrícola en Israel). La limitante de este método

radica en los costos de inversión, se requiere la construcción de tanques con mayor capacidad y el tendido de tubería de distribución.

En la presente investigación las parcelas de experimentación fueron regadas por aspersión, utilizando regadera casera con el agua residual acondicionada de los 5 tanques en 14 parcelas, según diseño experimental.

De las cuales la parcela crítica P1 es regada por método mixto, aplicando por surcos y aspersión, pues el riego es con 100% de agua residual, en el caso indicado las plantas se desarrollaron robustas y no fueron afectadas por la helada temporal, como ocurrió con algunas plantas en las parcelas.

5.9 Normas de aguas residuales para uso en riego agrícola

La legislación y reglamentación Internacional en materia de aguas residual es compleja, en ella intervienen las Leyes y Normas como las de: Comunidad Europea, Estados Unidos, España, Australia, Israel, Colombia, Chile y otros.

Sin embargo algunos países adoptan sus propias Normas y limitantes con base al conocimiento sobre el tipo de aguas residuales y su respectivo reusó de ellas, podemos citar sobre el tema en textos especializados y páginas web como se indica:

Cisneros *et al*, 2008, resume, que las aguas residuales pueden utilizarse para el uso en riego agrícola en las siguientes condiciones:

Riego restringido: Utilización de agua residual destinada a la actividad de siembra, cultivo y cosecha de productos agrícolas como legumbres y verduras las que se consumen crudas.

Riego No restringido: Uso del agua residual destinada a la actividad de siembra, cultivo y cosecha de productos agrícolas sin límite como; los forrajes, granos, frutas, tubérculos y otros que se consumen procesadas o cocidas.

Capítulo V

En la República de Colombia se ha establecido una norma, clasificando las aguas residuales según sus categorías y uso para el riego en diferentes modalidades basándose de la norma internacional como es de la FAO y OMS que recomienda a todos los países del mundo.

CUADRO 5-3: Calidad parasitológica y microbiológica de las aguas residuales

Categoría de agua residual	Condiciones de reúso	Grupos expuestos	Nematodo intestinal (promedio aritmético huevos/l)	Coliformes fecales (promedio geométrico/100ml)
A	Riego de cultivos consumidos crudos, campos deportivos y parques	Agricultores, consumidores y público	≤ 0,1 solo riego por goteo.	≤ 10 ³
B	Riego en cereales ,cultivos industriales , forrajes, pastos y árboles	Agricultores, pero no niños < 15años y pobladores cercamos	≤ 1 riego por aspersión o por surcos	≤ 10 ³
C	Irrigación localizada de cultivos en la categoría B si no están expuestos los trabajadores	No exponerse	No aplicable	No aplicable

Fuente: Citado por (Silva et al, 2008) adaptado de (OMS ginebra, 1989)

El vecino país, República del Perú para salvaguardar la Salud de sus habitantes tiene una Norma restringida para reúso de agua residual para riego agrícola con base a investigaciones realizadas en las universidades y cooperantes Internacionales como se indica en el Cuadro 5-4.

CUADRO 5-4: Parámetros de la calidad de agua residual para riego

Parámetros	Unidad	Grado de restricción para su uso		
		Ninguno	Ligero-moderado	Severo
Salinidad	dS/m	<0.7	0.7–3.0	>3.0
Solidos disueltos totales	mg/l	<450	450–2000	>2000
Solidos suspendidos totales	mg/l	<50	50–100	>100
Relación de absorción de sodio RAS	meq/l	>5.0 EC	5.0–2.9 EC	<2.9 EC
Sodio (Na ⁺) riego aspersión	meq/l	<3	>3	
Sodio (Na ⁺) Riego superficial	meq/l	<3	3–9	>9

Fuente: Elaborado con base a datos de la Norma República de Perú 2001.

CUADRO 5-5: Parámetros de la calidad de agua residual para riego (Continuación)

Parámetros	Unidad	Grado de restricción para su uso		
		Ninguno	Ligero-moderado	Severo
Cloruro (Cl ⁻) riego aspersión	meq/l	<3	>3	
Cloruro (Cl ⁻) riego superficial	meq/l	<4	4–10	>10
Cloruro (Cl ₂) Total residual	mg/l	<1	1–5	>5
Bicarbonato (HCO ₃)	mg/l	<90	90–500	>500
Boro (B)	mg/l	<0.7	0.7–3.0	>3.0
Sulfuro de hidrógeno	mg/l	<0.5	0.5–2.0	>2.0
Hierro (Fe) en riego goteo	mg/l	<0.1	0.1–1.5	>1.5
Manganeso (Mn) en riego goteo	mg/l	<0.1	0.1–1.5	>1.5
Nitrógeno total	mg/l	<5	5–30	>30
Ph		Amplitud normal 6.5–8		

Fuente: Elaborado con base a datos de la Norma República de Perú 2001.

En Bolivia la Ley 1333 del Medio Ambiente no está reglamentada específicamente, menciona en sus acápite restricciones sobre el uso de aguas residuales para el riego; por ejemplo no deben regarse con agua residual las hortalizas consumidas crudas y frutas de cáscara delgada, que sean ingeridas sin la cocción respectiva de ellas.

5.10 Selección de las variables de control

Según las recomendaciones citadas en los acápite anteriores para el sistema de riego en las parcelas de experimentación se considera los siguientes parámetros:

- Temperatura en (°C)
- pH
- Conductividad eléctrica en (mS/cm)
- Sólidos suspendidos totales en (mg/l)
- Demanda bioquímica de oxígeno en (mg/l)
- Demanda química de oxígeno en (mg/l)
- Metales pesados en (mg/l)
- Coliformes fecales en NMP/100 litros

5.10.1 Evaluación de los variables del sistema de riego

Para el estudio del reúso de las aguas residuales de la PTAR Puchukollo se ha utilizado las aguas del efluente o salida de la laguna III-6, registrando sus respectivos parámetros; asimismo las de aguas claras del canal drenaje acumulado en charco improvisado también son evaluadas sus parámetros. Para este propósito se utilizó un instrumento portátil (de marca HANNA) de procedencia Rumana, cuyos valores oscilan en promedios registrados *in sitio* como se indica en el Cuadro 5-5.

CUADRO 5-6: Variables registrados en aguas residuales tratadas para riego

Tratamientos	Temperatura [°C]	pH	Conductividad [μS/cm]	Solidos disueltos totales [ppm]
T-I	12,243	9,050	1318,571	757,857
T-II	13,154	8,250	1444,286	717,857
T-III	12,914	8,120	1261,429	619,286
T-IV	13,100	7,966	971,429	485,714
T-V	11,746	7,923	731,429	362,857

Fuente: Elaborado con base a datos registrados en sitio.

También se registraron los parámetros en los puntos de: efluente general cuyo pH es 8,10 es moderadamente básica a temperatura de 17°C; en la descarga al cuerpo del río Seco con pH es 7,95 a temperatura de 17°C y las de aguas claras del drenaje el pH es 6,73 a temperatura de 17°C.

Como se puede apreciar en el Cuadro 5-5 los tratamientos T-II a T-V están en el rango aceptable para el riego agrícola, incluyendo la de laguna III-6 y el de efluente general que vierte las aguas residuales al cuerpo del río Seco.

5.10.2 Caudal de salida de agua efluente de la PTAR Puchukollo

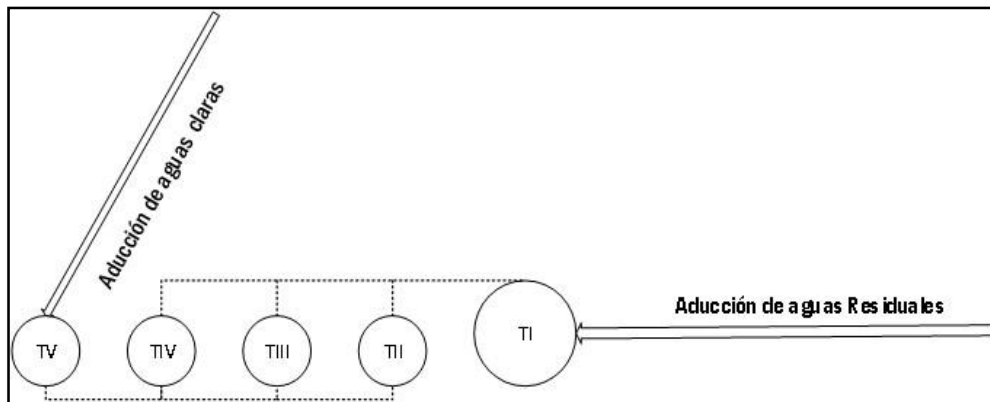
El caudal de salida de laguna de pulimento serie III-6 fluctúa en tiempos secos de 109,00 litros por segundo (l/s) y en tiempos húmedos de 119 litros por segundo (l/s), de las cuales un volumen mínimo se toma para el riego en las parcelas de experimentación.

5.11 Diseño e implementación del Sistemas de riego en parcelas

Este sistema piloto consiste en captar agua residual del laguna III-6, es decir del canal libre que fluye hacia el efluente general y descarga al cuerpo del rio Seco, también las aguas claras (drenadas) de la misma PTAR que fluye por un canal es atajado en charcos para captar, luego conducido por medio de conductos a recipientes (turriles) para el tratamiento en proporciones anteriormente calculadas Cuadro 5-1.

Las aguas son aduccionado según su capacidad: el tanque, TI tiene mayor capacidad, recibe agua residual en 100%, los tanques TII, TIII y TIV son diluidas en proporciones (Mezcla) y el tanque TV es de 100% agua clara del drenaje, Figura 5-2.

FIGURA 5-3: Sistema de tanques de ecualización de aguas residuales.



Fuente: Esquema elaborado con base del lugar de ubicación de los recipiente.

Donde:

TI= Tratamiento con agua residual al 100 %, agua clara 0%

TII= Tratamiento con agua residual al 75 %, agua clara 25 %

TIII= Tratamiento con agua residual al 50 %, agua clara 50 %

TIV= Tratamiento con agua residual al 25 %, agua clara 75 %

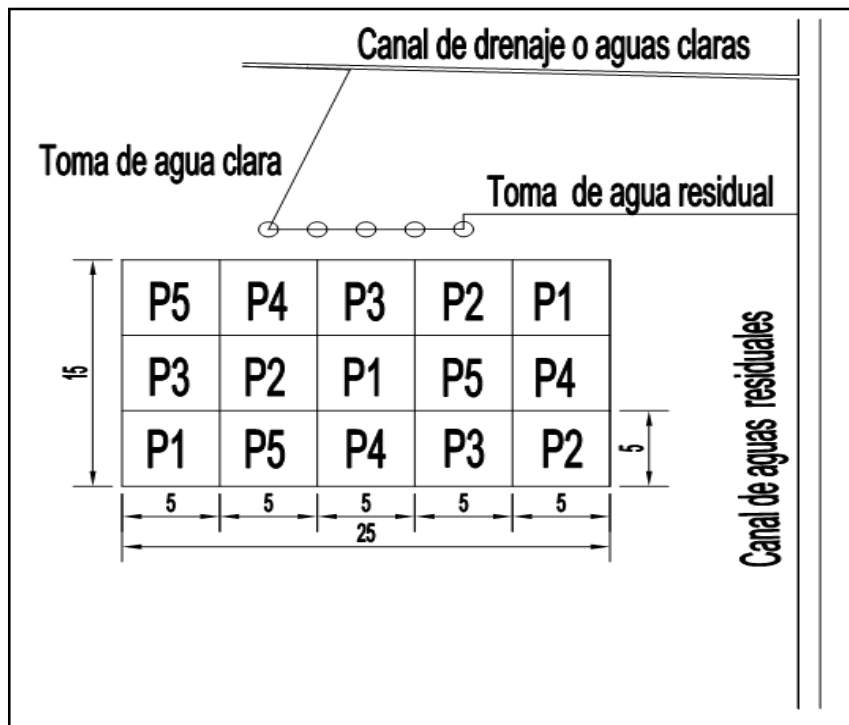
TV= Tratamiento con agua residual al 0 %, agua clara al 100 %

Capítulo V

También se preparó el terreno para siembra en la parte noroeste de las lagunas de la PTAR Puchukollo, autorizado por el gerente de la planta, en una extensión de 25 metros de longitud y 15 metros de ancho (375 m^2) sub dividido en 15 parcelas para cultivo de papa que será investigado posteriormente. Asimismo las parcelas tienen dimensiones de $5\text{m} \times 5\text{m}$ o sea 25 m^2 con pasillos de 50 cm en cada división.

Se codificó con señales vistosas en cada parcela para su identificación correspondiente (Véase Figura 5-4).

FIGURA 5-4: Parcelas para siembra de patatas y 5 tanques ecualizadores



Fuente: Imagen tomado en sitio de preparación y aducción del agua residual

Las aguas claras del drenaje fueron conectados a los recipientes por aducción en tubo de PVC con diámetro de 1 pulgada protegido con un cabezal de filtro para la succión, impulsado por una bomba eléctrica de 1 hp de potencia para evacuar aguas del drenaje a los recipientes en proporción.

