

**PROPUESTA INTEGRAL DE PEQUEÑA IRRIGACIÓN EN ZONAS DE LADERA
MEDIANTE EL REUSO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA TRATADA CON
MÉTODOS NATURALES, PARA EL MUNICIPIO DE SAN MARCOS GUATEMALA**



CELESTINO DIONICIO ESCOT GÓMEZ

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
ESCUELA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE –EIDENAR-
FACULTAD DE INGENIERÍA
POSGRADO EN INGENIERIA ENFASIS EN INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
2014**

**PROPUESTA INTEGRAL DE PEQUEÑA IRRIGACIÓN EN ZONAS DE LADERA
MEDIANTE EL REUSO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA TRATADA CON
MÉTODOS NATURALES, PARA EL MUNICIPIO DE SAN MARCOS GUATEMALA**



CELESTINO DIONICIO ESCOT GÓMEZ

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Magister en
Ingeniería, Énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Director:
Norberto Urrutia Cobo, Ph.D

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
ESCUELA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE –EIDENAR-
FACULTAD DE INGENIERÍA
POSGRADO EN INGENIERIA ENFASIS EN INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
2014**

CONTENIDO

1. INTRODUCCION	1
2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	3
3. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.....	6
4. OBJETIVOS.....	12
4.1. OBJETIVO GENERAL	12
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
5. MARCO TEÓRICO.....	13
5.1. SOSTENIBILIDAD	13
5.2. AGUAS RESIDUALES Y EL MODELO DE SISTEMAS INTEGRADOS.....	15
5.3. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	16
5.3.1. <i>Objetivos y nivel de tratamiento de aguas residuales</i>	17
5.3.2. <i>Opciones tecnológicas y procesos de tratamiento</i>	21
5.4. SELECCIÓN DE TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES	33
5.5. RIEGO	35
5.5.1. <i>Definición</i>	36
5.5.2. <i>Proyectos de irrigación de pequeña escala</i>	37
5.5.3. <i>Aspectos organizacionales</i>	38
5.5.4. <i>Infraestructura hidráulica</i>	41
5.5.5. <i>Operación y mantenimiento del sistema de riego</i>	47
5.5.6. <i>Manejo del sistema de riego</i>	48
5.6. NORMATIVIDAD INTERNACIONAL Y NACIONAL DEL REUSO DE AGUA RESIDUAL	49
6. METODOLOGÍA	52
6.1. FASE I: CRITERIOS DE SELECCIÓN DE MÉTODOS NATURALES PARA EL TRATAMIENTO COMPLEMENTARIO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA PARA EL REUSO AGRÍCOLA EN ZONAS DE LADERA EN SAN MARCOS.....	53
6.2. FASE II: SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA MÁS APROPIADA PARA EL TRATAMIENTO COMPLEMENTARIO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA TRATADA PARA EL CASO DEL MUNICIPIO DE SAN MARCOS.....	55
6.3. FASE III: SELECCIÓN DEL MÉTODO DE RIEGO MÁS APROPIADO DE ACUERDO LAS CONDICIONES DE SAN MARCOS	56
6.4. FASE IV: PROPUESTA DE INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA DEL SISTEMA DE RIEGO PARA EL CASO DE SAN MARCOS.....	57
6.4.1. <i>Determinación demanda hídrica</i>	58
6.4.1.1. <i>Análisis de la precipitación</i>	58
6.4.1.2. <i>Cálculo de la evapotranspiración de referencia</i>	59

6.4.1.3. Cálculo de requerimientos hídricos de los cultivos	59
6.4.1.4. Necesidades de riego netas	59
6.4.1.5. Eficiencia del proyecto	60
6.4.1.6. Necesidades de riego totales	60
6.4.1.7. Determinación de caudales	60
6.4.2. <i>Diseño predial tipo</i>	60
6.4.2.1. Diseño agronómico	61
6.4.2.2. Diseño hidráulico predial	63
6.4.3. <i>Diseño hidráulico de la red de conducción y distribución</i>	64
6.4.4. <i>Estimación de costos de la infraestructura de riego</i>	65
6.5. FASE V: DIMENSIONAMIENTO DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL COMO UNIDAD DE TRATAMIENTO COMPLEMENTARIO DEL AGUA RESIDUAL	65
6.5.1. <i>Consideración y selección del tipo de planta</i>	65
6.5.2. <i>Determinación de la Constante de Velocidad de Reacción (K_1)</i>	65
6.5.3. <i>Área del Humedal</i>	66
6.5.4. <i>Tiempo de Retención Hidráulica (θ)</i>	66
6.5.5. <i>Dimensiones del Humedal</i>	66
6.5.6. <i>Remoción de Sólidos Suspendidos (SS)</i>	67
6.5.7. <i>Remoción de coliformes fecales</i>	67
6.6. FASE VI: PROPUESTA ORGANIZACIONAL PARA EL MANEJO Y OPERACIÓN DEL SISTEMA DE RIEGO PROPUESTO	68
6.7. FASE VII: ESTRUCTURACIÓN DE LA PROPUESTA	68
7. RESULTADOS Y ANALISIS	69
7.1. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE MÉTODOS NATURALES PARA EL TRATAMIENTO COMPLEMENTARIO DEL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA PARA EL REUSO AGRÍCOLA EN ZONAS DE LADERA EN SAN MARCOS	69
7.2. SELECCIÓN DE ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO COMPLEMENTARIO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA Y DEL SISTEMA DE RIEGO PARA EL CASO DE SAN MARCOS	71
7.2.1. <i>Selección de alternativa para el tratamiento complementario de agua residual doméstica</i>	71
7.2.1.1. Potencial de reuso de agua residual en el área periurbana del municipio de San Marcos.	72
7.2.1.2. Percepción sobre el reuso de agua residual tratada de productores y pobladores ubicados en el área de estudio	73
7.2.1.3. Selección de alternativa para el tratamiento complementario de agua residual doméstica	75
7.2.2. <i>Selección del método de riego para el caso de San Marcos</i>	85
7.3. DIMENSIONAMIENTO DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL COMO UNIDAD DE TRATAMIENTO COMPLEMENTARIO	87
7.4. PROPUESTA DE INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA Y ORGANIZACIONAL PARA EL MANEJO Y OPERACIÓN DEL SISTEMA DE RIEGO PARA EL CASO DE SAN MARCOS	91
7.4.1. <i>Propuesta de infraestructura hidráulica del sistema de riego para el caso de San Marcos.</i> 91	

7.4.1.1. Determinación demanda hídrica	91
7.4.1.2. Diseño predial tipo.....	97
7.4.1.3. Diseño hidráulico de la red de conducción y distribución	100
7.4.2. <i>Propuesta organizacional para la administración, operación y mantenimiento del sistema de integral.....</i>	<i>103</i>
7.4.2.1. Estructura de la organización.....	104
7.4.2.2. Funciones de la estructura organizativa propuesta	105
7.4.2.3. Institucionalidad de la organización	110
7.4.3. <i>Propuesta de operación, mantenimiento y administración del sistema</i>	<i>112</i>
7.5. ESQUEMA INTEGRAL DE TRATAMIENTO Y REUSO DEL AGUA RESIDUAL EN ZONAS DE LADERA DEL MUNICIPIO DE SAN MARCOS.....	113
7.5.1. <i>Componente de gestión e implementación de la propuesta.....</i>	<i>114</i>
7.5.2. <i>Componente productivo-agrícola.....</i>	<i>115</i>
7.5.3. <i>Componente de fortalecimiento organizativo y a los productores</i>	<i>118</i>
7.5.4. <i>Costos de implementación de la propuesta</i>	<i>119</i>
7.5.5. <i>Costos de operación, mantenimiento y administración del sistema integral.....</i>	<i>120</i>
8. CONCLUSIONES	122
9. RECOMENDACIONES	124
10. BIBLIOGRAFÍA	125
11. ANEXOS	135

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 2-1. Calidad el efluente de aguas residuales del municipio de San Marcos</i>	<i>4</i>
<i>Tabla 3-1. Principales cultivos empleados para el reuso de aguas residuales domésticas</i>	<i>6</i>
<i>Tabla 3-2. Tratamiento y uso de las aguas residuales en la agricultura, por municipio y departamento en la república de Guatemala</i>	<i>7</i>
<i>Tabla 5-1. Criterios de sostenibilidad en un sistema de riego</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 5-2. Procesos de tratamiento secundario convencional</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 5-3. Ventajas y desventajas de las lagunas de estabilización.</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 5-4. Ventajas y desventajas de los humedales construidos</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 5-5. Ventajas y desventajas de los tratamientos sobre el suelo</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 5-6. Información requerida en los diferentes bloques del modelo conceptual.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 5-7. Ventajas y desventajas de las organizaciones con estructura lineal.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 5-8. Ventajas y desventajas del método de riego por aspersión.</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 5-9. Ventajas y desventajas del método de riego por goteo.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 5-10. Metas basadas en protección de salud para reuso de agua residual en la agricultura</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 5-11. Parámetros físico-químicos de la calidad del agua para riego</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 5-12. Parámetros y límites máximos permisibles por tipo de reuso</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 5-13. Parámetros y límites máximos permisibles del agua residual para reuso.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 6-1. Factores y criterios considerados en el proceso de selección de métodos naturales para el tratamiento complementario del agua residual tratada en el municipio de San Marcos, Guatemala.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 6-2. Ponderación de criterios según el nivel de importancia</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 6-3 Ponderación del nivel de percepción de importancia de los criterios según el actor</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 6-4. Factores técnicos que condicionan la elección del método de riego en la zona de estudio</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 6-5. Factores socioeconómicos que condicionan la elección del método de riego en la zona de estudio.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 6-6 Nivel de asociación e interdependencia de factores</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 6-7. Fuentes de información</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 7-1 Factores y criterios considerados en el proceso de selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales por métodos naturales en la zona periurbana de San Marcos.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 7-2. Criterios más importantes según juicio de actores</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 7-3 Calendario agrícola del municipio de San Marcos</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 7-4. Cultivos potenciales para la zona periurbana del municipio de San Marcos</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 7-5. Límites máximos permitidos y proyección de calidad del agua residual</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 7-6. Bloques y variables consideradas en la Selección de Tecnología</i>	<i>80</i>