Para expulsión se utilizó tubo PVC adaptado a una manguera flexible de $\frac{3}{4}$ de pulgada en diámetro, extensión en longitud de 200 metros Figura 5-5.

FIGURA 5-5: Aducción de agua clara del drenaje a los recipientes



Fuente: Imagen en sitio de preparación y aducción de aguas claras del drenaje.

Las aguas tratadas obtenidas en sistemas de Lagunas de Pulimento Estacionario en sus diferentes concentraciones, son aplicadas para el riego en parcelas de experimentación, sembradas con semilla de papa Huaycha.

CAPÍTULO VI: DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DEL CULTIVO DE PAPA

6 CULTIVO DE PAPA EN PARCELAS DE EXPERIMENTACIÓN

6.1 Generalidades en cultivo de la papa

La papa es originaria de los Andes de América del sur, cuya antigüedad data 7000 años antes las culturas preincaicas e incaicas (Pardave, 2004). La producción de la papa es cultivada antes de la colonia en las regiones de Perú y Bolivia, fue llevado a Europa y expandido por todo el mundo, ocupa el cuarto lugar en la alimentación humana después de trigo, arroz, y maíz, (FAO 2008).

En Bolivia existe más de 230 variedades de papa, de ellas 14 son las de mayor demanda en el mercado para el consumo, aporta en la producción agrícola el 17%, en la región altiplánica es el producto que genera mayores ingresos de las familias (Crespo, 2004).

La papa tiene amplio uso en el consumo doméstico en la preparación de: sopa, papas fritas, puré y otras variedades de platos que son hervidas o cocidos en horno. En forma deshidratada se elabora el Chuño y Tunta; el cuál puede almacenarse durante un tiempo determinado para seguridad alimentaria de los productores y consumidores. Se utiliza también en alimento balanceado para ganado bovino ovino y aves de corral.

También utilizada en la industria para la obtención de almidón, importante insumo para la fabricación papel, medicamentos, etanol, envases por ser fácilmente biodegradables, conferencia internacional (FAO. 2012).

La papa Huaycha especie (*Solanum tuberosum*), cultivo andino, tiene una cualidad adaptativa en climas templados y fríos en el rango de altitud 1500 a 4900 m.s.n.m. con ciclo vegetativo de 140 a 160 días en formación del tubérculo.

Capítulo VI

Botánica de la papa Huaycha, según (Huaman, 1986; Pardave 2004) se describen las siguientes partes:

- **Semilla** tubérculo semi-redonda con ojos profundos.
- **Estolones** donde se forman los tubérculos,
- **Raíces** fibrosas que absorbe agua subterránea y minerales.
- **Emergencia** es el principio del brote de la planta aéreo.
- **Tallos** son aéreos erectos y verdes. Hojas alternas que forma el follaje que purifica el oxígeno.
- **Inflorescencia** – flor hermafrodita un cáliz con cinco pétalos, cinco estambres y un pistilo.
- **Semilla natural** en forma de baja redonda que contiene de 300 a 400 semillas.

Fases fenológicas, según datos agronómicos (Canahua, 1991; PROINPA, 2015) son etapas importantes en el desarrollo de papa, tal como se describen:

- **Emergencia** ocurre en 30 a 35 días después de la siembra dependiendo de la humedad y temperatura del lugar.
- **Formación de los estolones** acontece a los 20 a 25 días después de la emergencia o sea la formación de los primeros tubérculos en la parte basal.
- **Formación de canopia o follaje** ocurre a los 40 a 50 días de emergencia, la planta crece en forma vertical el tallo y se cubre de hojas.
- **Inicio de floración** acontece a los 20 a 25 días después del follaje.

Capítulo VI

- **Inicio de tuberización** comienza junto con la floración, la planta se encuentra en su pleno desarrollo vegetativo.
- **Final de la floración** ocurre a los 85 a 110 días de la emergencia, las flores se convierten en bayas verde amarillentas.
- **Final de la tuberización** ocurre después de la floración en 120 a 140 días de emergencia, donde la formación de los tubérculos en subsuelos termina en los estolones.
- **Maduración fisiológica** el tubérculo se encuentra maduro en 140 a 160 días después de su emergencia, en el altiplano exclusivamente.

Los datos reportados corresponden a la bibliografía de la Facultad de Agronomía, UMSA; Centro Internacional de Papa, CIP; Promoción e Investigación de Productos Andinos, PROINPA; consulta en producción de papa Ing. PhD. Alejandro Bonifacio.

6.2 Cadena productiva de la papa en parcelas piloto

La cadena productiva es el seguimiento de las diferentes etapas que con lleva en la producción vegetativa de la papa en parcelas las cuales son:

6.2.1 Preparación del terreno

Esta actividad comenzó la segunda quincena del mes de octubre de 2014, se eligió terreno con una extensión 700 m², plano homogéneo con una pendiente de 0,1% para evitar el escurrimiento ligero de las aguas con un descanso de 12 años según operadores de la Planta, situado al noroeste de la PTAR Puchukollo.

Las características de la composición del suelo son de arena, limo y arcilla que analizados por Instituto Boliviano de ciencia y tecnología Nuclear (IBTEN) dieron los siguientes resultados:

CUADRO 6-1: Análisis de suelo en laboratorio IBTEN.

Parámetros	Unidad	Resultados
pH en KCl a 1 Normal	-	6,66
Materia orgánica	%	2,34
Nitrógeno total	%	0,12
Conductividad eléctrica en agua	dS/m	0,190
Calcio	meq/100g	5,72
Magnesio	meq/100g	1,48
Sodio	meq/100g	0,14
Potasio	meq/100g	1,60
Arsénico	ppm	35,106
Boro	ppm	1,370
Cadmio	ppm	<1,30
Cobalto	ppm	0,070
Hierro	ppm	172,200
Plomo	ppm	43,606
Zinc	ppm	

Fuente: Elaboración con base de datos del reporte de laboratorio IBTEN.

Se preparó el terreno cultivable en área de superficie de 750 m², roturando con tractor con arado de discos a una profundidad de 40 cm, el área útil seleccionado para parcelas de experimentación es de 375 m², después de un mes de roturado se realizó con tractor conectado a un equipo de rastra; el mullido mecánico, removido de la capa superficial del suelo para la siembra.

El terreno seleccionado de 375 m² es dividida en 15 parcelas de 5mx5m, o sea de 25 m² cada una, con separación de un metro distancia para pasillos entre parcelas pivotadas con estacas de madera, con la finalidad de diferenciar las parcelas a ser regadas con diferentes tratamientos de agua, en la mitad del terreno se cultivó cebada para el forraje que no está dentro el estudio del proyecto.

Capítulo VI

También se protegió el contorno del terreno con cerco palizada de maderamen, en puntales o estacas de 2 metros de altura, cada 5 metros de distancia, sujeta con clavo, alambre de amarre, cintas plásticas; para evitar el ingreso de animales en el área de cultivo. Tiene un lugar de entrada principal y 5 pasillos de entrada a las parcelas con 3 transversales para labores agrícolas.

FIGURA 6-1: Roturado del terreno para siembra de papa



Fuente: Imagen en el sitio de la roturación del terreno.

6.2.2 Siembra de papa en parcelas de experimentación

La siembra se realizó después de 3 semanas del roturado, según las normas recomendadas por proyectos de la Facultad de Agronomía (UMSA) a una profundidad 25cm, distancia de 40 cm de semilla a semilla y de surco a surco para camellones de 70 cm, en las 15 parcelas de experimentación.

La siembra se realizó en la primera quincena del mes de noviembre de 2014; utilizando 75 kilogramos de semilla, es decir 5 kilogramos en cada parcela. La

profundidad de los surcos fueron realizados manualmente con picota, pala y rastrillos para tapar las semillas en el suelo. (Ver Figura 6-2).

FIGURA 6-2: Abriendo surcos para la siembra de papa



Fuente: Imagen en sitio de siembra abriendo surcos.

6.3 Suministro de agua tratada en parcelas e impacto de energía solar.

6.3.1 Balance de agua para riego

En el riego agrícolas según (Allen *et al*, 2006), el método consiste en evaluar los flujos de agua que entran en la zona radicular del cultivo dentro de un determinado periodo de tiempo.

Un balance hídrico es de suma importancia debido que existe el fenómeno de evapotranspiración, consistente en la evaporación de agua de la superficie del suelo y la transpiración del agua por los nudos y hojas en las plantas.

El suministro de agua en un sistema que incluye a todos los parámetros involucrados en el riego está sustentada en la ecuación:

$$R = ET + ES + D - P - C \pm AFS$$

Donde: ET = Evapotranspiración [L/día]

R = Riego aplicado al cultivo [L/s]

P = Precipitación pluvial de la época [L/m²-s]

ES = Escurrimiento superficial por los surcos [L/h]

D = Percolación profunda que se recarga la capa freática [L/h]

C = Capilaridad, las raíces captan aguas de la capa freáticas subsuperficial [L/día]

AFS= Retención radicular según pendiente del terreno. [L/día]

El cálculo minucioso de volumen de agua para riego utilizado es posible determinar con base en Cuadro 5-5 del capítulo anterior y fenómenos climatológicos del lugar en las 16 semanas de riego. En el cultivo de papa el crecimiento vegetativo completo es de 120 a 160 días y consume de 500 a 700 ml de agua cada planta.

6.3.2 Energía en el desarrollo de la papa

Se considera la energía solar como medio natural necesario para el desarrollo de los cultivos, tiene efecto significativo en el crecimiento fisiológico, la reacción fisicoquímico, en la evapotranspiración y la fotosíntesis en las hojas o sea en el desarrollo integral de la canopia⁶.

Según (Salisbury y Ross, 1994), la mayor parte de la luz ultravioleta proveniente de los cosmos es absorbida por la capa de ozono, las infrarrojas retenidas por las partículas gaseosas: de agua, dióxido de carbono, y otras, solamente una parte del espectro visible (térmica) llega a la superficie terrestre.

Una parte de estos rayos es útil para el desarrollo de los cultivos agrícolas, al recibir mayor radiación la planta, el remanente se disipa en forma de calor de convección y/o transpiración al medio circundante, también indica para evaporar un kilogramo se requiere 580 kcal como calor latente de vaporización.

⁶ Canopia: Parte superior del follaje de las plantas que cumple la función de fotosíntesis

Capítulo VI

Según (Jackson, *et al.* 1981), el balance de energético con riego en cultivo agrícola y el medio circundante se sustenta en la ecuación:

$$R_n = G + H + \lambda E$$

Donde:

R_n = radiación neta (W/ m^2)

G = flujo de calor bajo la canopia (W/ m^2)

H = flujo de calor sensible desde la canopia hacia el aire (W/ m^2)

λE = flujo de calor latente (W/ m^2)

Perrier (1984) define el concepto de evapotranspiración (ET) como: “La pérdida total de agua de una cubierta vegetal bajo forma de vapor a través de la evaporación y transpiración durante un intervalo de tiempo dado”. Según lo señalado, la evapotranspiración es la suma de los términos evaporación y transpiración.

6.4 Labores característicos en el cultivo de la papa

Establecida la siembra de la papa en parcelas de experimentación, las labores comenzaron con las etapas siguientes:

6.4.1 Aporque en las parcelas

Después de la emergencia de los plantines de papa a los 35 días de la siembra, se realizó la actividad del primer aporque con surcos poco profundos, consistente en subir la tierra a una altura de 25 cm a las plantas.

La herramienta o equipo necesaria para esta actividad que ayuda al laboreo agrícola ha sido: una picota mediana tipo azadón con punta plana (Chontilla), rastrillo para recoger las hierbas, pala para subir más tierra a las plantas de manera puedan desarrollarse en forma vertical Figura 6-3.

FIGURA 6-3: Aporque realizado por sucos en las parcelas



Fuente: Imagen tomado en sitio de siembra.

6.4.2 Riego con diferentes tratamientos de agua residual

La actividad comenzó después del aporque con el riego semanal con aguas tratadas una semana antes en distintos recipientes (turriles metálicos), las descargas son independientes por medio de grifos ubicados en la parte inferior y transvasado en regadera manual, es aplicado de acuerdo a una planificación y comportamiento climatológico durante el ciclo vegetativo en cultivo de la papa, Figura 6-4.

FIGURA 6-4: Riego a los plantines con aguas tratadas en las parcelas



Fuente: Imagen tomado en sitio del riego en parcelas.

6.4.3 Control de malezas y aireación del suelo

Con la práctica del riego y precipitación pluvial las malezas se desarrollaron rápidamente, se tuvo que realizar el deshierbe para evitar la competencia en desarrollo con las plantas de la papa, asimismo se realizó el segundo aporque.

Esta labor se practicó con la finalidad de profundizar los surcos, aflojar y oxigenar el suelo, acercar la tierra a las plantas para cubrir los estolones de tubérculos, al encontrarse descubiertos tiende la posibilidad de mala formación de tubérculos.

En la primera quincena del mes de marzo (17-18), la temperatura descendió menor a 10°C (helada) sin embargo los sembradíos se recuperaron rápidamente, más aún las plantas regadas con 100% de agua residual.

Así completando su ciclo en desarrollo vegetativo en las parcelas de experimentación Figura 6-5.

FIGURA 6-5: Labores agrícolas en el desarrollo de plantines en parcelas



Fuente: Imagen tomado en sitio de cultivo.

6.4.4 Canopia, inflorescencia y maduración de los cultivos de papa

Después de la siembra en primera quincena del mes de noviembre, a los 120 días realizados los sembradíos, en mes de marzo se cubrieron de follaje, ramificaciones alrededor de la planta principal, algunos estolones de los tubérculos emergieron sobre la superficie de los suelos, para ello ha sido necesario intervenir y realizar aporques o subida de tierra en algunos surcos para preservar su normal crecimiento.

En el sembradío empezó la florescencia de las plantas en los 15 parcelas en el cultivo de papa con diferentes tratamientos de riego pasado los 140 días de la siembra; se observa también en las plantas hojas amarillentas después del florecimiento, esta implica prueba de maduración.

Entonces se dejó de regar en las parcelas de experimentación para que pueda completar su ciclo de maduración de los tubérculos hasta la cosecha respectiva.

FIGURA 6-6: Proceso de follaje e inflorescencia del cultivo de papa



Fuente: Imagen tomado en sitio de cultivo.

6.4.5 Monitoreo de las aguas del riego y evaluación de la producción

En las parcelas de experimentación se hizo un seguimiento y control con las aguas tratadas para el riego durante todo el periodo de cultivo desde la emergencia de los plantines hasta su floración y maduración de las plantas.

La evaluación respectiva de los parámetros físico químicos como: Temperatura, pH, conductividad eléctrica, solidos disueltos suspendidos se controló con un instrumento portátil (HANNA) de procedencia Rumana.

Este control se realizó en cada recarga de las aguas residuales, aguas claras y aguas en diferentes diluciones previamente agitadas para verificar la uniformidad de las propiedades fisicoquímicos durante el cultivo, como se aprecia en la Figura 6-7.

FIGURA 6-7: Medición de parámetros en aguas del sistema de tratamientos



Fuente: Imagen tomado en sitio de cultivo.

Los registros del monitoreo de aguas diluidas o tratadas que se realizó en tiempos determinados, conjuntamente con el cuidado y labores en las parcelas en el desarrollo del cultivo cuyos datos reportados se muestran en el Cuadro 6-2.

CUADRO 6-2: Datos del monitoreo de aguas tratadas con promedio mensual

MONITOREO DE PARAMETROS EN AGUAS TRATADAS					
Tratamientos	Periodos en meses	Temperatura [°C]	Ph	Conductividad [µS]	Solidos suspendidos. [ppm]
T-I; 100 %, Agua residual	Nov.	13,3	8,99	1550	820
	Dic.	8,7	9,4	1100	795
	Ene.	11,8	9,43	1500	850
	Fbr.	14,5	8,39	1500	750
	Marz.	12,1	8,81	1310	650
	Abr.	17,5	9,05	1130	670
	May.	7,8	9,28	1140	770
T-II; 75 %, Agua residual	Nov.	17	8,06	1500	745
	Dic.	8,6	8,34	1500	720
	Ene.	14,3	8,2	1480	740
	Fbr.	15,6	8,23	1350	690
	Marz.	13,8	8,16	1390	690
	Abr.	12,7	8,33	1410	700
	May.	10,08	8,43	1480	740
T-III; 50 %, Agua residual	Nov.	16,2	7,99	1450	645
	Dic.	8,6	8,23	1260	650
	Ene.	13,3	8,07	1280	640
	Fbr.	15,7	8,06	1160	580
	Marz.	13,7	8,04	1190	590
	Abr.	11,8	8,14	1220	600
	May.	11,1	8,31	1270	630
T-IV; 25 %, Agua residual	Nov.	16,4	7,85	980	510
	Dic.	9,5	8,07	1010	510
	Ene.	13,2	7,85	1000	500
	Fbr.	16,3	7,85	920	450
	Marz.	13,5	7,87	940	460
	Abr.	11,5	8,04	960	480
	May.	11,3	8,23	990	490
T-V; 0 % A. R. o 100 % Agua clara	Nov.	14	7,78	750	370
	Dic.	8,12	7,97	740	350
	Ene.	10,9	7,87	760	380
	Fbr.	16,6	7,88	690	340
	Marz.	12,7	7,87	690	350
	Abr.	9,7	7,91	730	370
	May.	10,20	8,18	760,00	380,00

Fuente: Elaboración con base de datos obtenidos.

6.4.6 Cosecha de los productos en parcelas piloto de experimentación

Se realizó la cosecha, en los primeros días de mayo, procurando mantener separada la producción por tratamientos de cada parcela, manteniendo su codificación respectiva, asimismo se trasladó a un lugar fuera de las parcelas para despojar de las tierras adheridas a los tubérculo para posterior envase a sacos de polietileno

FIGURA 6-8: Cosecha y selección de productos (tubérculos)



Fuente: Imagen tomado en sitio de cultivo.

6.5 Actividades post cosecha de los productos de papa

Para cuantificar del rendimiento de los productos de la papa en las parcelas de experimentación por los efectos de la influencia de los nutrientes de las aguas residuales tratadas, la del suelo, especie de semillas sembradas, se comenzó con las siguientes actividades:

6.5.1 Control de peso de los productos cosechados

Los productos después de la cosecha son evaluados el peso con un dinamómetro comercial de 25 libras y una balanza analítica calibrado con capacidad de peso en miligramo para su comprobación.

Se comprobó la cantidad en peso bruto de los productos cosechados de cada parcela, es decir productos aún adheridos con tierra y mermas, luego se descartó las papas muy menudas para lavar, a continuación se realizó el lavado en bateas y fraguados extendiendo en manteles al sol de forma independiente para cada tratamiento;

Nuevamente se controló el peso después de fraguar con el mismo método y equipo los grupos de productos y es codificado definitivamente como se indica:

Los productos de la parcela regada con 100 % de agua residual o tratamiento crítico (TI-C) se denomina producto o muestra con tratamiento crítica de la parcela P1, codificado como T11.

Los productos de las parcelas P12 y P13 también regadas con 95 % de agua residual, pero en diferentes sitios se denominó tratamiento regular (TI-R) según el croquis indicado y su codificación corresponde a T12 y T13 respectivamente que luego fue agrupado en un solo grupo, después del lavado por su afinidad en riego.

Las cosechas de las tres parcelas P21, P22 y P23, codificados como T21, T22 y T23 también son agrupadas en un solo grupo después del lavado para el peso neto, repetidas en el riego con el mismo tratamiento de agua.

Del mismo modo los productos de parcelas P31, P32, P33 y otras son evaluados, pesados, agrupados y codificados por afinidad en riego, como se indica en el Cuadro 6-3.

CUADRO 6-3: Resultados de la cantidad en peso de papa cosechada en parcelas

PESOS DE PAPAS COSECHADAS EN LAS PARCELAS				
Nº	TRATAMIENTO O MUESTRA	PESO BRUTO SIN LAVAR [Kg]	PESO BRUTO TOTALES EN [Kg]	LAVADO PESO NETO EN [Kg]
1	T11	35	35	34
2	T12	28	57	56
3	T13	29		
4	T21	36		
5	T22	25	97	95
6	T23	36	96	95
7	T31	38		
8	T32	33		
9	T33	25	81	80
10	T41	35		
11	T42	26		
12	T43	20	71	70
13	T51	34		
14	T52	25		
15	T53	12	437	430
TOTALES				

Fuente: Elaboración propia con base a datos registrados

6.5.2 Selección de productos por tamaño en diámetro

Los productos cosechados en las parcelas de experimentación se seleccionaron en 5 diferentes tamaños y grupos, considerando la medida del diámetro, manteniendo independencia los productos de los 6 tratamientos de riego en parcelas con sus repeticiones.

- La selección del primer grupo de volumen (1) se consideró aquellas que tienen diámetro de 7 a 8 cm, apto para comercio, en mercados y ferias.

Capítulo VI

- Segundo grupo de tamaño (2) las que están en diámetro de 5 a 7 cm, también es considerado comercial y de autoconsumo.
- El grupo de tamaño (3) con diámetros de 4 a 5 cm, es apto para elaborar Chuño, Tunta o papa deshidratada para el comercio y autoconsumo; además este grupo se manipuló con sumo cuidado para análisis de laboratorio y estudio según recomiendan los agrónomos (*et al*; Ing. Fanny Barragán, 2015)
- El cuarto grupo de tamaño (4) con diámetros de 3 a 4cm, es exclusivamente reservado como semilla para posterior siembra.
- Y por último el grupo de tamaño (5) con diámetro menor a 3 cm es considerado como papa menuda y útil para elaborar chuño menudo o como alimentos de los ganados.

CUADRO 6-4: Diámetro promedio de los productos cosechados

MUESTRA DE PAPA POR TAMAÑO EN DIAMETRO [cm]						
Nº	MUESTRA	T I-RC1	T I- RC2	T I- RC3	T I-RC4	T I- RC5
1	Grupo T I- RC	8,500	5,500	4,500	3,300	2,400
2		7,500	5,700	4,400	3,800	2,800
3		8,000	5,000	5,500	3,200	2,800
4		7,000	5,600	4,700	3,500	2,700
5		6,500	5,100	4,600	3,100	2,500
PROMEDIOS		7,500	5,380	4,740	3,380	2,640
Nº	MUESTRA	T I-R1	T I- R2	T I - R3	T I-R4	TI- R5
1	Grupo T I- R	6,680	5,300	4,500	3,800	2,700
2		6,400	5,000	4,200	3,500	2,600
3		7,200	5,600	4,800	3,700	3,100
4		6,800	5,200	4,700	3,600	0,000
5		6,500	5,000	4,600	3,900	2,900
PROMEDIOS		6,716	5,220	4,560	3,700	2,260

Fuente: Elaboración propia con base a datos registrados

CUADRO 6-5: Diámetro promedio de los productos cosechados (Continuacion)

MUESTRA DE PAPA POR TAMAÑO EN DIAMETRO [cm]						
Nº	MUESTRA	T II- 1	T II- 2	T II - 3	T II- 4	T II-5
1	Grupo T II	9,000	5,700	4,600	3,700	2,900
2		7,820	5,600	4,700	3,900	2,700
3		6,800	5,250	4,400	3,500	2,800
4		6,750	5,100	4,200	3,600	2,600
5		6,600	5,300	4,800	3,400	2,900
PROMEDIOS		7,394	5,390	4,540	3,620	2,780
Nº	MUESTRA	T III- 1	T III- 2	T III - 3	T III- 4	TIII- 5
1	Grupo T III	7,000	5,800	4,700	4,000	3,500
2		6,900	5,400	4,600	4,100	3,100
3		7,300	6,100	4,400	3,900	2,800
4		6,800	5,700	4,800	3,700	2,900
5		6,700	5,900	4,300	3,800	2,700
PROMEDIOS		6,940	5,780	4,560	3,900	3,000
Nº	MUESTRA	T IV - 1	T IV - 2	T IV - 3	T IV - 4	TIV - 5
1	Grupo T IV	8,800	6,000	4,800	4,000	3,000
2		8,300	5,800	5,100	3,850	3,200
3		8,100	6,500	4,700	4,100	2,800
4		7,800	5,700	5,500	4,200	3,100
5		7,700	6,400	5,200	3,900	2,900
PROMEDIOS		8,140	6,080	5,060	4,010	3,000
Nº	MUESTRA	T V- 1	T V - 2	T V - 3	T V - 4	T V - 5
1	Grupo T V	9,000	6,100	5,200	4,100	2,800
2		7,500	6,000	4,800	4,200	3,0
3		8,400	6,200	5,100	4,000	3,200
4		7,200	5,900	5,000	4,300	2,700
5		7,100	5,700	4,900	3,900	2,500
PROMEDIOS		7,840	5,980	5,000	4,100	2,800

Fuente: Elaboración propia con base a datos registrados

6.5.3 Control físico de los productos determinadas para estudio

De los grupos de productos evaluados por tratamientos y tamaño, se realizó la selección por grupos menores como muestra de estudio físico, tomando la cantidad de

Capítulo VI

papas, peso aproximado de un kilogramo con un error de (± 10 mg), volumen evaluado en litros de forma indirecta, de este modo es valorado la cantidad de materia contenida en grupo de muestra por volumen o sea la densidad.

Para la evacuación de estos parámetros físicos se utilizó balanza analítica, bandejas pequeñas para controlar el peso, recipiente graduado a escala de 2000 mililitros para valorar en forma indirecta el volumen de la muestra también se disponía de una probeta graduada y agua, los datos registrados se muestra en el Cuadro 6-6.