<i>Tabla 7-7. Selección del esquema tecnológico para el caso de San Marcos</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 7-8. Descripción de los esquemas tecnológicos preseleccionados</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 7-9. Criterios y variables considerados para la selección de tecnología del tratamiento complementario</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 7-10. Descripción de los esquemas tecnológicos</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 7-11. Características de los principales de los humedales de flujo subsuperficial (HFSS) que condicionan y optimizan la selección.</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 7-12. Factores técnicos que condicionan la elección del método de riego en la zona de estudio</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 7-13. Factores socioeconómicos que condicionan la elección del método de riego en la zona de estudio</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 7-14. Asociación e interdependencia de factores</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 7-15. Parámetros de diseño considerado para el humedal de flujo subsuperficial</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 7-16. Características y dimensionamiento del humedal de flujo subsuperficial</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 7-17. Precipitación incidente y efectiva para 74% probabilidad de excedencia</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 7-18. Datos climáticos promedios y ETo mensual promedio</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 7-19. Plan de cultivos y cálculo requerimiento hídrico de cultivos</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 7-20. Eficiencias del proyecto</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 7-21. Necesidades de riego total y caudal de flujo continuo</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 7-22. Caudal de distribución, volumen demandado y requerimiento de almacenamiento</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 7-23. Resultados diseño agronómico predial</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 7-24. Resultados diseño hidráulico predial</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 7-25. Presión de trabajo de tuberías según RDE</i>	<i>101</i>
<i>Tabla 7-26. Caudales prediales y caudal de la red</i>	<i>101</i>
<i>Tabla 7-27. Funciones principales de los cargos en la Junta Directiva</i>	<i>107</i>
<i>Tabla 7-28. Funciones de los encargados de operación y mantenimiento del sistema integral</i>	<i>108</i>
<i>Tabla 7-29. Área por predio y total por cultivo a implementar en el sistema agroforestal</i>	<i>115</i>
<i>Tabla 7-30. Características principales del cultivo de aguacate variedad Hass</i>	<i>116</i>
<i>Tabla 7-31. Características principales del cultivo de maíz</i>	<i>117</i>
<i>Tabla 7-32. Características principales del cultivo de papa</i>	<i>118</i>
<i>Tabla 7-33. Estimación de costos de inversión de la propuesta integral de reuso de agua residual en el área periurbana de San Marcos</i>	<i>119</i>
<i>Tabla 7-34. Costos de operación, mantenimiento y administración del sistema</i>	<i>120</i>
<i>Tabla 11-1. Longitudes, diámetros, caudales y velocidades de tuberías</i>	<i>142</i>
<i>Tabla 11-2. Cotas, caudales de demanda y presión disponible en nodos</i>	<i>143</i>

<i>Tabla 11-3. Costos desglosados de la construcción del humedal de flujo subsuperficial, valores presentados en Dólares americanos (USD)</i>	148
<i>Tabla 11-4. Costos desglosados de la construcción del tanque de almacenamiento y distribución, valores presentados en Dólares americanos (USD)</i>	148
<i>Tabla 11-5. Costos desglosados de la construcción de la red de conducción y distribución valores presentados en Dólares americanos (USD)</i>	150
<i>Tabla 11-6. Costos desglosados de la construcción del sistema predial, valores presentados en Dólares americanos (USD)</i>	152

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2-1. Ubicación espacial de los cuerpos receptores de las descargas de aguas residuales domesticas en el centro urbano de San Marcos</i>	3
<i>Figura 3-1. Ubicación espacial de los departamentos con tratamiento y uso de agua residual en la agricultura en la República de Guatemala</i>	8
<i>Figura 3-2. Distribución temporal del balance hídrico mensual en el municipio de San Marcos</i>	10
<i>Figura 5-1. Relaciones de los diferentes componentes de la sostenibilidad</i>	14
<i>Figura 5-2. Componentes de tratamiento y reuso del agua residual en el ciclo del agua</i>	16
<i>Figura 5-3. Objetivos de tratamiento y la complejidad del sistema tratamiento de aguas residuales</i>	17
<i>Figura 5-4. Nivel y tipos de tratamiento de aguas residuales</i>	18
<i>Figura 5-5. Diagrama de los procesos de una laguna anaerobia</i>	22
<i>Figura 5-6. Diagrama de una laguna facultativa</i>	23
<i>Figura 5-7. Corte longitudinal de un humedal subsuperficial</i>	25
<i>Figura 5-8. Tratamiento de baja carga</i>	27
<i>Figura 5-9. Trayectorias hidráulicas en sistemas de infiltración rápida</i>	28
<i>Figura 5-10. Esquema del proceso de riego superficial</i>	29
<i>Figura 5-11. Proceso de lodos activados convencional</i>	31
<i>Figura 5-12. Corte de un filtro percolador</i>	31
<i>Figura 5-13. Vista de los componentes de un tanque Imhoff</i>	32
<i>Figura 5-14. Sección transversal de fosa séptica convencional de dos compartimentos</i>	32
<i>Figura 5-15. Esquema general del modelo conceptual SELTAR</i>	34
<i>Figura 5-16. Balance de agua en la zona radicular</i>	36
<i>Figura 5-17. Interacción dimensiones contextuales y estructurales del diseño organizacional</i>	38
<i>Figura 5-18. Estructura típica de una organización de pequeña irrigación</i>	40
<i>Figura 5-19. Formas de captación en pequeñas corrientes de agua</i>	41
<i>Figura 5-20. Esquema de los componentes de la captación de corrientes de agua</i>	42
<i>Figura 5-21. Esquema de la sección de conducción en la infraestructura de riego</i>	43

<i>Figura 5-22. Esquema de la red de distribución en zonas de ladera.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 5-23. Esquema del diseño de un predio tipo</i>	<i>44</i>
<i>Figura 6-1. Ubicación del municipio de San Marcos, Guatemala</i>	<i>52</i>
<i>Figura 7-1. Uso actual del suelo en el área de estudio y área potencial de cultivo.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 7-2. Percepción sobre el reuso de agua residual tratada para actividades productivas</i>	<i>74</i>
<i>Figura 7-3. Disposición de la población a consumir productos agrícolas que provengan de campos irrigados con aguas residuales.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 7-4. Disposición de los productores para utilizar agua residual tratada para la actividad agrícola..</i>	<i>75</i>
<i>Figura 7-5. Ubicación geográfica de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 7-6. Componentes de la planta de planta de tratamiento de aguas residuales de San Marcos</i>	<i>77</i>
<i>Figura 7-7. Configuración de celdas del humedal de flujo subsuperficial.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 7-8. Corte longitudinal de una celda del humedal de flujo subsuperficial.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 7-9 Comportamiento de precipitación de la zona de estudio. Estación San Marcos</i>	<i>91</i>
<i>Figura 7-10. Necesidad de riego neta (NRn) del maíz.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 7-11. Necesidad de riego neta (NRn) del aguacate</i>	<i>94</i>
<i>Figura 7-12. Necesidad de riego neta (NRn) de la papa</i>	<i>94</i>
<i>Figura 7-13. Caudal de flujo continuo, distribución y oferta.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 7-14. Esquema de riego predial.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 7-15. Red de conducción y distribución</i>	<i>103</i>
<i>Figura 7-16. Estructura organizativa propuesta para la administración, operación y mantenimiento del sistema integral</i>	<i>104</i>
<i>Figura 7-17. Esquema integral propuesto para reuso de agua residual en San Marcos</i>	<i>113</i>
<i>Figura 7-18. Corte transversal-longitudinal del perfil del terreno, del cultivo en callejones sembrados en ladera.....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 7-19. Fotografía de parcela tipo para implementación de sistemas agroforestales</i>	<i>116</i>

RESUMEN

El presente documento consiste de una propuesta integral que involucra el tratamiento complementario del agua residual doméstica proveniente de una planta de tratamiento de aguas residuales a construir, la infraestructura hidráulica de riego y la estructura organizativa para el manejo y operación del sistema. La propuesta es una interpretación adecuada de los aspectos sociales, culturales, económicos, técnicos, legales y ambientales de la zona urbana y peri urbana del municipio de San Marcos, del departamento de San Marcos, República de Guatemala.

Esta propuesta surge de la problemática ambiental y productiva de la región. Por un lado, la contaminación de los cuerpos hídricos de San Marcos producto de las descargas de aguas residuales provenientes del centro urbano y peri urbano del municipio generando limitaciones para su uso y riesgos a la salud ambiental. Por otro lado, la ausencia de fuentes de agua para realizar actividades agrícolas y la necesidad de este recurso para aumentar la productividad.

Ante esta situación, se desarrolló el presente estudio, planteando tres objetivos específicos. El primero, fue establecer los criterios de selección de tecnologías para el tratamiento complementario de agua residual domestica para el reuso agrícola, el segundo seleccionar la alternativa más apropiada para el tratamiento complementario de agua residual doméstica y del sistema de riego para el caso de San Marcos; y el tercero, establecer una propuesta de infraestructura hidráulica y organizacional para el manejo y operación del sistema de riego para el caso de San Marcos. Para ello se plantearon metodologías adecuadas y de acuerdo al contexto del municipio.

Así entonces, a juicio de las autoridades municipales, técnicos y usuarios del servicio son ocho los criterios de mayor relevancia, los cuales fueron agrupados en cuatro factores. En el factor social se consideran la producción de olores por parte de la tecnología, la ubicación de la planta, el potencial de generación de vectores y la participación de todos los actores en la toma de decisiones. Los costos de terreno y de inversión en el factor económico. En el factor tecnológico la topografía y en el factor ambiental la evaluación de riesgos por fenómenos hidroclimáticos.

Los Humedales de Flujo Subsuperficial (HFSS), son la tecnología seleccionada para el tratamiento complementario del agua residual domestica (tratamiento terciario), proponiéndose construir 16 celdas de 11 metros de ancho por 44 metros de largo; esperando un efluente con una calidad microbiológica de coliformes fecales de $2.1E+01$ UFC/100 mL, con base a esta calidad esperada y la normativa guatemalteca para reuso de agua residual se propone utilizarla para irrigación de aguacate (*Persea americana*), maíz (*Zea mays* L.) y papa (*Solanum tuberosum*).

El riego por aspersión es el método apropiado para la zona de estudio, siendo la disponibilidad de capital y la cultura de riego por parte de los usuarios, los factores condicionantes para selección dicho método. Para el diseño del sistema de riego se consideró el mes de marzo como el más crítico en cuanto a demanda con un caudal de 24.5 L/sg. La infraestructura hidráulica propuesta está compuesta por un tanque de almacenamiento de 155 metros cúbicos, a partir del tanque se conducirá mediante Tubería PVC 8" RDE 51 para dos ramales de la red de distribución. El sistema de riego predial será mediante tubería PVC de 1 ½" RDE 26 para la irrigación de 13.5 a 13.64 hectáreas, bajo la modalidad de sistema agroforestal, cultivando en asocio aguacate variedad Hass y cultivo de maíz en los meses de marzo a noviembre, y papa variedad Loman en los meses de noviembre a marzo (ciclo de 5 meses).