CUADRO 6-6: Calidad física de las muestras en diferentes tratamientos

MEDIDAS FÍSICAS DE MUESTRAS DE PAPA						
Muestras	Parámetros	Tamaño 1	Tamaño 2	Tamaño 3	Tamaño 4	Tamaño 5
T-I-C; 100 % AR	Cantidad	6	13	19	29	54
	Peso [Kg]	1,096	1,010	1,010	1,020	1,000
	Volumen [L]	1,730	0,990	0,990	1,000	0,990
	Densidad [Kg/l]	0,634	1,020	1,020	1,020	1,010
T-I-R; 95 % AR	Cantidad	5	12	18	27	51
	Peso [Kg]	1,044	1,006	1,001	1,004	1,004
	Volumen [L]	1,000	1,010	1,000	1,010	1,000
	Densidad [Kg/l]	1,044	0,996	1,001	0,994	1,004
T-II; 75 % AR	Cantidad	5	12	18	29	58
	Peso [Kg]	1,006	1,006	1,008	1,000	1,003
	Volumen [L]	0,990	0,990	1,000	1,000	1,000
	Densidad [Kg/l]	1,016	1,016	1,008	1,000	1,003
T-III; 50 % AR	Cantidad	6	11	19	30	65
	Peso [Kg]	1,010	1,011	1,002	1,002	1,005
	Volumen [L]	1,000	1,010	1,000	1,005	1,100
	Densidad [Kg/l]	1,010	1,001	1,002	0,997	0,914
T-IV; 25 % AR	Cantidad	4	11	17	28	52
	Peso [Kg]	1,003	1,003	1,000	1,001	1,000
	Volumen [L]	1,000	1,000	1,010	1,010	1,001
	Densidad [Kg/l]	1,003	1,003	0,990	0,991	0,999
T-V; 0 % AR; a Clara	Cantidad	5	13	17	28	47
	Peso [Kg]	1,004	1,001	1,004	1,002	1,001
	Volumen [L]	1,000	0,990	1,000	0,991	1,001
	Densidad [Kg/l]	1,004	1,011	1,004	1,011	1,000

Fuente: Elaboración propia con base a datos registrados

6.5.4 Selección de muestras para análisis en Laboratorio

Las muestras de papa fueron escogidos del tercer grupo en tamaño con diámetros de 4 a 5 cm, de los seis tratamientos regados con agua residual en proporciones de 100%, 95%, 75%, 50%, 25% y 0% respectivamente.

La selección de las muestras se tomó por cuarteo, que consiste en separar en cuatro grupos una cierta cantidad de muestra, de los cuales se eligió al azar uno de los cuatro grupos, o sea por método Muestro Aleatorio Simple (MAS) de los seis tratamientos, fue envasado 400 gramos de cada muestra en bolsas de polietileno con cierre hermético, posteriormente es enviado al laboratorio de Servicios de Laboratorio de Diagnostico e Investigación de Salud (SELADIS) dependiente de la facultad de Ciencias Farmacéuticas y Bioquímicas de la UMSA, la codificación de cada grupo producido tienen los siguientes significados:

- TI-C: son muestras regadas con 100% de agua residual al cual se denominó producto con tratamiento crítico de la parcela P1.
- TI-R: son muestras de las parcelas P12 y P13, regadas con agua residual al 95% denominado tratamiento regular por estar más distante al reservorio principal de agua residual.
- T-II; 75 % AR son muestras de productos de las parcelas P21, P22, P23, regadas con 75% de agua residual y un 25% con aguas claras del drenaje de lagunas de la PTAR.
- T-III; 50%AR: son muestras de productos de las parcelas P31, P32, P33, regadas con 50% de agua residual y 50% con aguas claras del drenaje de lagunas de la PTAR.
- T-IV; 25 % AR: son muestras de productos de las parcelas P41, P42, P43, regadas con 25% de agua residual y 75% con aguas claras del drenaje de las lagunas.

Capítulo VI

- T-V: 0 % AR: son muestras de productos de las parcelas P51, P52, P53, regadas al 100% con aguas claras de las lagunas de estabilización de la planta.
- Asimismo se preparó muestra codificada SIN-TRA-N: es una muestra de papa cuyo producción es natural, a secano o sea sin riego, este sembradío de cultivó adyacente a parcelas de experimentación, en los predios de la misma planta PTAR Puchukollo.

También se preparó otros grupos de muestras clasificadas con similitud codificación, pero en seco, triturado y molido; en la cantidad de 100 gramos cada tipo, envasados en bolsas de polietileno con cierre hermético para el envío a laboratorio del Centro de Investigación de COMIBOL con la finalidad de cuantificar metales que aportan en la nutrición y metales pesados tóxicos existentes en los productos. Estos datos se muestran el Cuadro 6-7.

CUADRO 6-7: Muestras enviadas al Centro de investigación de la COMIBOL

Muestras	Unidad	Cantidad	Envase
Tratamiento crítico, 100% de AR. (TI-C)	gr	100	Bolsa PVC hermético
Tratamiento regular, 95% de AR (TI-R)	gr r	100	Bolsa PVC hermético
Tratamiento con 75% de AR (TII-123)	gr	100	Bolsa PVC hermético
Tratamiento con 50% de AR (TIII-123)	gr	100	Bolsa PVC hermético
Tratamiento con 25% de AR (TIV-123)	gr	100	Bolsa PVC hermético
Tratamiento con 75% de AR (TV-123)	gr	100	Bolsa PVC hermético

Fuente: Elaboración con base a selección de productos

AR= agua residual

CAPÍTULO VII: RESULTADOS

7 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PRODUCCION DE PAPA

En este capítulo se esbozan los resultados obtenidos de la investigación, tanto en la mejora de agua residual del efluente de la PTAR Puchukollo y de la producción de papa regados con diferentes tratamientos en las parcelas.

7.1 Análisis de resultados obtenidos en mejoramiento de agua residual

CUADRO 7-1: Calidad de agua residual evaluada en diferentes tratamientos

Parámetros		Valores comparativos		Valores paramétricos de las aguas en diferentes tratamientos				
Descripción	Unidad	Limites Ley 1333	Efluente III-6	TI	TII	TIII	TIV	TV
DBO	mg/L	80	176,88	107,07	65,86	50,23	90,04	89,61
DQO	mg/L	250	395,08	239	147	104	201	200
Sólidos disueltosT.	mg/L	1000	829,58	728,1	712,2	608,05	476,50	364,9
Fósforo	mg/L	2	7,7	4,86	2,87	2,03	3,92	3,9
Nitrogeno total	mg/L	15	110,52	66,85	41,12	29,09	56,25	55,61
Temperatura	°C	45	14	12,24	13,15	12,91	13,1	11,75
pH	pH	6,5-8,5	8,1	9,05	8,25	8,12	7,97	7,92
Coliformes Totales	NMP/100 ml	5,0E+03	2,8E+05	1,8E+04	1,7E+04	1,7E+05	1,4E+04	1,4E+04
Cromo	mg/L	0,2	4,41	2,45	1,04	1,64	2,56	2,45
Cadmio	mg/L	0,1	4,35	2,65	1,62	1,44	2,21	1,99
Plomo	mg/L	5	16,15	9,76	6,012	4,25	8,2	8,18
Mercurio	mg/L	0,005	0,027	0,017	0,011	0,007	0,014	0,014
Arsénico	mg/L	0,05	5,09	3,08	1,91	1,34	2,58	2,57
Zinc	mg/L	2	10	6,08	3,72	2,63	5,08	5,06

Fuente: Elaboración con datos en campo del monitoreo en laboratorio EPSAS

Capítulo VII

De acuerdo el análisis físico-químico realizado en laboratorio de la empresa EPSAS, los límites permitidos de agua residual según la Ley 1333 de Medio ambiente, los datos reportados del efluente (salida de laguna-6) de la serie III, los valores promedios obtenidos de los diferentes tratamientos como se presentan en el Cuadro 7-1.

Las aguas residuales después de la dilución en proporciones con aguas claras del drenaje y retenida en periodo de una semana, tuvieron mejoras en calidad, así por ejemplo en el tratamiento T-III con 50% de agua residual y 50% de agua clara; bajó la carga orgánica DBO de 177 mg/L a 50 mg/L, seguido del tratamiento T-II con 75% agua residual y 25% de agua clara y en los últimos tratamientos aumentó mínimamente en cantidad de carga en aguas el drenaje.

CUADRO 7-2: Volúmenes de agua recargada en los recipientes por periodos

RECARGAS Y GASTOS DE AGUA PARA RIEGO EN PARCELAS						
Estanques	N° recarga semana	Volumen Turril [m ³]	Gasto semana [m ³]	Gasto periodo [m ³]	Densidad [Kg/m ³]	Masa Total [Kg]
TI-C 100% AR	1,00	1,07	1,07	27,814	965,00	26840,03
TII- 75% AR	5,00	0,20	0,99	25,61	967,50	24777,68
TIII -50% AR	5,00	0,20	0,99	25,61	970,00	24841,70
TIV -25% AR	5,00	0,20	0,99	25,61	977,50	25033,78
TV - 0% AR	5,00	0,20	0,99	25,61	995,00	25481,95

Fuente: Elaboración con base de datos del monitoreo en laboratorio EPSAS

De los datos evaluados del cuadro 7-2 se deriva los siguientes resultados: El volumen global recargado a todo el sistema es de 5,03m³ por semana, más la poca precipitación pluvial aproximadamente.

Entonces para el riego de 350 m², en periodo de 6 meses se tiene:

$$\frac{5,03 \text{ m}^3}{\text{semana}} * \frac{\text{semana}}{7 \text{ días}} * \frac{365 \text{ días}}{\text{año}} * \frac{\text{año}}{12 \text{ meses}} * 6 \text{ meses} = 131,139 \text{ m}^3$$

Capítulo VII

El agua utilizada para irrigar de 350 m² de cultivo agrícola, equivalente a 0,035 hectáreas aproximadamente. También se infiere del reporte de la Gerencia EPSAS Puchukollo, el caudal que fluye del efluente general de la PTAR es de 425,43 litros por segundo en promedio, entonces se tiene agua disponible para el riego en metros cúbicos como se indica:

$$\frac{425,43 \text{ lit.}}{\text{seg}} * \frac{\text{m}^3}{1000\text{lit.}} * \frac{3600 \text{ seg}}{\text{hr.}} * \frac{24 \text{ hr.}}{\text{día}} * \frac{365 \text{ día}}{\text{año}} * \frac{\text{año}}{12 \text{ mes}} * 6\text{mes} \approx 6,80 * 10^6 \text{ m}^3$$

Este significa que para periodo de 6 meses, se tiene agua para riego de 6,80*10⁶ m³; de las cuales; aprovechando el 70 % del volumen total es 4,7*10⁶ m³ se tiene agua disponible para riego agrícola en el altiplano.

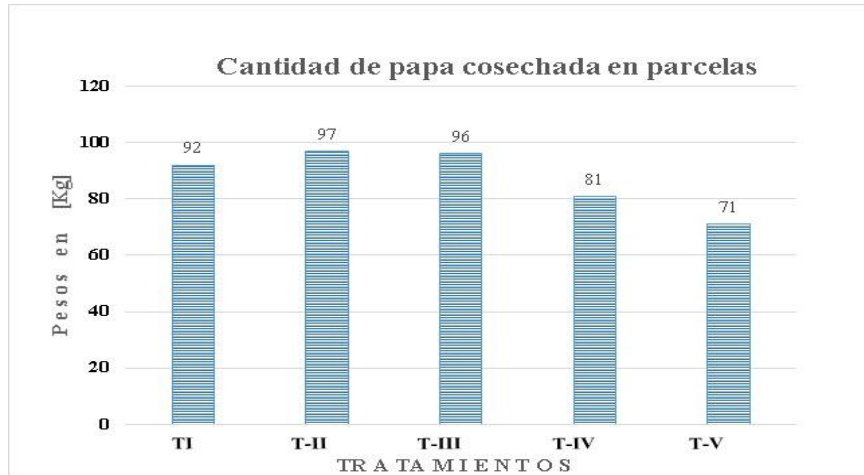
Sí con 131,139 m³ se riega 0,035 hectáreas, entonces con 4,7*10⁶ m³ es posible regar 1254,40 hectáreas de sembradíos. Aplicando mismo método en los restantes meses que no se practica la siembra, se puede aprovechar estas aguas en riego de forrajes para la alimentación pecuaria.

7.2 Análisis de resultados obtenidos en la producción de papa Huaycha

En la producción de papa Huaycha en las 15 parcelas de experimentación se aprecia los resultados obtenidos, que evaluados en cada parcela, la cantidad en kilogramos y calidad se resume en el Gráfico 7-1.

Como se observa en el gráfico 7-1 la producción mayor ha sido en parcelas regadas con aguas tratadas de tipo T-II, 75% de agua residual y 25% de agua clara, seguido el tratamiento T-III, 50% de agua residual y 50% de agua clara, de tamaños razonables, luego la de tratamiento de tipo T-I, críticos y regulares , regados con 95% y 100% de agua residual con bastante retención de agua en los tubérculos que los anteriores; pero son de tamaños grande a mediano en calidad y es menor en cantidad las papas pequeñas y menudas.

GRÁFICO 7-1: Cantidad de productos cosechados en las parcelas



Fuente: Elaboración con base en datos recopilados en la investigación

Finalmente en las parcelas regadas con tratamientos de los tipos T-IV con 25% de agua residual y 75% de agua clara, dieron como resultado un rendimiento menor en la cosecha, asimismo el tratamiento con 100% de agua clara, se cosechó en menor cantidad, pero de calidad razonable según indican los expertos en agronomía.

Asimismo el análisis Bioquímico realizado en el Servicio de Laboratorio de Diagnóstico e Investigación de Salud (SELADIS) dependiente de la Facultad de Ciencias Farmacéuticas y Bioquímica UMSA se muestra en el Cuadro 7-3.

Estas pruebas se analizaron con distintas metodologías, el objetivo fue determinar el contenido de nutrientes, minerales y sustancias que pueden afectar al consumo humano en la preparación de alimentos con estos productos.

Los valores reportados en el Cuadro 7-3, de acuerdo el adendum alimentario las composiciones promedios corresponde: Ácido láctico 0,078%; Carbohidratos 19,02 %; Proteínas 2,69 %; Calcio 0,02 %; Hierro 0,002 %; Fósforo 0,005 %; Plomo 0,49 mg/Kg; Arsénico 0,34 mg/Kg; Cadmio 0,009 mg/Kg, el componente Mercurio es insignificante respectivamente, por lo tanto se considera producto comestible.

CUADRO 7-3: Resultados de análisis Bromatológico en muestras

MUESTRAS DE PAPA ANALIZADO EN LABORATORIO DE (SELADIS)										
N°	Parámetros	Método	Unidad	TI-C	TI-R	T-II	T-III	T-IV	T-V	SIN
				100%	95%AR	75%AR	50%AR	25%AR	0%AR	TRAT. N
1	Acido Lactico	Volumetrica	%	0,1407	0,1420	0,1213	0,0164	0,0248	0,0247	0,0494
2	Carbohidratos	Fehling	%	17,1970	20,4610	17,7750	18,5610	19,1350	21,0040	20,6920
3	Proteina	Kjendhal	%	4,4500	0,9700	1,9300	3,6090	2,9500	2,2700	3,8800
4	Calcio	Volumetrica	mg/100g	15,0420	12,3500	18,5070	24,2300	26,8000	16,8700	23,8600
5	Hierro	Espectrofotometría	mg/100g	1,9260	2,6110	1,7900	2,8600	2,4000	1,9250	2,6100
6	Fosforo	Espectrofotometría	mg/100g	41,0590	27,2500	35,1200	67,7200	66,9400	65,1400	20,0200
7	Plomo	E. absorción atómica	mg/Kg	0,5630	0,4650	0,3280	0,5510	0,6110	0,4580	0,4090
8	Arsenico	E. absorción atómica	mg/Kg	0,4530	0,3410	0,2140	0,2890	0,4120	0,3270	0,2130
9	Cadmio	E. absorción atómica	mg/Kg	0,0125	0,0095	0,0060	0,0067	0,0104	0,0101	0,0041
10	Mercurio	E. absorción atómica	mg/Kg	< 0,0156	< 0,0155	< 0,0142	< 0,0145	< 0,0153	< 0,0163	< 0,0164

Fuente: Elaboración con base a datos reportados en Laboratorio (SELADIS)

Con la finalidad de comprobar aún respecto más los metales pesados existentes en las muestras, se envió al laboratorio del Centro de Investigaciones metálicas dependiente de la Corporación Minera de Bolivia (COMIBOL). Cuyos reportes en unidades partes por millón (ppm = mg/Kg) se muestra en el Cuadro 7-4.

CUADRO 7-4: Resultados obtenidos del análisis en muestras de los productos

MUESTRAS DE PAPA ANALIZADO EN LABORATORIO DE (COMIBOL)							
Parámetros	Unidad	TI - C	TI-R	T-II	T-III	T-IV	T-V
		100% AR	95% AR	75% AR	50% AR	25% AR	0% AR
Ca	ppm	6446,82	6989,262	7039,719	6730,152	6453,868	7005,129
Mo	ppm	60,008	75,085	64,991	61,082	60,647	69,747
Fe	ppm	180,618	260,358	250,448	233,837	263,941	140,546
Ag	ppm	14,144	16,232	16,743	<13,350	<13,561	<13,574
Pb	ppm	20,391	20,481	21,335	19,113	20,895	10,968
As	ppm	<8,907	<8,97	<8,898	<8,595	<9,179	<9,326
Cd	ppm	48,095	55,142	58,904	60,528	50,163	54,717
Cr	ppm	347,451	368,626	359,364	378,404	331,423	384,382
Zn	ppm	41,109	35,473	59,289	41,251	<31,454	<30,997

Fuente: Elaboración con base a datos reportados en Laboratorio (COMIBOL)

Capítulo VII

Según expertos internacionales la papa es un alimento de consumo básico, ocupa el cuarto lugar después del trigo, maíz, arroz en la alimentación humana en el mundo, que por sus características sensoriales, sabor, y color neutro es saludable.

Cada unidad del producto se encuentra conformada por tres partes principales: la piel cáscara y la zona medular compuesta fundamentalmente agua, tejido por excelencia de almidón, que al reaccionar aporta energía calorífica, cuyo análisis bromatológico corresponde como se muestra en el Cuadro 7-5.

CUADRO 7-5: Composición química de la papa certificado según FAO y OMS

Composición química del tubérculo de la papa			
Materia seca 76 %		Agua 24%	
N°	Componentes	Unidad	Cantidad
1	Energía en calorías	Kcal	87,000
2	Proteínas	gr.	1,870
3	Carbohidratos	gr.	20,130
4	Fibra	gr.	1,800
5	Grasa	gr.	0,100
6	Vitamina C	mg.	13,000
7	Calcio	mg.	5,000
8	Fosforo	mg.	44,000
9	Potasio	mg.	379,000
10	Hierro	mg.	0,310
11	Niacina	mg.	1,440
12	Tiamina	mg.	0,106
13	Reboflavina	mg.	0,020

Fuente: <http://www.rlc.fao.org/es/agricultura/produ/papa.htm>; 2014

Con los datos reportados de los laboratorios muestra que la papa Huaycha producida mediante el sistema de tratamientos con aguas residuales cumple con las normas internacionales y se considera **apta para consumo, producción y comercialización de este producto.**

7.3 Análisis Técnico, Económico, Social y Ambiental de la investigación:

La investigación más importante de Mejoramiento de aguas residuales del efluente de la PTAR Puchukollo radica en función del producto obtenido.

El sistema propuesto para mejorar el agua residual que sale de la PTAR es beneficiosa para la agricultura de la región; actualmente no pueden utilizar las aguas del efluente de la planta, debido que el producto no cumple con los requisitos del *adendum* alimentario y es muy riesgosa su producción.

Al concluir esta investigación básica podemos considerar cuatro puntos importantes que deben tomarse en cuenta en la implementación del proyecto a mayor escala. Estas consideraciones son: Técnicas, Económicas, Sociales y Ambientales (TESA)

Para el Sistema Piloto implementado en las dependencias de la PTAR Puchukollo, con la finalidad de adecuarse a los cuatro puntos citados para cualquier proyecto se consideró como se indica:

Técnico. Para la construcción del sistema piloto fue necesario formar equipos de trabajo con personas entendidos en el ramo, se planificó con bastante capacidad e imaginación, realizar cálculos de costos de los equipos y maquinaria para ejecutar el proyecto. Con el método de dilución porcentual y ecualización retenida se observó la remoción apreciable de la carga orgánica del agua residual, evaluados en el capítulo anterior

La cantidad y calidad obtenido en la producción es aceptable para la alimentación humana, comercio y como insumo en la industria que el caso amerite.

Económico financiero. En este rubro se indican la evaluación en costos de inversión, egresos en operación y mantenimiento de la empresa EPSAS, no existe ingreso monetario alguno en la planta Puchukollo

Capítulo VII

CUADRO 7-6: Costos de inversión, operación y mantenimiento PTAR Puchukollo

Descripción de la inversión en infraestructura y equipos	Costo [MM\$us]
infraestructura del sistema de lagunas de estabilización, laboratorio y oficinas	8,400
Infraestructura y equipos de Filtros percoladores, estación eléctrica y monitoreo	8,100
Infraestructura de cárcamos de bombeo y bombas sumergibles	1,140
Herramientas y equipos de laboratorio	0,094
Total infraestructura y equipos	17,700
Costos de operación y mantenimiento	
Costos de operación y mantenimiento	Costo [M\$us]
Consumo carburantes y lubricantes	0,333
Consumo de energía eléctrica	105,000
Personal: Técnicos y operadores	116,000
Insumos para laboratorio y otros costos	43,500
Total costo mensual	264,00

Fuente: Elaboración con base en datos del reporte del Gerente técnico EPASAS

El proyecto piloto ha sido ejecutado con el menor costo posible en la implementación, que comparado con otras alternativas en mejora y reúso de agua residual, sin embargo se erogó sumas de dinero significativas en la ejecución como se indica:

CUADRO 7-7: Costo de implementación para riego agrícola.

Maquinaria y equipo	Unidad	Cantidad	Costo [Bs.]
Bomba a gasolina, 5,5 Hp, Cap. 8,3 [l/s]	Unid	1	1500,00
Manguera de succión. Ø 2 pulgadas.	M	7	280,00
Manguera de Impulsión, Ø 2 pulgadas	M	20	1100,00
Bomba ELT, 1Hp, Cap. 1,24[l/s]	Unid	1	1200,00
Tubería de succión, Ø 1 pulgada PVC	M	6	80,00
Mangueras Flexible, Ø 3/4, 3 rollos	M	300	1200,00
Turrones metálicos cap. 200 litros	Pza	5	1000,00
Grifos y otros accesorios	G-Acs	1	600,00

Fuente: Elaboración en base al presupuesto para la ejecución del proyecto

CUADRO 7-8: Costo de implementación para riego agrícola (Continuación).

Maquinaria y equipo	Unidad	Cantidad	Costo [Bs.]
Maquinaria tractor para roturado	Maq/h	1	200,00
Maquinaria tractor para mullido	Maq/h	1	200,00
Semilla de papa para siembra	@	6	210,00
Transporte de Maquinaria y equipos	Viaje	4	1200,00
Personal no calificado (ayudantes)	Jornal /día	8	1200,00
Análisis bromatológico en producto laboratorio (SELADIS)	Costo/ Mstr.	7	5243,00
Análisis de suelo para producción laboratorio (IBTEN)	Costo/ Mstr.	7	2520,00
Análisis de metales en producto laboratorio (COMIBOL)	Costo/Mstrt.	6	500,00
Gastos imprevistos en el proyecto	Mes	6	1500,00
Total inversión del proyecto			19733,00

Fuente: Elaboración en base al presupuesto para la ejecución del proyecto

Desde el punto de vista de inversión en bienes de capital, el proyecto piloto no es factible. La inversión total en función de la cantidad producida de papa, o sea 19733 Bs/437Kg es 45,16 [Bs/Kg], pero en mayor parte de las inversiones están en bienes de capital y son de costos fijos.

Los costos variables no superan el % del costo total, siendo rentable en la segunda época del cultivo, asimismo en otro lugar del terreno rotatorio venidero. Sin embargo se analiza en esta investigación la inversión en función de la producción.

Es decir, ingreso de la papa cosechada y el costo de la semilla, según datos se cosechó 437 Kg equivalente a 35 (@) de papa; precio de venta en el mercado es de 40 [Bs/@]. En la siembra se utilizó 6 arrobas, cuyo costo es de 35[Bs/@]. Evaluando el Beneficio-costo se tiene:

Ingreso por la producción de la Huaycha:

$$35@ * \frac{40Bs}{@} = 1400,00 Bs$$

Costo de semilla para siembra papa Huaycha:

$$6@ * \frac{35 Bs}{@} = 210,00 Bs$$

Calculando la razón de Beneficio-costo se tiene:

$$\frac{Beneficio}{Costo} = \frac{Ingreso por ventas}{costo en semilla} = \frac{1400 Bs}{120 Bs} = 11,67: 1$$

El cuál indica que, por 1 boliviano invertido genera una utilidad neta de 10,67 bolivianos, de los cuales utilizando el 70% para amortizar la inversión existe, valor del dinero 3,20 bolivianos por un boliviano invertido.

Por lo tanto el método propuesto es factible y debe optimizarse aún los costos, realizando una secuencia de proyectos a este rubro.

Social. El proyecto eminentemente involucra a Entidades Estatales, Universidad, poblaciones de la región próximas a la PTAR Puchukollo y pobladoras ribereñas de la cuenca Catari para mejorar el nivel de vida de los productores y consumidores.