La estructura organizacional propuesta es tipo lineal-asesoría, siendo la Asamblea General la máxima autoridad en la toma de decisiones, la Junta Directiva quien representa a los usuarios del sistema. La estructura cuenta una Comisión de Vigilancia y un Grupo Técnico Asesor como organismos de apoyo. Para la operación y manejo del sistema se organizarán tres comisiones siendo ellas, Comisión de operación y mantenimiento, Comisión de administración, y Comisión de producción y comercialización.

En función del contexto del área de estudio y aspectos técnicos, la implementación de la propuesta contempla cuatro fases fundamentales. La primera fase es la construcción de la infraestructura de tratamiento complementario, la cual debe realizarse después de 6 meses de construida y operada la planta de tratamiento de aguas residuales. La segunda fase es la construcción de la infraestructura de riego, que debe hacerse posterior a 8 meses de funcionamiento del humedal, esto con el fin de conocer la calidad fisicoquímica y microbiológica del efluente y hacer los ajustes pertinentes para el reuso del agua residual. La tercera fase es la implementación de los sistemas agroforestales por los productores, y la última fase es la operación y manejo del sistema, la cual se realizará de forma paralela a partir de la primera fase.

Finalmente, se estimaron los costos para la implementación de la propuesta la cual asciende a USD 570,748.36. La tarifa mensual óptima calculada es de USD 44.94, sin embargo, en función del contexto de la zona de estudio se deben hacer los ajustes y estrategias para que dicha tarifa mensual oscile entre USD 5.00 a USD 13.24.

1. INTRODUCCION

El reuso de agua residual para riego es una práctica muy común que se ha incrementado en los últimos años en países desarrollados y en vías de desarrollo (Manga *et al.*, 2001). En América Latina, México ocupa el primer lugar de área irrigada con aguas residuales con 370,000 hectáreas, seguido de Chile (16,000), Perú (6,600) y Argentina (3,700) (Garza, 2000). En Guatemala, de acuerdo a CEPIS (2001) esta práctica se desarrolla en cinco municipios en los departamentos de Guatemala, El Progreso, Escuintla y Sololá; principalmente para cultivo de pastos y forrajes.

El agua residual domestica tratada es una fuente de agua potencial que puede utilizarse para la agricultura cuando no existen fuentes de agua limpia, como es el caso del área periurbana de San Marcos. En este sentido, potencialmente se puede utilizar el efluente de agua residual domestica tratada proveniente de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales que se tiene contemplado construir para depurar el agua residual proveniente del área urbana de municipio de San Marcos (MANCUERNA, 2008).

Por otro lado, en la zona de estudio se desarrolla la agricultura de secano (97% del total del uso agrícola) con cultivos principalmente maíz, frijol y haba, tanto en monocultivos como asocio (Instituto Nacional de Estadística, 2003). Este tipo de agricultura, inicia en los meses de marzo a mayo con la siembra y culmina en los meses de octubre y noviembre con la cosecha, este calendario agrícola coincide con el periodo de precipitación pluvial.

Ante todo ello, se planteó el presente estudio con el objetivo de formular una propuesta integral de pequeña irrigación en zonas de ladera mediante el reuso de agua residual doméstica tratada con métodos naturales, para el municipio de San Marcos, departamento de San Marcos, república de Guatemala, considerando tres objetivos específicos. El primero fue establecer criterios de selección de métodos naturales para el tratamiento complementario de agua residual doméstica para el reuso agrícola en zonas de ladera en San Marcos; el segundo, seleccionar la alternativa más apropiada para el tratamiento complementario de agua residual doméstica y del sistema de riego para el caso de San Marcos; y el tercero, establecer una propuesta de infraestructura hidráulica y organizacional para el manejo y operación del sistema de riego para el caso de San Marcos.

La metodología en general, se basó en participación-acción por parte de los actores, teniendo en cuenta la socialización y validación de la información. Para el manejo del estudio se contemplaron 7 fases, cada una de ellas se desarrolló de forma secuencial. En la Fase I, se establecieron los criterios de selección de métodos naturales para el tratamiento complementario de agua residual doméstica para el caso específico de San Marcos de forma participativa con técnicos, autoridades municipales y usuarios del

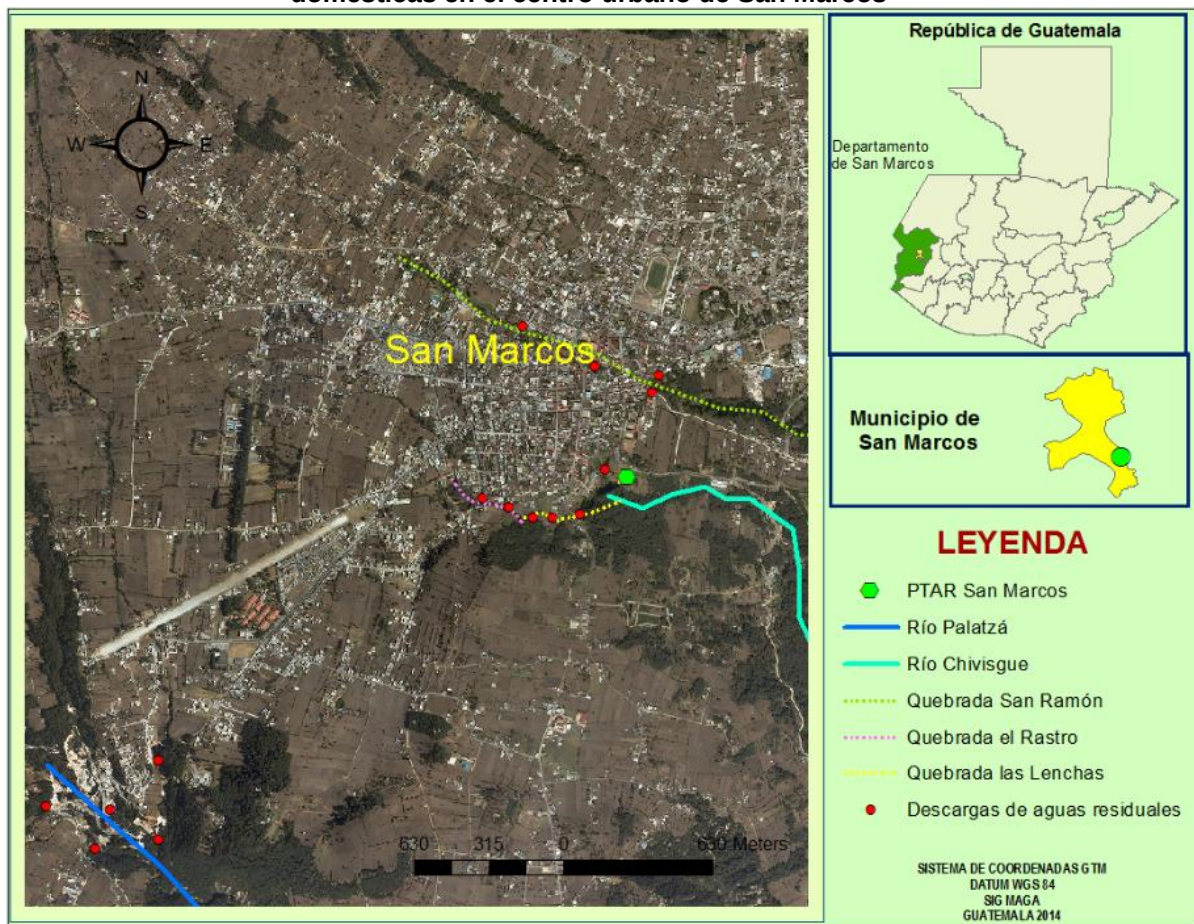
sistema de recolección y tratamiento de aguas residuales. En la fase II, a partir de la metodología propuesta por el Modelo SELTAR y los factores determinantes identificados en la fase I, se seleccionó la alternativa más apropiada para el tratamiento complementario de agua residual doméstica tratada para el caso del municipio. En la fase III se seleccionó del método de riego más apropiado de acuerdo las condiciones de San Marcos y a partir de ello se planteó la propuesta de infraestructura hidráulica del sistema de riego (Fase IV). En función de los resultados obtenidos en las fases II y III se realizó el dimensionamiento de la unidad de tratamiento complementario del agua residual doméstica. En la fase VI se desarrolló la propuesta organizacional para el manejo y operación del sistema de riego, considerando los aspectos contextuales del municipio de San Marcos. Finalmente se integró la información dando lugar a la propuesta integral.

El trabajo se ha estructurado en once capítulos secuenciales. Del capítulo dos al seis incluye la descripción del problema, antecedentes y justificación, objetivos, marco teórico y metodología empleada. En el capítulo siete se presentan los resultados y análisis. Así pues, en el apartado 7.1, se describen los criterios de selección de métodos naturales para el tratamiento complementario del agua residual doméstica para el reuso agrícola en zonas de ladera en San Marcos. En el apartado 7.2 la selección de alternativa para el tratamiento complementario de agua residual doméstica y del sistema de riego para el caso de San Marcos. El dimensionamiento del Humedal de Flujo Subsuperficial como unidad de tratamiento complementario para el caso de estudio se describe en el apartado 7.3. En el apartado 7.4 se detalla la propuesta de infraestructura hidráulica y organizacional para el manejo y operación del sistema de riego para el caso de San Marcos. Finalmente en el apartado 7.5, se describe el esquema integral de tratamiento y reuso del agua residual en zonas de ladera del municipio de San Marcos. También se incluyen conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y los anexos respectivos en los capítulos del ocho al once respetivamente.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La contaminación de los ríos en Guatemala se debe a fuentes puntuales de contaminación por aguas residuales domésticas, industriales y agroindustriales y por contaminación difusa por actividades agrícolas (FAO, 2011). Sin embargo la contaminación de los ríos es principalmente por aguas residuales provenientes de centros urbanos, las cuales se descargan en su mayoría sin ningún tipo de tratamiento, presentando altos porcentajes de contaminantes físicos, materia orgánica y microorganismos patógenos. Dentro de este aspecto cabe señalar que únicamente 24 municipios de 331, tienen plantas de tratamiento. Aproximadamente, funcionan 15 adecuadamente de 49 plantas de tratamiento en total. Esta situación es debido a la falta de recursos económicos de las municipalidades (Instituto de Agricultura Recursos Naturales y Ambiente y Asociación Instituto de Incidencia Ambiental, 2005) y la débil estructura institucional y legal (Colom, 2005).

Figura 2-1. Ubicación espacial de los cuerpos receptores de las descargas de aguas residuales domesticas en el centro urbano de San Marcos



Fuente: Elaboración propia con base en el Sistema de Información Geográfica de Guatemala (MAGA, 2004)

El municipio de San Marcos se ubica en el occidente de la república de Guatemala a una altitud de 2,398 metros sobre el nivel del mar, es cabecera municipal del Departamento de San Marcos. El clima es frío, con temperaturas que varían entre 6.0 a 20.30 °C. La precipitación media anual es de 1,298 mm al año (INSIVUMEH, 2009).

Según proyecciones para año 2013 la población aproximada en el centro urbano de San Marcos es de 28,970 habitantes, con un promedio de 6 habitantes por vivienda (Instituto Nacional de Estadística, 2002), dicha población evacua el agua residual de sus actividades domésticas al sistema de alcantarillado que descarga en varios puntos de desfogue a los ríos Chivisgüe, San Ramón y Palatzá sin ningún tipo de tratamiento (Fundación Solar, 2006). En la figura 2-1 se observa la ubicación espacial de los cuerpos receptores de las descargas de aguas residuales domésticas del centro urbano de San Marcos.

En los análisis de aguas residuales en diferentes puntos de muestreo realizados por la Mancomunidad de Municipios de la Cuenca del río Naranjo -MANCUERNA (2009), se evidencia la contaminación en estos cuerpos de agua (Tabla 2-1); la descarga de agua residual ubicada en el punto Colonia Hospital tiene una alta carga de DQO que limitaría el tratamiento biológico, mientras que para los otros dos puntos los valores de DBO₅ indican ser agua residual altamente concentradas, biodegradables y permitiría tratamiento con métodos biológicos, pues la relación DBO₅/DQO es mayor a 0.3.

Tabla 2-1. Calidad el efluente de aguas residuales del municipio de San Marcos

Parámetro	Unidad	LMP ¹	Punto de muestreo		
			Colonia Hospital	Quebrada Las Lenchas	Quebrada del Rastro
DBO ₅	mg/L	100	1050	470	460
DQO	mg/L	S/D	1500	980	760
Relación DBO ₅ /DQO	-----	S/D	0.7	0.5	0.6
Fosforo total	mg/L	10	24.00	16.00	14.00
Nitrógeno total	mg/L	20	120.00	83.00	50.00
Sólidos en suspensión	mg/L	100	470	360	300
Aceites y grasas	mg/L	10	80.00	74.0	44.00

¹ Límites Máximos Permisibles de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores para el año 2024 según el Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos Acuerdo Gubernativo 236-2006.

Coliformes fecales	NMP	<1.0 E+04	3.0 E+08	5.0E+08	2.2E+09
--------------------	-----	-----------	----------	---------	---------

Fuente: Mancomunidad de Municipios de la Cuenca del río Naranjo (2009).

La calidad microbiológica de los diferentes puntos de muestreo están por encima de los valores permitidos por el reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la deposición de lodos (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2006).

La contaminación de las fuentes de agua provoca limitaciones en la disponibilidad del agua para diferentes usos (Instituto de Agricultura Recursos Naturales y Ambiente y Asociación Instituto de Incidencia Ambiental, 2005). La escasez del recurso hídrico motiva al uso de aguas residuales para el riego sin ningún tratamiento, lo cual representa un gran riesgo para la salud (FAO, 1993).

Por otro lado, ante la demanda de más del 74% de agua para riego y la ausencia de fuentes de agua para este fin (FAO, 2000), es necesaria la búsqueda de alternativas de solución, entre ellas está la utilización de agua residual tratada como un recurso hídrico disponible y explotable (Manga et al., 2001), pues se convierte en la única fuente de abastecimiento para el riego agrícola en zonas áridas o semiáridas (Moscoso y Egocheaga, 2002).

Existe información cuantitativa escasa, limitada y difusa sobre la calidad de los cuerpos de agua utilizados para diferentes usos a nivel nacional. Sin embargo, se percibe la contaminación de los cuerpos de agua y se relacionan con la ocurrencia de enfermedades diarreicas y gastrointestinales que son las principales causas de mortalidad infantil (Instituto de Agricultura Recursos Naturales y Ambiente, 2009).

En los municipios de Mixco, Guastatoya, Sanarate, Tiquisate y Sololá, se usan efluentes con calidades microbiológicas en el orden de 3.00 E+05 a 4.00 E+08 NMP/100 ml, para cultivos de pastos, tomate y frijol (CEPIS, 2001), que están por encima de lo recomendado por la normativa de reuso de aguas residuales de Guatemala que estipula valores menores a 1.00 E+03 NMP/100 ml.

De ahí que surgen las interrogantes ¿Hasta qué punto puede utilizarse de forma segura el agua residual doméstica ofertada para la producción de alimentos en el municipio de San Marcos?, ¿Cuáles son los factores importantes a considerar para una propuesta integral de reuso agrícola en la zonas de ladera en San Marcos?

Así entonces, este estudio plantea una propuesta integral que involucra el tratamiento complementario de agua residual doméstica por métodos naturales y el reuso para pequeña irrigación en zonas de ladera del municipio de San Marcos, considerando el aprovechamiento eficiente del agua, la gestión de los sistemas de riego (FAO, 2008) y la reutilización planificada del agua como componente esencial en la gestión integrada de los recursos hídricos (Mujeriego, 2006).

3. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

El reuso de agua residual para riego es una práctica muy común que se ha incrementado en los últimos años en países desarrollados y en vías de desarrollo (Manga *et al.*, 2001). En Grecia, España, Italia, Israel, Jordania y Túnez, se utiliza en regiones áridas (Kretschmer *et al.*, 2003). En los países en vías de desarrollo, el reuso es debido a la necesidad causada por la escasez de agua para la sobrevivencia y desarrollo, dónde se utiliza en actividades agrícolas y acuícolas (Garza, 2000).

En América Latina, México ocupa el primer lugar de área irrigada con aguas residuales con 370,000 hectáreas, seguido de Chile (16,000), Perú (6,600) y Argentina (3,700) (Garza, 2000).

El Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente –CEPIS- (2003) citado por (Silva *et al.*, 2008), indica que en países como Argentina, Colombia, México, Nicaragua, Perú y República Dominicana son irrigados con agua residual cultivos como forestales, frutales, industriales, forrajes y hortalizas (Tabla 3-1). El mayor porcentaje (79.12%) del área irrigada son de cultivos que requieren de un proceso industrial, seguido en su orden por hortalizas (9.84%) y frutales (9.45%). Los forrajes aunque solo representan el 1.40% del área demandan el 23.48% del caudal total, tercero después de hortalizas (30.27%) y de cultivos industriales (29.51%). Los frutales son los que menos caudal demandan (0.80%) para producir una mayor área, contrario a los forrajes.

Tabla 3-1. Principales cultivos empleados para el reuso de aguas residuales domésticas

Cultivos regados con agua residual	Area (ha)	%	Caudal (lps)	%
Forestales	97	0.02	99	1.98%
Frutales	46,772	9.45	40	0.80%
Industriales	391,418	79.12	1,473	29.51%
Forrajes	6,943	1.40	1,172	23.48%
Hortalizas	48,691	9.84	1,511	30.27%
Otros	806	0.16	696	13.95%
TOTAL	494,727	100.00	4,991	100.00%

Fuente: CEPIS (2003), citado por Silva *et al.*, (2008).

En Guatemala, el reuso en agricultura de aguas residuales tratadas se presenta en cinco municipios en los departamentos de Guatemala, El Progreso, Escuintla y Sololá; principalmente para el cultivo de pastos y forrajes (Tabla 3-1). El municipio de Sololá

cultiva aproximadamente 3 hectáreas de pastos/forrajes y 1.84 hectáreas con tomate y frijol (CEPIS, 2001), en los otros casos no se tienen estimaciones de áreas cultivadas.

Se produce un efluente de 68.5 lps en nueve plantas de tratamiento de aguas residuales, de ellas se reutilizan en la agricultura 23 lps (33%), el restante se descarga a los cuerpos de agua superficiales. El efluente de tres plantas de tratamiento (Ciudad Peronia, Sanarate I y Sanarate III) es utilizado en su totalidad para actividades agrícolas.

La calidad microbiológica de todos los efluentes está por encima de la normativa guatemalteca de reuso. Sin embargo, el efluente tratado con Lagunas de estabilización e Infiltración en la planta Guastatoya I muestra una mejor calidad del efluente.

Tabla 3-2. Tratamiento y uso de las aguas residuales en la agricultura, por municipio y departamento en la república de Guatemala

Departamento	Municipio	Planta de tratamiento de agua residual		Efluente de la planta		Uso agrícola del agua residual	
		Nombre	Tipo de tecnología	Calidad (NMP/100 mL)	Caudal (l/s)	Cultivo	Caudal (l/s)
Guatemala	Mixco	Ciudad Peronia	RAFA/FP	-----	11	Área verde	11
	Guastatoya	Guastatoya I	LaEs/Inf	3,00 E+05	6.5	Pastos, forraje	SD
El Progreso	Sanarate	Sanarate I	FS		1	Pastos, forraje	1
		Sanarate II	TI	4,00 E+08	15	Pastos, forraje	SD
		Sanarate III	FS		1	Pastos, forraje	1
Escuintla	Tiquisate	Tiquisate I	TI	1,00 E+08	16	Pastos, forraje	SD
		Tiquisate II	TI/FS	1,00 E+08	6	Pastos, forraje	SD
Sololá	Sololá					Cebolla/ papa	3
		San Bartolo	RAFA/FP/SS	1,00 E+07	8	Tomate/ frijol	2
						Pastos, forraje	1
		San Antonio	RAFA/FP/SS	1,00 E+07	4	Cebolla/ papa	2
						Tomate/ frijol	2