Ambiental Se trata de mitigar los contaminantes de las aguas residuales que fluyen del PTAR Puchukollo al cuerpo del rio Seco con carga orgánica y aún no implementado el proceso de la desinfección que está en el proyecto de la empresa EPSAS, para mejorar la descarga al cuerpo receptor de Rio Seco, cuenca Catari y por ende al lago Titicaca.

CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- En la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Puchukollo se presenta caudales de 488 a 505 [l/s] (ingreso) en época de precipitación pluvial y de 382 a 416 [l/s] (salida), se tiene suficiente volumen de agua que se puede aprovechar para el riego agrícola.
- En el diagnóstico sobre el reúso de aguas residuales del PTAR Puchukollo se comprobó, que los pobladores no tienen conocimiento ni técnicas de reúso en el manejo de estas aguas, por tanto es posible inducir a los técnicos y comunarios a la producción agropecuaria en las zonas ribereñas en los municipios indicados y otros.
- El sistema de estanques de pulimento estacionario, como etapa complementaria del tratamiento del efluente de la PTAR Puchukollo, ha permitido la obtención de aguas de mejor calidad y seguras para su uso en riego agrícola. Esta aptitud fue verificada a través de su aplicación en el cultivo de papa bajo riego con diferentes concentraciones de efluente tratado, notándose que las plantas regadas con mayor cantidad de agua residual presentaron mayor resistencia a cambios de temperatura ambientales (heladas) en comparación con las regadas con agua clara.
- Las aguas residuales de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Puchukollo pueden ser reutilizadas en riego agrícola con mayor seguridad si se le añade una etapa más de pulimento con un tiempo de retención de por lo menos 10 días.

Capítulo VIII

- El cultivo de papa no presentó efectos anormales tanto en su productividad como en su desarrollo por el uso del agua tratada en su riego. Por tanto, es posible obtener papas o tubérculos de calidad aceptable.
- Los resultados obtenidos en laboratorios, la papa producida con este método de riego y comparados con las Normas Internacionales cumplen con las especificaciones nutricionales de calidad, por lo tanto es admisible para el consumo humano y otros usos.
- Se recomienda en futuras investigaciones realizar ensayos con otros cultivos, entre ellos: alfa alfa, cebada, trigo y otros andinos, así como también hortalizas. De la misma manera, se deberá realizar la réplica del tratamiento de acabado o pulimento en épocas con mayor y menor temperatura a objeto de determinar su eficiencia en ambos estados.
- Se recomienda a futuras investigaciones estén orientados, no solo a este rubro de riego, también la gestión de aguas residuales industriales reciclando como insumo principal en procesos y otras aplicaciones.
- Indicar también a Instituciones Públicas y Universidades facilitar cierto monto de su presupuesto para la investigación sobre el reúso de las aguas residuales de las PTAR en el país, aún el agua cada día es más escaso debido al creciente de la densidad demográfica en nuestro planeta.
- Por último, se deberán realizar ensayos de desinfección del agua tratada a objeto de ir avanzando en la implementación de procesos terciarios a pequeña escala. De acuerdo con los resultados, podría ser más seguro y efectivo la desinfección con cloro y ozono para el consumo humano.

9 BIBLIOGRAFÍA

- AYERS, R.S. y WESTCOT, D.W., Calidad del agua para la agricultura Estudio FAO: Riego y drenaje No. 29 Roma, FAO, 1977, 85 pp.
- BAKER, R.W. (2004). Microfiltration, Membrane Technology and Applications, Wiley & Sons, Ltd, West Sussex, UK, 275-300.
- BLANCA Elena. JIMÉNEZ Cisneros. Riego agrícola con agua residual y sus implicaciones en la salud. XXVII Congreso interamericano de ingeniería sanitaria y ambiental 2002.
- BRETT, E., Jabez, V.C. 1998. High-shear membrane separation for process and wastewater treatment. Chemical Engineering.
- EGUSQUIZA, B. 1987. Manejo Agronómico de Cultivos Semilleros de papa.
- FAO 2008. La papa y los recursos hídricos (en línea). Consultado en 15 de julio de 2009. Disponible en <http://www.potato2008.org>
- GUROVICH, R.L. 2001. Riego Superficial Tecnificado. 4ª edición ampliada, Ediciones Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile. 615 p.
- HERNÁNDEZ S., FERNÁNDEZ C. Y BAUTISTA L. 2007. Metodología de la investigación Cuarta edición. Impreso en México
- HUAMÁN, Z. 1986. Botánica y Morfología de la papa. Boletín de información técnica N° 6 (CIP) Editorial Hemisferio Sur. Lima, Perú. 22 p.
- JARAMILLO PÁEZ, C., JARAMILLO GIRALDO, A., TABORDA OCAMPO, G. 2005 Construcción de un reactor electroquímico para electrocoagulación como método alternativo en la descontaminación de aguas residuales. Revista Universidad de Caldas (Manizales). Vol. 25. N° 02..

Bibliografía

- JIMÉNEZ B, AND CHÁVEZ A. 1997. Treatment of Mexico City Wastewater for Irrigation Purpose. Environmental.
- LARA J. 1999. Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales. Instituto Catalán de Tecnología. Barcelona, España.
- LEÓN, G.; MOSCOSO, J. 1995. Estrategias para el uso de efluentes de Lagunas de Estabilización en América Latina - el modelo de acuicultura en Lima,
- LUCAS, A. 2005. Evaluación de Diferentes Especies de Plantas Acuáticas en Depuración de Aguas residuales con Humedales Subsuperficial. Departamento De Ingeniería Química. Universidad De Castilla La Mancha. Ciudad Real. España.
- MANGA C. JOSÉ; MOLINARES NELSON; ARRIETA JORGE. 2007. Tratamiento de aguas residuales mediante sistema de lagunaje. Barranquilla Colombia.
- MEMORIA ANUAL. EPSAS 2013. La Paz Bolivia.
- METCALF & Hedí (1998) higiene de agua residuales tratado vertido y reutilización volumen I y II. Mc Mc Grawhill, Madrid
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y AGUA, “Plan sectorial de desarrollo de saneamiento básico, 2011 – 2015”.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y AGUA, “Situación actual del reúso de aguas residuales tratadas y no tratadas en Bolivia”, julio de 2013.
- MOSCOSO, J. 1993. Estudio de caso sobre el reúso de las aguas residuales en el Perú. Taller Regional para las Américas OMS-FAO-CNUAH-PNUMA
- PLAN DESARROLLO MUNICIPAL PDM Viacha 2011.

Bibliografía

- PROINPA, 1998. Programa de Investigación de la Papa, Informe Compendio del Documento de Trabajo 9/95. Cochabamba-Bolivia.
- RAMALHO R.2002 “Tratamiento de aguas residuales”. España: Reverte.
- RODRÍGUEZ J.J., JIMÉNEZ V., TRUJILLO O., VEZA J.M. , 2002. Reuse of reverse osmosis membranes wastewater treatment in advanced. Desalination
- ROMERO ROJAS, JAIRO A. 1994. Lagunas de estabilización de aguas residuales. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- RONALD Y TCHOBANOGLOUS GEORGE, 2009. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones” Primera edición. Impreso en Colombia.
- RUFINO MOYA CALDERON. .Probabilidades y Estadística inferencial Edición 1990. Lima Perú. Editorial San Marcos
- RUFINO MOYA CALDERON. Estadística descriptiva conceptos y aplicaciones. Edición 1991. Lima Perú. Editorial San Marcos
- SÁENZ FORERO, R. Modernización y avances en el uso de aguas negras para irrigación; Washington, Documento: OPS. 1994
- SENARI 2007. Servicio Nacional de Riego. Plan Nacional de desarrollo del riego “Para vivir bien”. Ministerio del Agua. Viceministerio de riego. La Paz Bolivia. p 24. SEPA, 2007.

Anexo A

ANEXO A1: Especies cultivados en municipios de Pucarani y Viacha

N°	Origen de las personas encuestadas		Especies cultivadas en hectáreas [ha]						
	Comunidad	Municipio	Papa	Oca	Haba	Cebada	Avena	Quinua	Cebolla
1	Mercedario	El Alto	1	0	0,25	1	0	0	0,5
2	Cohachijo	Pucarani- Cohana	0,25	0,25	1,25	1	1	0,5	0,1
3	Quenacagua Alta	Pucarani- Cohana	1	0	0,5	1	1	0	0,2
4	Cohachijo	Pucarani- Cohana	0,5	0,1	0,25	1	1	0	0
5	Quenacagua Alta	Pucarani- Cohana	1	0,2	0,5	1,5	1,5	0,25	0,1
6	Quenacagua Baja	Pucarani- Cohana	0,5	0,1	0,25	1	1	0,1	0,05
7	Quenacagua Alta	Pucarani- Cohana	1	0	0,25	1	0,5	0	0,05
8	Pallcoso Contorno	Viacha	0,5	0	0,25	1	0,25	0	0
9	Pallcoso Contorno	Viacha	1	0	0,25	1,5	1	0	0
10	Huanokollo	Viacha	1	0	0,25	1	0,5	0	0
11	Keluyo	Viacha	2	0,1	0,5	2	1	0	0,2
12	Mamani	Viacha	1	0	0,25	2	2	0,1	0
13	Mamani	Viacha	2	0	0,5	1	2	0	0,1
14	Chonchocoro	Viacha	2	0,1	0,5	2,5	3	0,5	0
15	Chonchocoro	Viacha	2	0	0,25	2	2	0,1	0
Totales			16,75	0,85	6	20,5	17,75	1,55	1,3
Municipios productores		Pucarani	0,7	0,1	0,5	1,1	1,0	0,1	0,1
en promedio		Viacha	1,4	0,03	0,3	1,6	1,5	0,1	0,04

Fuente: Elaboración con base a datos de entrevistas y encuestas

ANEXO A2: Calidad de abono usado por los comunarios del lugar

N°	Lugar de origen de los comunarios		Calidad de abono usado				
	Comunidad	Municipio	Usa abono	Bovino	Ovino	Porcino	Qmc+ Estiércol
1	Mercedario	El Alto	SI	SI	NO	NO	SI
2	Cohachijo	Pucarani-Cohana	SI	SI	SI	NO	SI
3	Quenacagua Alta	Pucarani-Cohana	SI	SI	SI	SI	SI
4	Cohachijo	Pucarani-Cohana	SI	SI	SI	NO	NO
5	Quenacagua Alta	Pucarani-Cohana	SI	SI	SI	SI	SI
6	Quenacagua Baja	Pucarani-Cohana	SI	SI	SI	NO	NO
7	Quenacagua Alta	Pucarani-Cohana	NO	SI	SI	SI	NO
8	Pallcoso Contorno	Viacha	SI	SI	SI	NO	NO
9	Pallcoso Contorno	Viacha	SI	SI	SI	SI	NO
10	Huanokollo	Viacha	SI	NO	SI	SI	NO
11	Keluyo	Viacha	SI	SI	SI	NO	NO
12	Mamani	Viacha	SI	SI	SI	NO	NO
13	Mamani	Viacha	SI	SI	NO	NO	NO
14	Chonchocoro	Viacha	SI	SI	SI	NO	NO
15	Chonchocoro	Viacha	SI	SI	NO	NO	NO
TOTALES: SÍ			14	14	12	5	4
TOTALES: NO			1	1	3	10	11
Análisis porcentual				40%	34%	14%	11%

Fuente: Elaboración propia con base a datos registrados de la encuesta.

ANEXO A3: Especies producidas para el consumo y comercialización

Encuesta	Especies producidas						Comercialización			
	Papa	Chuño	Quinoa	Leche	Haba	Otros	Consumo	Ventas en casa	Ferías prov.	Ferías Urbanas
1	SI	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO
2	SI	SI	NO	SI	SI	NO	SI	SI	NO	SI
3	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	NO
4	SI	NO	SI	NO	NO	NO	SI	SI	SI	NO
5	SI	SI	NO	SI	NO	SI	SI	SI	NO	SI
6	SI	SI	SI	NO	NO	SI	SI	NO	SI	NO
7	SI	SI	SI	NO	NO	SI	SI	SI	SI	NO
8	SI	SI	NO	NO	NO	SI	SI	NO	NO	NO
9	SI	SI	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	NO
10	SI	SI	NO	NO	NO	SI	SI	SI	NO	NO
11	SI	SI	SI	SI	NO	NO	SI	NO	SI	NO
12	SI	SI	SI	SI	NO	NO	SI	NO	SI	SI
13	SI	SI	SI	NO	NO	NO	SI	NO	SI	SI
14	SI	SI	SI	NO	NO	SI	SI	NO	SI	NO
15	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	NO	SI	SI
T.SÍ	40	14	9	6	3	8	15	6	10	5
T.NO	0	1	5	8	11	6	0	8	4	9
A. porcentual		35%	23%	15%	8%	20%				

Fuente: Elaboración propia con base a datos registrados de la encuesta.