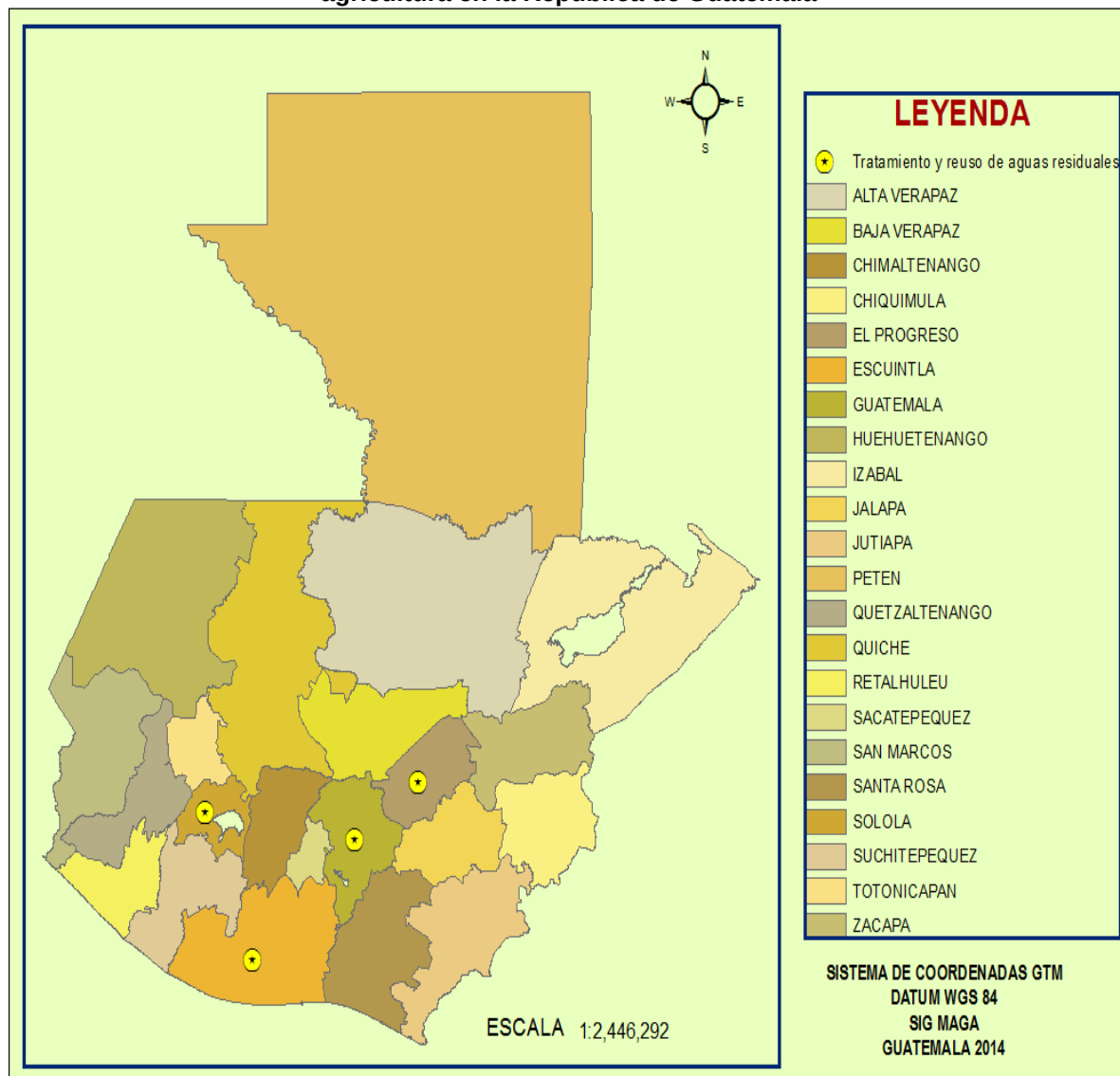
LaEs = Lagunas de estabilización; RAFA = Reactor anaerobio de flujo ascendente; FP = Filtro percolador;

Inf= Infiltración; FS = Fosa séptica; TI = Tanque Imhoff; SS = Sedimentador secundario

Fuente: Adaptado de Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, (CEPIS, 2001).

Del tipo de tecnología utilizada en los procesos de tratamiento, únicamente en el municipio de Guastatoya se utilizan efluentes provenientes de lagunas de estabilización (Tabla 3-2 y Figura 3-1). En este aspecto, Oakley (1998), indica la existencia 9 lagunas de estabilización, de las cuales 5 se encontraban funcionando. Además indica la inexistencia de programas de monitoreo, operación y mantenimiento.

Figura 3-1. Ubicación espacial de los departamentos con tratamiento y uso de agua residual en la agricultura en la República de Guatemala



Fuente: Elaboración propia con base en el Sistema de Información Geográfica de Guatemala (MAGA, 2004).

El reuso de agua residual para la agricultura, ha generado un esfuerzo global para realizar un enfoque integrado en la planificación y gestión en proyectos para la protección de la salud pública y el control de la contaminación de los recursos hídricos y el ambiente. Deben considerarse los aspectos tecnológicos, socio-económicos, salud y el marco jurídico (Kretschmer *et al.*, 2003).

En este sentido, el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente en convenio con el centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo de Canadá y la Organización Panamericana de la Salud-Organización Mundial de la Salud (OPS-OMS), desarrollaron un proyecto de investigación de sistemas integrados de tratamiento y uso de agua residual en América Latina. El objetivo fue estudiar las experiencias en tratamientos de agua residual doméstica y su uso en la agricultura urbana para recomendar estrategias de diseño e implementación; dichas recomendaciones se plantean en la “Guía para la Formulación de Proyectos de Sistemas Integrados de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales Domésticas”, donde proponen un modelo de sistema integrado de tratamiento y uso de aguas residuales domésticas (CEPIS, 2002).

El modelo propone un sistema integrado que adecue el tratamiento del agua residual doméstica para uso productivo, priorizando la remoción de patógenos para proteger la salud pública. Durante la tercera etapa del proyecto se realizaron siete estudios de viabilidad en países como Perú, Venezuela, Costa Rica, Colombia, Brasil; utilizando este modelo de sistema integrado (Moscoso y Egocheaga, 2002).

En Guatemala, en la ciudad de Sololá, se evaluó el manejo de las aguas residuales, su tratamiento, uso actual y potencial; y se recomendó estudiar la factibilidad de implementar proyectos integrales de tratamiento y reuso de agua residual doméstica en la agricultura, especialmente en regiones con poca precipitación. Además debe considerarse el fortalecimiento institucional y de organizaciones comunitarias (CEPIS, 2001).

En cuanto al recurso hídrico, Guatemala tiene una oferta hídrica estimada media anual de 97,120 millones de m³ de agua y una disponibilidad per cápita de alrededor de 8,000 m³/persona/año. Sin embargo debe considerarse la distribución espacial y temporal irregular, la poca capacidad de almacenamiento y que la disponibilidad no coincide con la demanda (Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia, 2006). La extracción de agua por el sector de abastecimiento es 9%, industrial 17% y agrícola 74% (FAO, 2000).

Para el 2003 se irrigaban 311,557 hectáreas (24% del área apta de riego en el país). El departamento con mayor superficie de irrigación es Escuintla (54%), le siguen en orden los departamentos de Zacapa (6.6%), Suchitepéquez (6.6%), San Marcos (4.3%), Izabal (3.8%) y Santa Rosa (3.5%). La mayor superficie bajo riego en el país se encuentra en el vertiente del pacífico (80%), en la planicie costera con agricultura intensiva (Instituto Nacional de Estadística, 2003).

El tipo de riego predominante es aspersión (54.2%), seguido por surcos o inundación (30.2%), goteo (6.1%) y otros sistemas (9.6%). El 74.6% es irrigada utilizando aguas superficiales y 25.4% con aguas subterráneas. El abastecimiento de agua subterránea

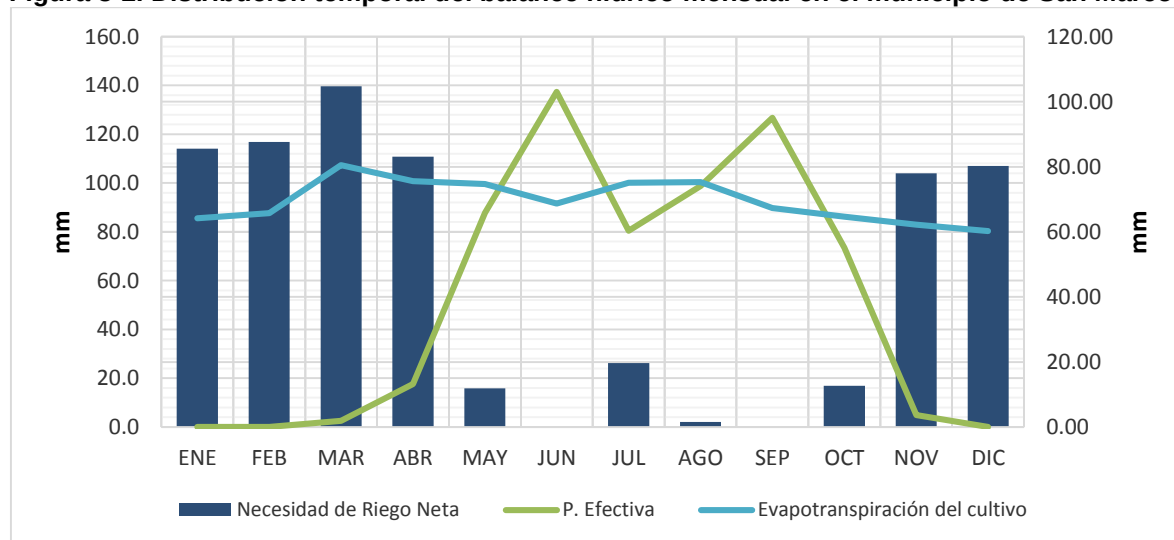
para fines de riego es más frecuente en la Vertiente del Pacífico (Instituto Nacional de Estadística, 2003).

Los sistemas de mini-riego o pequeña irrigación en Guatemala, consisten principalmente en la captación de un manantial e instalación parcelaria con riego por aspersión. En estos sistemas, la participación de los beneficiarios es importante, debido a que la construcción y operación dependen de los recursos propios (FAO, 2000).

El municipio de San Marcos presenta una superficie irrigada de 96 hectáreas mediante sistemas de mini-riego. De éstas el 95.5% son regadas por sistema de aspersión, 3.8% por inundación y 0.8% por goteo (Instituto Nacional de Estadística, 2003).

La agricultura de secano es la predominante (97% del total del uso agrícola) y posee una superficie aproximadas de 3,012 hectáreas cultivadas principalmente con granos básicos (maíz, frijol y haba) tanto en monocultivos como asocio (Instituto Nacional de Estadística, 2003). Este tipo de agricultura, inicia en los meses de marzo a mayo con la siembra y culmina en los meses de octubre y noviembre con la cosecha, este calendario agrícola coincide con el periodo de precipitación pluvial.

Figura 3-2. Distribución temporal del balance hídrico mensual en el municipio de San Marcos



Fuente: Con base en datos climáticos del periodo 1993-2009 del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (2009).

En los meses de déficit hídrico como enero, febrero, marzo, abril, noviembre y diciembre (Figura 3-2), la precipitación efectiva no supe las necesidades hídricas de los cultivos limitando la producción agrícola.

La producción agrícola en la zona periurbana de San Marcos está condicionada por las sequías, frecuencia e intensidad de las lluvias que afectan significativamente el rendimiento de maíz debido a sus impactos en los procesos fisiológicos en las diferentes etapas del cultivo. El rendimiento aproximado de maíz es de 2 ton/hectárea en maíz, valor inferior al rendimiento promedio municipal de 2.62 y de 4.5 a nivel mundial (Fuentes *et al.*, 2005).

Así entonces, ante la ausencia de fuentes hídricas cercanas a las zonas de ladera periurbana de San Marcos el agua residual doméstica constituye un recurso alternativo importante para el riego agrícola, principalmente porque se produce en forma continua y que vendría a suplir las necesidades hídricas durante los meses de déficit hídrico.

Además, el uso controlado de efluentes de agua residual tratada aporta nutrientes y materia orgánica a los cultivos, generando beneficios en el incremento de la producción. Al mismo tiempo se convierte en una estrategia para reducir la carga contaminante a los cuerpos de agua, contribuyendo de esta forma a mejorar la calidad de los recursos hídricos superficiales (Veliz *et al.*, 2009).

Por otro lado, de los sistemas de riego construidos a nivel nacional en el 2008, únicamente el 1.6% se establecieron en el departamento de San Marcos, ninguno en el municipio de San Marcos (DIAPRYD, 2008). Siendo importante entonces, implementar infraestructura hidráulica y organizacional de sistemas de riego, para generar ingresos económicos; pues el departamento de San Marcos se sitúa dentro de los índices más altos de pobreza y el municipio de San Marcos presenta 69.1% de pobreza general, según datos del Informe de Desarrollo Humano Nacional (PNUD, 2004).

El 97.6% de proyectos de infraestructura de riego ejecutados hasta el 2009 por el Programa de Desarrollo Integral en Áreas con Potencial de Riego y Drenaje (DIAPRYD, 2009) son sistemas por bombeo; los cuales involucran altos costos de operación y mantenimiento que influyen en la rentabilidad del sistema de producción. Los sistemas de riego en ladera evitan en lo posible la utilización de sistemas de bombeo, logrando la presurización del sistema mediante el aprovechamiento de las diferencias de nivel entre el punto de captación de la corriente superficial y el punto más alto o cabecera del área a beneficiar.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General

Formular una propuesta integral de pequeña irrigación en zonas de ladera mediante el reuso de agua residual doméstica tratada con métodos naturales para el municipio de San Marcos, Guatemala.

4.2. Objetivos Específicos

Establecer criterios de selección de métodos naturales para el tratamiento complementario de agua residual doméstica para el reuso agrícola en zonas de ladera en San Marcos.

Seleccionar la alternativa más apropiada para el tratamiento complementario de agua residual doméstica y del sistema de riego para el caso de San Marcos.

Establecer una propuesta de infraestructura hidráulica y organizacional para el manejo y operación del sistema de riego para el caso de San Marcos.

5. MARCO TEÓRICO

5.1. Sostenibilidad

La sostenibilidad es un término que toma relevancia a partir de la aparición del concepto de “Desarrollo Sostenible” en 1986 con la difusión del Informe Brundtland, elaborado por la Comisión Mundial para el Medio Ambiente y Desarrollo. Este informe conceptúa como sostenible el modelo de desarrollo “que satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades” (Rabadán y Luffiego, 2000).

Existen diversas conceptualizaciones de sostenibilidad, los cuales varían según el enfoque (agrícola, educación, saneamiento, etc.). La sostenibilidad de un sistema se refiere a la capacidad de desempeñar sus funciones a un nivel aceptable, brindando beneficios durante su vida proyectada y utilizando el mínimo de recursos (Restrepo, 2000).

Desde la perspectiva del sistema de riego, la sostenibilidad se refiere a las funciones de la infraestructura física y organizacional establecida para el manejo del sistema a lo largo de su vida útil, teniendo en cuenta las especificaciones del nivel de servicio y los beneficios esperados a los usuarios, sin causar impactos irreversibles al ambiente (Urrutia y Dossman, 2007). En su concepción amplia, la sostenibilidad involucra criterios de sostenibilidad técnica, financiera, ambiental, económica e institucional; la definición de cada uno de estos criterios se aprecia en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1. Criterios de sostenibilidad en un sistema de riego

Criterios de sostenibilidad	Definición
Técnicos	Capacidad del sistema de proveer el nivel de servicio de acuerdo a sus especificaciones técnicas y de diseño.
Financieros	Capacidad de la organización para asumir y recuperar costos de administración, operación y mantenimiento. Capacidad de gestión de recursos para ejecución futura de proyectos de rehabilitación y modernización.
Ambientales	Capacidad de no generar impactos ambientales negativos e irreversibles que atenten contra los recursos naturales y su posterior aprovechamiento.
Económicos	Capacidad de contribuir al desarrollo económico y bienestar comunitario mediante la producción y productividad.
Sociales	Formación de capacidades en la organización para planear, manejar, y operar el sistema, la resolución de conflictos y la interacción con otras organizaciones, especialmente con las del sector de riego y drenaje.
Institucionales	Políticas y organización del sector de adecuación de tierras

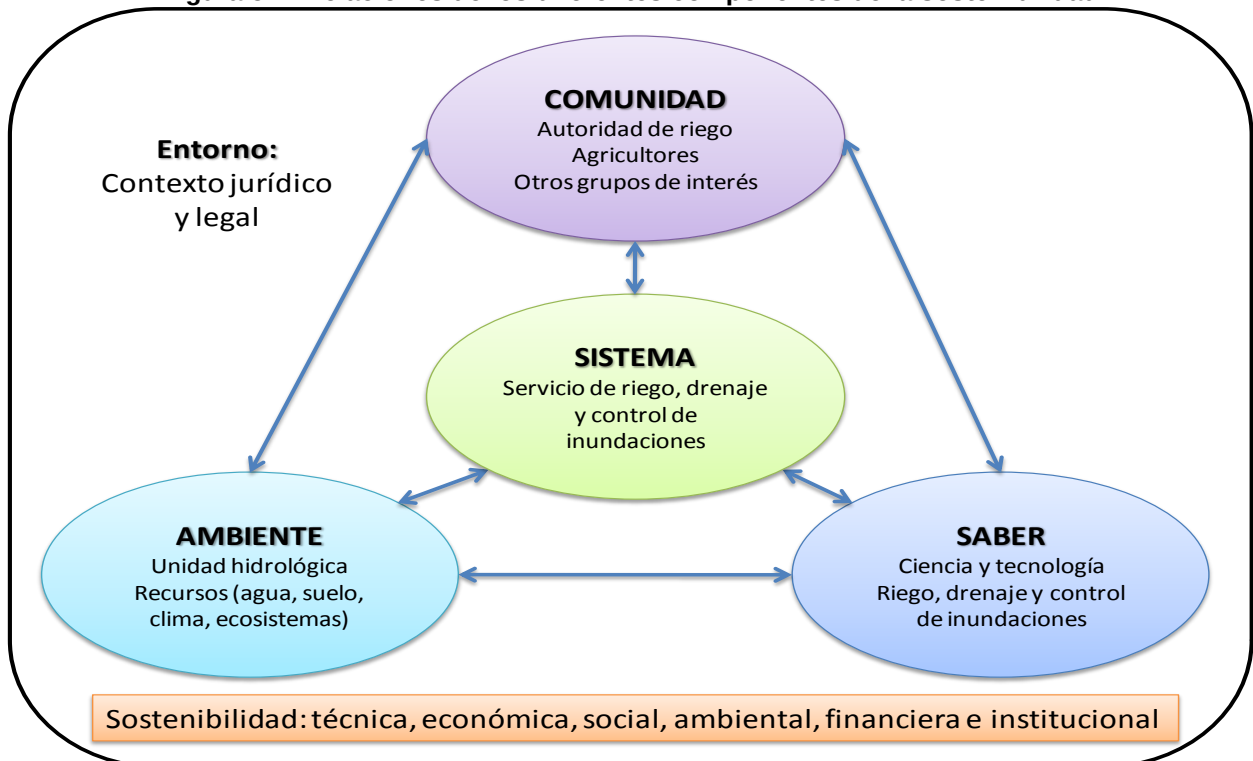
Fuente: Urrutia y Dossman, (2007).

La sostenibilidad de los sistemas de riego incluye tres componentes básicos (Urrutia y Dossman, 2007) los cuales son:

- **La comunidad** que la constituyen los diferentes grupos de interés tales como los agricultores, asociación de regantes, autoridad de riego y el estado; siendo los principales beneficiarios los agricultores, pues sus objetivos y expectativas están relacionados directamente con la prestación del servicio.
- **El ambiente**, el cual provee insumos principales como suelo, clima, ecosistema y recursos hídricos; siendo estos recursos naturales importantes para el desarrollo de la agricultura bajo riego.
- **El Saber** lo constituye todo el conocimiento científico, tecnológico y las experiencias disponibles, que puedan utilizarse por la comunidad para el aprovechamiento de los recursos naturales y de esta forma satisfacer sus necesidades.

Estos tres componentes se interrelacionan entre sí, dentro de un entorno demarcado por el contexto jurídico y legal (Figura 5-1); dependiendo del grado de interrelación se determina la sostenibilidad de los sistemas.

Figura 5-1. Relaciones de los diferentes componentes de la sostenibilidad



Fuente: Urrutia y Dossman, (2007).

La relación Ambiente y Comunidad puede generar factores de riesgo, debido a las prácticas de aprovechamiento y uso de los recursos naturales por la comunidad que pueden afectar la disponibilidad. En este sentido, el Saber se convierte en un mecanismo de control sobre los factores de riesgo resultantes de la relación Comunidad-Ambiente (Urrutia y Dossman, 2007).

La relación Saber-Comunidad es de gran importancia, pues la selección de alternativas tecnológicas debe considerar los aspectos culturales, socio-económicos, técnicos y financieros de la comunidad objeto, para lograr la autonomía técnica y financiera sin mayor injerencia de agentes externos (Urrutia y Dossman, 2007).

5.2. Aguas residuales y el modelo de sistemas integrados

De acuerdo al Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (2006), las aguas residuales son aquellas que han recibido un uso y cuya calidad ha sido modificada; se clasifican en aguas residuales de tipo especial y de tipo ordinario.

Las aguas residuales de tipo especial son las generadas por servicios públicos municipales y actividades de servicio, industriales, agrícolas, pecuarias, hospitalarias. Por su parte, las aguas residuales de tipo ordinario son aquellas producto de las actividades domésticas (servicios sanitarios, lavamanos, lavatrastos, lavado de ropa y otros similares), procedentes de zonas residenciales o instalaciones comerciales y públicas; este tipo, son denominadas aguas residuales domésticas de acuerdo con Metcalf & Eddy (2003).