ANEXO A4: Precio de venta de los productos en ferias

N°	Comunidad	Precio de venta de los productos en ferias [Bs/@ ; Bs/l]				
		Papa	Chuño	Quinua	Haba	Leche
1	Mercedario	40	60	70	35	7
2	Cohachijo	30	50	50	40	6
3	Quenacagua Alta	30	50	70	50	10
4	Cohachijo	30	60	50	40	8
5	Quenacagua Alta	30	70	80	45	7
6	Quenacagua Baja	30	60	70	45	8
7	Quenacagua Alta	40	80	80	50	7
8	Pallcoso Contorrno	40	60	65	40	8
9	Pallcoso Contorrno	30	80	65	50	7
10	Huanokollo	40	60	60	40	6
11	Keluyo	30	70	80	45	7
12	Mamani	30	60	80	50	10
13	Mamani	40	80	80	45	7
14	Chonchocoro	35	70	80	40	8
15	Chonchocoro	30	70	80	40	10
Promedio		33,67	65,33	70,67	43,67	7,73
Desv. Standart		4,64	9,57	10,47	4,64	1,29

Fuente: Elaboración propia con base a datos registrados de la encuesta

ANEXO A5: Provisión de agua para riego de sembradíos

Encuesta	Provisión de agua para riego			
	Pozo	Manantial	Agua de lluvia	Agua residual
1	NO	SI	SI	SI
2	NO	NO	SI	NO
3	NO	NO	SI	NO
4	SI	NO	SI	NO
5	NO	SI	SI	NO
6	NO	SI	SI	NO
7	SI	NO	SI	NO
8	NO	NO	SI	NO
9	NO	NO	SI	NO
10	NO	NO	SI	NO
11	SI	NO	SI	NO
12	NO	NO	SI	NO
13	NO	NO	SI	NO
14	NO	NO	SI	SI
15	NO	NO	SI	NO
Total SI	3	3	15	2
	12	12	0	13
23	13%	13%	65%	9%

Fuente: Elaboración propia con base a datos registrados de la encuesta

ANEXO A6: Tipos y periodos de riego

Encuesta	Tipo y método de riego				Periodos de riego		
	Particular	Comunal	Inundación	Surco	Cada 15 días	Cada mes	Temporal por lluvia
1	SI	NO	NO	SI	SI	NO	SI
2	SI	NO	NO	SI	NO	NO	SI
3	SI	NO	NO	SI	NO	NO	SI
4	SI	NO	NO	SI	NO	SI	SI
5	SI	NO	SI	NO	NO	SI	SI
6	SI	NO	NO	SI	NO	SI	SI
7	SI	NO	NO	SI	SI	NO	SI
8	NO	SI	NO	SI	NO	NO	SI
9	NO	SI	SI	SI	NO	NO	SI
10	SI	NO	NO	NO	NO	NO	SI
11	NO	SI	NO	SI	SI	NO	SI
12	SI	NO	NO	SI	NO	NO	SI
13	SI	NO	NO	SI	NO	NO	SI
14	SI	NO	SI	SI	NO	NO	SI
15	SI	NO	NO	SI	NO	NO	SI
T. SI	12	3	3	13	3	3	15
T. NO	3	12	12	2	12	12	0
21	Tiempos de riego en los cultivos %				14%	14%	71%

Fuente: Elaboración propia con base a datos registrados de la encuesta

ANEXO A7: Mantenimiento de pozos y organización comunal

Encuesta	Tiempo de mantenimiento			Organización en limpieza		
	Mes	Año	Más de 1 año	Individual	Comité	No existe
1	NO	NO	SI	NO	NO	SI
2	NO	SI	NO	SI	NO	SI
3	NO	SI	NO	SI	NO	SI
4	SI	SI	NO	SI	NO	SI
5	NO	NO	SI	SI	NO	SI
6	SI	NO	NO	SI	NO	SI
7	NO	SI	NO	SI	SI	NO
8	NO	SI	NO	NO	SI	NO
9	SI	NO	NO	SI	NO	SI
10	SI	NO	NO	SI	NO	SI
11	NO	SI	NO	SI	NO	SI
12	NO	SI	NO	SI	NO	SI
13	SI	SI	NO	SI	NO	SI
14	NO	SI	NO	NO	SI	NO
15	NO	SI	NO	SI	NO	SI
T. SI	5	10	2	12	3	12
T. NO	9	4	13	2	11	3
	29%	59%	12%	44%	11%	44%

Fuente: Elaboración propia con base a datos registrados de la encuesta

ANEXO A8: Efectos del uso de agua residual y equipos de protección

Encuesta	Efectos en uso de agua residual					Uso de indumentaria			
	Uso	Mejora su economía	Presencia de plagas	Enfermedad fitosanitaria	Frutos deformes	Guantes	Botas	Otras	Ninguno
1	SI	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO	NO
2	SI	NO	NO	SI	SI	NO	NO	NO	SI
3	SI	NO	NO	SI	NO	NO	SI	NO	NO
4	NO	NO	SI	SI	SI	NO	SI	NO	NO
5	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI
6	NO	NO	NO	SI	SI	NO	SI	NO	NO
7	SI	NO	NO	NO	SI	NO	SI	NO	NO
8	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	NO
9	NO	NO	SI	SI	SI	NO	SI	NO	NO
10	SI	NO	NO	NO	SI	NO	SI	NO	NO
11	NO	NO	NO	SI	NO	NO	SI	SI	NO
12	NO	NO	NO	NO	SI	NO	SI	NO	NO
13	NO	NO	NO	SI	SI	NO	SI	NO	NO
14	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI
15	SI	NO	NO	SI	SI	SI	SI	NO	NO
T. SI	7	1	3	11	10	2	12	2	3
T. NO	8	13	12	3	4	12	3	12	11
A. en porcentaje			13%	46%	42%	11%	63%	11%	16%

Fuente: Elaboración propia con base a datos registrados de la encuesta

ANEXO A9: Efectos en suelos por el uso de aguas residuales

Encuesta	Rendimiento		Efecto en capa vegetativa			Cambia en la estructura		
	Mismo cultivo	Producción	Exceso nutrientes	Salinización	Toxicidad	Escurre rápido	Mantiene húmedo	Endurece en seco
1	SI	NO	NO	NO	SI	NO	SI	NO
2	NO	NO	NO	SI	NO	NO	SI	SI
3	SI	NO	NO	SI	SI	NO	SI	SI
4	SI	NO	NO	NO	SI	SI	NO	SI
5	SI	NO	SI	SI	NO	NO	NO	SI
6	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI
7	NO	NO	NO	SI	SI	SI	NO	SI
8	SI	NO	NO	SI	NO	SI	NO	SI
9	SI	NO	NO	SI	SI	NO	SI	NO
10	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI
11	NO	NO	NO	SI	SI	SI	NO	SI
12	NO	NO	NO	SI	NO	NO	SI	NO
13	SI	NO	NO	SI	NO	SI	NO	SI
14	SI	NO	NO	SI	SI	NO	SI	SI
15	SI	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI
T. SI	10	2	2	13	9	7	8	12
T. NO	5	12	12	1	6	7	7	2
Porcentajes			8%	54%	38%	26%	30%	44%

Fuente: Elaboración propia con base a datos registrados de la encuesta

ANEXO A10: Efectos de agua residual en la fauna y flora

Encuesta	Agua para bebederos			Agua para cultivo de forrajes			Especies producidas		
	Pozo	Atajado	Agua Residual	Manantial	Agua de lluvia	Agua residual	Cebada	Avena	Pasto natural
1	SI	NO	SI	NO	SI	NO	NO	NO	SI
2	NO	SI	SI	NO	SI	NO	SI	SI	SI
3	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	NO
4	SI	SI	NO	NO	SI	SI	SI	NO	SI
5	NO	NO	SI	NO	SI	NO	SI	SI	SI
6	SI	NO	NO	NO	SI	NO	SI	SI	SI
7	SI	SI	NO	NO	SI	NO	SI	NO	NO
8	SI	NO	SI	NO	SI	SI	SI	SI	NO
9	SI	SI	NO	NO	SI	NO	NO	NO	SI
10	SI	NO	NO	NO	SI	NO	SI	SI	NO
11	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	NO	SI
12	SI	SI	NO	NO	SI	NO	SI	SI	SI
13	SI	SI	NO	NO	SI	NO	SI	SI	SI
14	NO	SI	SI	NO	SI	NO	SI	SI	SI
15	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO
T. SI	12	10	7	3	15	4	13	10	10
T. NO	3	4	8	11	0	10	1	4	5
	41%	34%	24%	14%	68%	18%	35%	27%	27%

Fuente: Elaboración propia con base a datos registrados de la encuesta

ANEXO A11: Sanidad y producción ganadera de las familias ribereñas

Encuesta	Ganado por familia			Precio de ganados [Bs./Unidad]			Ingreso por familia [Bs.]
	Bovino	Ovino	Porcino	Bovino	Ovino	Porcino	
1	3	40	3	2 000	170	150	13 250
2	13	22	3	1 500	150	200	23 400
3	15	15	4	1 000	150	100	17 650
4	10	15	4	2 000	200	300	24 200
5	10	20	4	1 500	200	350	20 400
6	10	40	3	2 500	200	150	33 450
7	3	15	3	1 000	150	200	5 850
8	7	70	3	2 500	140	250	28 050
9	7	40	3	2 000	200	300	22 900
10	10	20	0	2 500	200	150	29 000
11	15	30	0	2 000	200	150	36 000
12	10	20	3	1 500	200	300	19 900
13	5	40	5	1 600	200	200	17 000
14	15	30	4	1 500	200	300	29 700
15	8	15	4	2 000	150	300	19 450
Promedios	9	29	3	1 807	181	227	22 680
Pucarani	10	21	4	1 583	175	217	20 825
Viacha	10	33	3	1 950	186	244	25 250

Fuente: Elaboración propia con base a datos registrados de la encuesta

ANEXO A12: Efectos de en la salud de los agricultores y su familia

Encuesta	Efectos en Salud	Enfermedades en familias			Efectos por contacto en agua residual		
		Dolores de estomago	Nauseas al comer	Gripe permanente	Hongos en pies y manos	Dolor de la vista	Reumatismo
1	SI	SI	SI	NO	NO	SI	SI
2	SI	SI	NO	SI	NO	NO	SI
3	NO	SI	SI	NO	SI	SI	NO
4	NO	SI	SI	NO	SI	SI	SI
5	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI
6	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO
7	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI
8	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
9	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO
10	SI	SI	NO	NO	SI	SI	NO
11	SI	SI	NO	NO	NO	SI	NO
12	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI
13	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
14	NO	NO	SI	NO	SI	SI	NO
15	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO
T. SI	10	14	12	5	11	14	8
T. NO	5	1	3	9	3	1	7
% SI	67%	45%	39%	16%	33%	42%	24%

Fuente: Elaboración propia con base a datos registrados de la encuesta

ANEXO A13: Posibles efectos socioeconómicos

Encuesta	Uso de agua residual		
	Problema en venta	Ayuda a la economía	No Responde
1	SI	SI	NO
2	NO	NO	SI
3	SI	NO	NO
4	SI	NO	NO
5	SI	SI	NO
6	SI	NO	NO
7	NO	NO	SI
8	SI	SI	NO
9	NO	NO	SI
10	SI	SI	NO
11	SI	NO	NO
12	NO	SI	NO
13	NO	NO	SI
14	NO	NO	SI
15	SI	NO	NO
T. SI	9	5	5
T. NO	6	10	8
%	47%	26%	26%

Fuente: Elaboración propia con base a datos registrados de la encuesta

Anexo B

ANEXO B1: Análisis de raíces en LAB de VRHR

Análisis en muestras de las raíces de papa (VRHR)				
N°	Muestras en Tratamientos	Parámetros Fisicoquímicos		
		Temperatura [°C)	pH	Conductividad [μS/cm]
1	T11	18,5	7,4	240,0
2	T12	18,1	7,5	467,0
3	T13	18,3	7,5	379,0
4	T21	18,0	7,5	51,0
5	T22	7,2	8,1	362,0
6	T23	18,0	7,6	616,0
7	T31	18,1	6,0	266,0
8	T32	18,0	7,4	378,0
9	T33	17,8	6,1	387,0
10	T41	18,0	7,0	263,0
11	T42	17,9	7,2	500,0
12	T43	18,0	6,9	1893,0
13	T51	18,2	6,8	1704,0
14	T52	18,3	6,7	283,0
15	T53	18,1	6,7	283,0