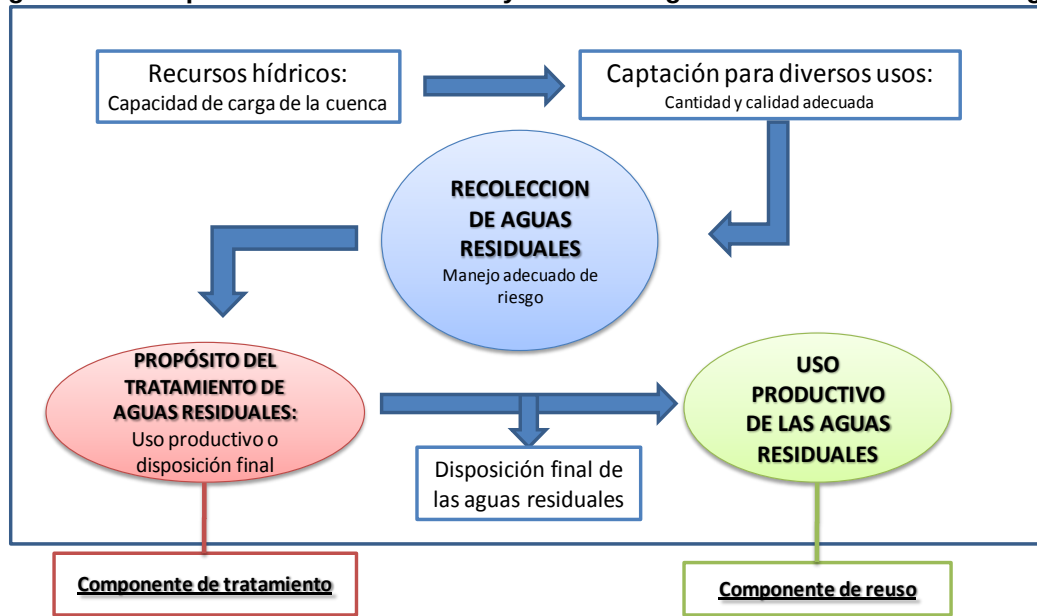
Las aguas residuales y su reutilización son un componente esencial en la gestión integrada de las aguas residuales; la cual, tiene como objetivo incorporar la selección rentable y eficiente de tecnologías de tratamiento de aguas residuales, la disposición final y los sistemas de reutilización (Abbassi y Baz, 2008). En este sentido, es importante la planificación y gestión de los proyectos de reutilización agrícola, siendo necesario considerar aspectos institucionales, jurídicos, socio-económicos, financieros y psicológicos (Kretschmer *et al.*, 2003). Además, deben asegurarse procesos de educación, investigación, creación de capacidades y programas participativos de cooperación para lograr el objetivo en común de la comunidad (Bose, 2008).

Así entonces, el tratamiento de aguas residuales y el reuso de las aguas tratadas, se convierten en componentes principales para lograr la gestión eficiente del agua dentro del ciclo de la misma, como se puede apreciar en la Figura 5-2.

Dentro de este contexto, surge el modelo de sistema integrado de tratamiento y uso de agua residual doméstica, el cual incorpora aspectos sanitarios, ambientales, agrícolas,

sociales, institucionales y económicos que deberán ser abordados para una gestión integrada de las aguas residuales (CEPIS, 2002).

Figura 5-2. Componentes de tratamiento y reuso del agua residual en el ciclo del agua



Fuente: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, (2002).

El modelo de sistema integrado intenta adecuar el tratamiento de las aguas residuales domésticas para el uso en el riego de cultivos; enfocándose en la remoción de patógenos y la protección de la salud pública; además de aprovechar la materia orgánica y nutrientes presentes en el agua residual; todo esto mediante la utilización de tecnologías de bajo costo de inversión y operación (CEPIS, 2002).

Los sistemas seleccionados para estos sistemas integrales deben ser asequibles, fiables, funcionales, amigables con el ambiente y ajustados a las condiciones climáticas de la región; siendo estos, los criterios más importantes (Abbassi y Baz, 2008) para lograr la sostenibilidad. Además es necesaria la planificación y gestión adecuada, considerando la participación de todos los sectores involucrados (Bose, 2008).

5.3. Tratamiento de aguas residuales

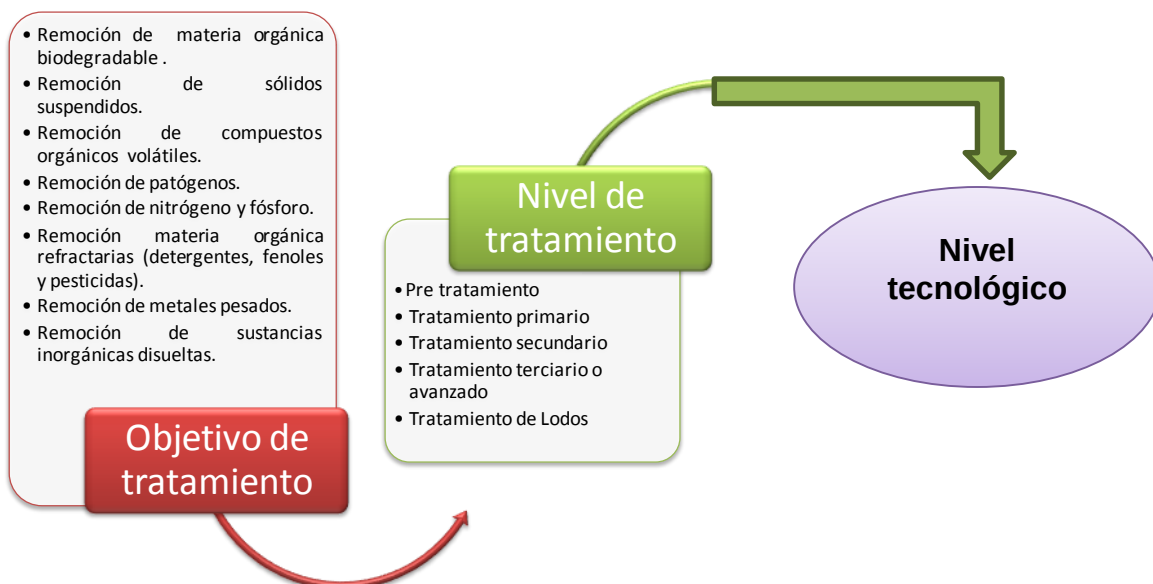
El tratamiento de aguas residuales se refiere a cualquier proceso físico, químico, biológico o en combinación, para mejorar las características de las aguas residuales (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2006).

5.3.1. Objetivos y nivel de tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales tienen por fin la protección de la salud pública, protección del medio ambiente y el reciclaje de las aguas residuales en la agricultura (Quipuzco, 2004). En países desarrollados el objetivo prioritario es la remoción de nutrientes y materia orgánica, mientras que en los países en desarrollo debe ser la remoción de patógenos que ocasionan enfermedades endémicas (CEPIS, 1994), siendo este último el objetivo para aprovechamiento de aguas residuales en la agricultura (OMS, 1989).

Existen diversos tipos de tratamiento de aguas residuales, las diferentes unidades y procesos unitarios dependen del objetivo del tratamiento; estas a su vez definen el nivel de tratamiento y la complejidad del sistema de tratamiento, como se puede apreciar en la Figura 5-3. Los objetivos principales de tratamiento de aguas residuales son la remoción de contaminantes que pueden afectar la salud pública y el ambiente (Romero, 2004).

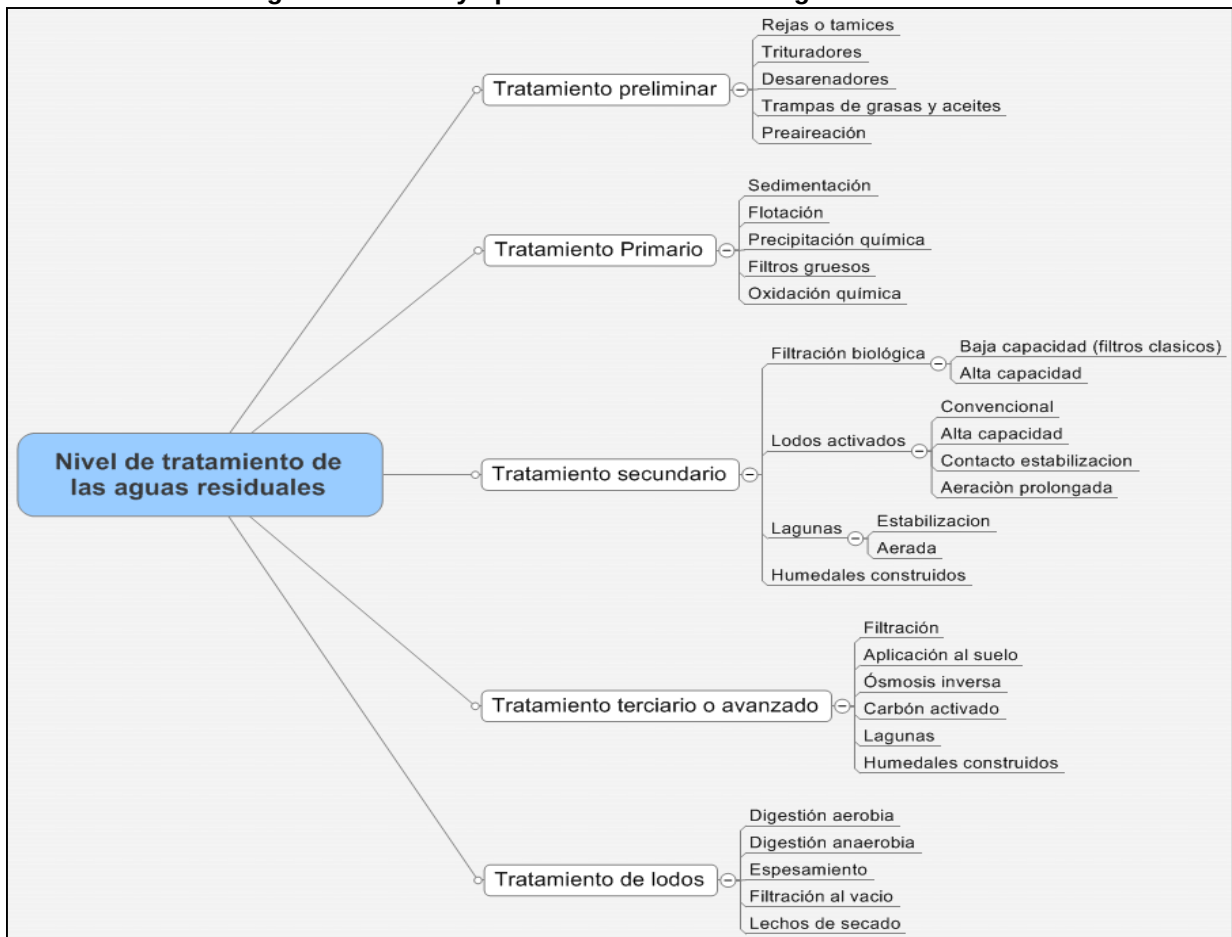
Figura 5-3. Objetivos de tratamiento y la complejidad del sistema tratamiento de aguas residuales



Fuente: Adaptado de Rojas, (2002) y Metcalf & Eddy, (2003).

De acuerdo con Metcalf & Eddy (2003) el tratamiento de aguas residuales puede clasificarse en niveles como preliminar, primario, secundario y terciario o avanzado (Figura 5-4). Además, incluye el tratamiento primario avanzado y secundario con remoción de nutrientes. A continuación se describen cada uno de los niveles de tratamiento.