Fuente: Elaboración propia con base a datos registrados en la planta piloto

ANEXO B2: Análisis de suelos en LAB de VRHR

Análisis de suelo en parcelas de experimentación (VRHR)				
N°	Muestras en Tratamientos	Parámetros Fisicoquímicos		
		Temperatura [°C)	pH	Conductividad [μS/cm]
1	T11	17,2	6,5	275,0
2	T12	17,0	6,8	291,0
3	T13	17,2	6,6	293,0
4	T21	17,1	6,5	347,0
5	T22	17,3	6,8	328,0
6	T23	17,1	6,4	283,0
7	T31	17,1	6,8	286,0
8	T32	16,7	6,5	277,0
9	T33	16,9	6,8	350,0
10	T41	17,0	6,7	259,0
11	T42	16,9	6,4	303,0
12	T43	17,5	6,7	312,0
13	T51	16,7	6,7	270,0
14	T52	17,1	6,7	262,0
15	T53	17,2	6,7	272,0

Fuente: Elaboración propia con base a datos registrados en la planta piloto

Anexos

ANEXO B3: Análisis de suelo realizado en LAB de IBTEN

Resultados obtenidos de las muestras de suelo en Laboratorio									
Párametros	Método	Unidad	TI- C100%AR	TI- R95%AR	TII- 75%AR	TIII- 50%AR	TIV- 25%AR	TV- 0%AR	SIN TRAT.
Carbonatos libres	Reacción ácida		P	P	P	P	P	P	P
pH en agua 1:5	Potenciometría		6,180	6,350	6,160	6,210	6,490	6,260	6,720
pH en KCl 1N 1:5	Potenciometría		6,130	6,230	6,060	6,140	6,310	6,190	6,660
Conductividad eléctrica	Potenciometría	dS/m	0,636	0,327	0,547	0,525	0,491	0,399	0,190
CATIONES DE CAMBIO	Acidez, cambio (Al+H)	meq/100g	0,043	0,022	0,033	0,022	0,022	0,022	0,043
	Calcio	meq/100g	7,900	10,200	10,150	11,200	11,420	10,250	6,720
	Magnesio	meq/100g	2,830	2,920	3,240	3,140	3,330	3,070	1,480
	Sodio	meq/100g	1,220	0,340	0,350	0,310	0,340	0,770	0,140
	Potasio	meq/100g	1,060	1,090	1,080	1,150	1,300	1,070	1,600
Fósforo asimilable	Espectrometría UV-visible	ppm	38,770	66,010	64,070	81,850	73,520	72,540	66,430
Materia orgánica	Walkley Black	%	3,900	3,590	4,330	4,370	4,370	4,210	2,340
Nitrogeno Total	Kjeldahl	%	0,200	0,190	0,220	0,210	0,210	0,210	0,120
Hierro	Absorción atómica	ppm	428,820	414,750	439,320	468,720	406,140	434,700	172,200
Zinc	Absorción atómica	ppm	26,620	31,700	29,940	30,810	29,850	31,390	24,680
Cobalto	Absorción atómica	ppm	9,970	20,670	9,270	16,450	23,290	18,270	0,070
Boro disponible	Emisión atómica	ppm	0,927	1,536	1,702	0,816	0,982	1,065	1,370
Arsénico	Fluorescencia de rayosX	ppm	37,595	44,435	28,857	34,191	45,784	40,573	35,105
Cadmio	Fluorescencia de rayosX	ppm	<1,30	<1,30	<1,30	<1,30	<1,30	<1,30	<1,30
Plomo	Fluorescencia de rayosX	ppm	41,693	42,161	50,789	46,768	41,576	48,095	43,606

Fuente: Elaboración propia con base a datos registrados del análisis.

Anexos

ANEXO B4: Monitoreo de los parámetros en épocas de riego en las parcelas

MONITOREO DE PARAMETROS 27 -01-15				
Tratamientos	Temperatura [°C]	Ph	Conductividad [µs]	Solidos suspendidos. [mg]
T-1	13,3	8,99	1550	
T-2	17	8,06	1500	
T-3	16,2	7,99	1450	
T-4	16,4	7,85	980	
T-5	14	7,78	750	
MONITOREO DE PARAMETROS 10-02-15				
T-1	8,7	9,4	1100	
T-2	8,6	8,34	1500	
T-3	8,6	8,23	1260	
T-4	9,5	8,07	1010	
T-5	8,12	7,97	740	
MONITOREO DE PARAMETROS 15-03 - 15				
T-1	11,8	9,43	1500	850
T-2	14,3	8,2	1480	740
T-3	13,3	8,07	1280	640
T-4	13,2	7,85	1000	500
T-5	10,9	7,87	760	380
MONITOREO DE PARAMETROS 21-04-15				
T-1	14,5	8,39	1500	750
T-2	15,6	8,23	1350	690
T-3	15,7	8,06	1160	580
T-4	16,3	7,85	920	450
T-5	16,6	7,88	690	340
MONITOREO DE PARAMETROS 28-04-15				
T-1	12,1	8,81	1310	650
T-2	13,8	8,16	1390	690
T-3	13,7	8,04	1190	590
T-4	13,5	7,87	940	460
T-5	12,7	7,87	690	350
MONITOREO DE PARAMETROS 05-05-15				
T-1	17,5	9,05	1130	670
T-2	12,7	8,33	1410	700
T-3	11,8	8,14	1220	600
T-4	11,5	8,04	960	480
T-5	9,7	7,91	730	370
MONITOREO DE PARAMETROS 20-05-15				
T-1	7,8	9,28	1140	770
T-2	10,08	8,43	1480	740
T-3	11,1	8,31	1270	630
T-4	11,3	8,23	990	490
T-5	10,2	8,18	760	380

Fuente: Elaboración propia con base a datos registrados del análisis.

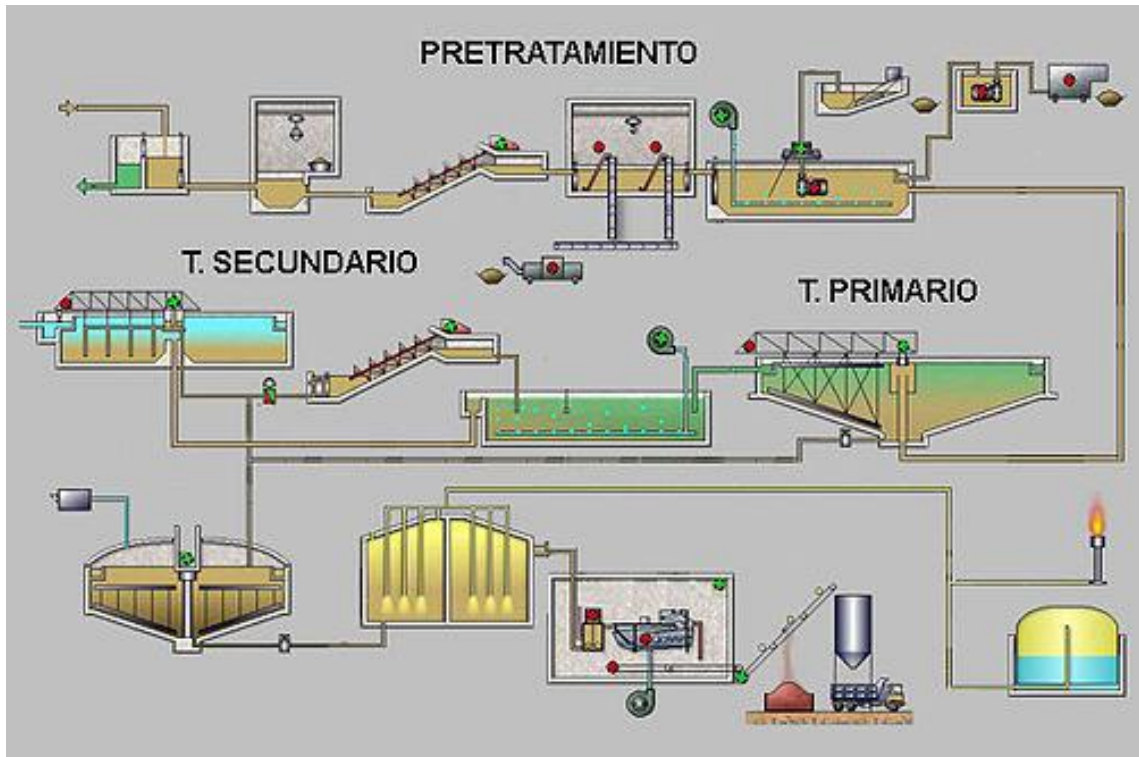
ANEXO B5: Tamaño comparativo de la cosecha con tratamientos diferentes

MUESTRA DE PATATAS POR TAMAÑO (DIAMETRO) EN [cm]						
N°	MUESTRA	T I-RC1	T I- RC2	T I- RC3	T I-RC4	T I- RC5
1	Grupo T I- RC	8,500	5,500	4,500	3,300	2,400
2		7,500	5,700	4,400	3,800	2,800
3		8,000	5,000	5,500	3,200	2,800
4		7,000	5,600	4,700	3,500	2,700
5		6,500	5,100	4,600	3,100	2,500
PROMEDIOS		7,500	5,380	4,740	3,380	2,640
N°	MUESTRA	T I-R1	T I- R2	T I - R3	T I-R4	TI- R5
1	Grupo T I- R	6,680	5,300	4,500	3,800	2,700
2		6,400	5,000	4,200	3,500	2,600
3		7,200	5,600	4,800	3,700	3,100
4		6,800	5,200	4,700	3,600	0,000
5		6,500	5,000	4,600	3,900	2,900
PROMEDIOS		6,716	5,220	4,560	3,700	2,260
N°	MUESTRA	T II- 1	T II- 2	T II - 3	T II- 4	T II-5
1	Grupo T II	9,000	5,700	4,600	3,700	2,900
2		7,820	5,600	4,700	3,900	2,700
3		6,800	5,250	4,400	3,500	2,800
4		6,750	5,100	4,200	3,600	2,600
5		6,600	5,300	4,800	3,400	2,900
PROMEDIOS		7,394	5,390	4,540	3,620	2,780
N°	MUESTRA	T III- 1	T III- 2	T III - 3	T III- 4	TIII- 5
1	Grupo T III	7,000	5,800	4,700	4,000	3,500
2		6,900	5,400	4,600	4,100	3,100
3		7,300	6,100	4,400	3,900	2,800
4		6,800	5,700	4,800	3,700	2,900
5		6,700	5,900	4,300	3,800	2,700
PROMEDIOS		6,940	5,780	4,560	3,900	3,000
N°	MUESTRA	T IV - 1	T IV - 2	T IV - 3	T IV - 4	TIV - 5
1	Grupo T IV	8,800	6,000	4,800	4,000	3,000
2		8,300	5,800	5,100	3,850	3,200
3		8,100	6,500	4,700	4,100	2,800
4		7,800	5,700	5,500	4,200	3,100
5		7,700	6,400	5,200	3,900	2,900
PROMEDIOS		8,140	6,080	5,060	4,010	3,000
N°	MUESTRA	T V- 1	T V - 2	T V - 3	T V - 4	T V - 5
1	Grupo T V	9,000	6,100	5,200	4,100	2,800
2		7,500	6,000	4,800	4,200	3.0
3		8,400	6,200	5,100	4,000	3,200
4		7,200	5,900	5,000	4,300	2,700
5		7,100	5,700	4,900	3,900	2,500
PROMEDIOS		7,840	5,980	5,000	4,100	2,800

Fuente: Elaboración propia con base a datos registrados del análisis.

Anexo C

ANEXO C1: Tratamiento del agua residual.



Fuente: imagen de la página web http://es.wikipedia.org/wiki/Aguas_residuales

ANEXO C1: Vista inicial de la laguna anaerobia PTAR Puchukollo



Fuente: Cortesía de la Planta Puchukollo 2014.

ANEXO C2: Traslase de laguna maduración a laguna de pulimento



Fuente: Cortesía de la Planta Puchukollo 2014.

ANEXO C3: Vista de los tres Filtros percoladores PTAR Puchukollo



Fuente: Cortesía de la Planta Puchukollo 2014.

ANEXO C4: Laboratorio para analizar Parámetros principales PTAR



Fuente: Cortesía de la Planta Puchukollo 2014.

ANEXO C5: Vista panorámica de las parcelas de experimentación.



Fuente: Imagen capturado Enero de 2015

ANEXO C6: Toma de agua clara del drenaje de laguna de la serie III para el riego



Fuente: Imagen capturado en Noviembre 2014

ANEXO C7: Salida efluente por el canal Parschall de laguna serie III-6



Fuente: Imagen capturado en Noviembre 2014

ANEXO C8: Canal de desagüe o efluente de la serie III de la Planta Puchukollo



Fuente: Imagen capturado en Diciembre 2014

ANEXO C9: Recipientes para reservorio de aguas tratadas para el riego



Fuente: Imagen capturado en Diciembre de 2014

ANEXO C10: Lectura y control de aguas residuales al 100%



Fuente: Imagen capturado en Enero de 2015

ANEXO C11: Salida del efluente general PTAR al cuerpo del rio Seco



Fuente: Imagen capturado en Febrero de 2015

ANEXO C12: Trayecto del Rio Seco entre las comunidades Chonchocoro y Mamani



Fuente: Imagen capturado Abril de 2015