Figura 5-4. Nivel y tipos de tratamiento de aguas residuales



Fuente: Adaptado de Rojas (2002) y Romero (2004).

– Tratamiento preliminar o pre tratamiento

El pre tratamiento de las aguas residuales consiste principalmente en la eliminación de constituyentes de las aguas residuales que puedan causar dificultades en la operación y funcionamiento de los diferentes proceso y operaciones del sistema (Metcalf & Eddy, 2003). El pre tratamiento consiste en diferentes procesos o unidades tales como las rejas o tamices, trituradores, desarenadores, desengrasadores y pre-aeración. Estos procesos cumplen los objetivos de eliminar sólidos gruesos, arenas y gravas, aceites y grasas, desmenuzamiento de sólidos, control de olor y mejoramiento del comportamiento hidráulico.

Las rejillas se utilizan para proteger los equipos e instalaciones de la planta de tratamiento (bombas, válvulas, tuberías y otros) de daños y obturaciones ocasionadas por objetos de gran tamaño. Las rejillas tienen separaciones superiores a 12.5 mm entre

barras. La limpieza puede ser manual o mecánica; las de rejillas de limpieza manual son utilizadas frecuentemente en plantas de tratamiento pequeñas (Crites y Tchobanoglous, 2000).

Los trituradores se utilizan para cortar y triturar los sólidos gruesos que se encuentran en las aguas residuales; estos son removidos mediante operaciones y procesos de tratamiento ubicadas en unidades de dilaceración aguas abajo (Crites y Tchobanoglous, 2000).

Los desarenadores se emplean para remover gravas, cenizas y cualquier otro material pesado del agua residual, cuya velocidad de sedimentación o peso específico sea considerablemente mayor al de los sólidos orgánicos. Estos se ubican después de las unidades de remoción de sólidos gruesos y antes del tanque de sedimentación primaria. Existen diferentes tipos de desarenadores entre ellos están los de flujo horizontal de tipo canal, rectangulares de flujo horizontal, cuadrados de flujo horizontal, aireados y de vórtice (Crites y Tchobanoglous, 2000).

La remoción de grasas y aceites se realiza mediante la utilización de trampas, de las cuales existen un gran número en el mercado; su eficiencia está limitada a los cortos tiempos de retención. En las plantas de tratamiento es muy común utilizar un sistema combinado de remoción de arenas por aireación y remoción de espuma o natas por barrido superficial (Crites y Tchobanoglous, 2000).

La preaireación se realiza antes de la decantación primaria para lograr una mejor tratabilidad del agua; separación de grasas, control de olores, separación de arenas y floculación; mejorar la distribución uniforme de sólidos suspendidos y flotantes en la entrada de las unidades de tratamiento; y aumentar las eliminaciones de la DBO. La preaireación habitualmente consiste en aumentar el tiempo de retención en los desarenadores aireados y en plantas de tratamiento grandes se colocan sistemas de aireación (Metcalf & Eddy, 1995b).

– Tratamiento primario

El objetivo principal del tratamiento primario, es la remoción parcial de sólidos suspendidos, materia orgánica y organismos patógenos por medios físicos o mecánicos; logrando eficiencias de remoción de sólidos suspendidos (SS) entre 60-70%; DBO₅ de 30 a 40%; coliformes fecales de 30 a 40% (Rojas, 2002; Romero, 2004; Silva *et al.*, 2008).

Existen diferentes tipos de tratamiento primario tales como sedimentación primaria, flotación, precipitación química, filtros gruesos, oxidación química, coagulación, floculación, sedimentación y filtración (Rojas, 2002).

– Tratamiento secundario

El tratamiento secundario tiene como fin la remoción de sólidos suspendidos y compuestos orgánicos biodegradables, mediante procesos biológicos (Metcalf & Eddy, 1995a). El tratamiento secundario en general, presenta eficiencias en sólidos suspendidos de 30 a 99%, DBO₅ de 60 a 99%, coliformes de 60 a 99% y nutrientes 10-20% (Silva *et al.*, 2008).

Los procesos biológicos utilizados son la filtración biológica, lodos activados, lagunas y otros; cada uno de estos tiene diferentes tipos como se aprecia en la Tabla 5-2. Los más utilizados son lodos activados y filtros percoladores (Rojas, 2002).

Tabla 5-2. Procesos de tratamiento secundario convencional

Proceso	Tipos
Filtración biológica	– Baja capacidad (filtros clásicos) – Alta capacidad ○ Filtros comunes ○ Biofiltros ○ Aero-filtros ○ Accelo-filtros
Lodos activados	– Convencional – Alta capacidad – Contacto estabilización – Aeración prolongada
Lagunas	– Estabilización ○ Anaerobia ○ Facultativa ○ Maduración – Aerada ○ Mezcla completa ○ Aerada facultativa ○ Facultativa con aeración mecánica ○ Difusión de aire
Otros	– Discos rotatorios

Fuente: Rojas (2002).

– Tratamiento terciario o avanzado

Las sustancias o compuestos comúnmente removidos por los tratamientos terciarios son fosfatos y nitratos, huevos y quistes de parásitos, sustancias tóxicas, algas, bacterias y virus, radionúclidos, sólidos totales y disueltos; además supone completar la remoción de contaminantes orgánicos del agua residual proveniente de los tratamientos primarios y secundarios mediante procesos físicos, químicos y biológicos (Rojas, 2002; Romero, 2004).

En el tratamiento terciario las eficiencias en sólidos suspendidos, DBO₅ y coliformes fecales son mayores al 99% y en nutrientes mayores al 90% (Silva *et al.*, 2008).

Dentro de los diferentes procesos de tratamiento terciario o avanzado se encuentran principalmente filtración, aplicación en el suelo, carbón activado, lagunas, osmosis inversa y precipitación química (Metcalf & Eddy, 1995a; Rojas, 2002).

– Tratamiento de lodos

Los lodos se producen como subproductos en los procesos de tratamiento y su manejo, tratamiento y disposición se convierte en un principal problema en el tratamiento de aguas residuales, debido a que por su alto contenido de materia orgánica putrescible no pueden ser dispuestos libremente (Rojas, 2002).

La cantidad de lodo producido depende del proceso de tratamiento usado y de la concentración de aguas residuales. Los lodos pueden provenir de la sedimentación, tratamiento biológico, coagulación, de las plantas de ablandamiento, de desarenadores y rejillas. Los lodos que provienen de la sedimentación primaria representan aproximadamente entre el 0.22 al 0.93 % del volumen de agua residual y el contenido de sólidos volátiles es de 63 a 83%; los provenientes de la sedimentación secundaria varían en función del proceso. (Rojas, 2002; Romero, 2004).

Entre los procesos de tratamiento de lodos están la digestión aerobia, digestión anaerobia, lechos de secado, filtración al vacío, centrifugación, espesamiento y otros (Romero, 2004).

5.3.2. Opciones tecnológicas y procesos de tratamiento

Existe una amplia gama de opciones tecnológicas y procesos de tratamiento, dentro de las cuales se agrupan y describen las siguientes:

– Tratamiento de aguas residuales por métodos naturales

El tratamiento de aguas residuales con métodos naturales son una opción sostenible por su alta eficiencia, fácil operación y bajo costo, comparado con los sistemas de tratamiento convencional (Madera *et al.*, 2003).

Un sistema de tratamiento natural es aquel que está basado en procesos naturales ya sean físicos, químicos y biológicos; de tal manera que se genere una interacción entre el agua, el suelo, las plantas, los microorganismos y la atmósfera, proporcionando así el tratamiento al agua residual (Metcalf & Eddy, 2003).

Existen diferentes tipos de sistemas naturales para el tratamiento de aguas residuales domésticas, las opciones más sostenibles para países en desarrollo son las tecnologías anaerobias y tecnologías de fotosíntesis. Las primeras consideran la utilización de

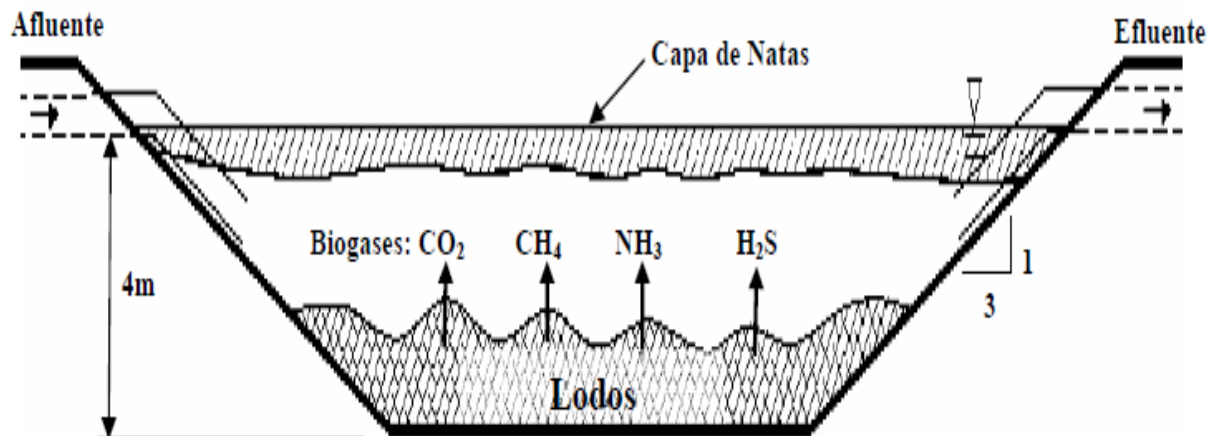
lagunas anaerobias, mientras que el segundo tipo el uso de lagunas facultativas, lagunas de maduración y humedales construidos. Los dos tipos de tecnologías se utilizan en serie, primero anaeróbica y luego fotosintética (Mara, 2003). Además existen sistemas de tratamiento en suelo como sistemas de filtración de tasa baja, infiltración rápida y sistema de flujo superficial (Crites y Tchobanoglous, 2000). Se describen a continuación estos métodos de tratamiento de aguas residuales:

Lagunas de estabilización

Las lagunas de estabilización, son reservorios en tierra poco profundas delimitadas por terraplenes de tierra en las que las aguas residuales son tratadas por procesos netamente naturales por algas y bacterias. Se diferencian tres tipos de lagunas: lagunas anaerobias, lagunas facultativas y lagunas de maduración (Mara, 2003).

Las lagunas anaerobias son utilizadas en el tratamiento primario del agua residual para la remoción de sólidos suspendidos y parte de la DBO_5 , mediante procesos de hidrólisis de biopolímeros, acetogénesis y metanogénesis de la materia orgánica que ocurren generalmente en el fondo de la laguna (Figura 5-5) (Mara, 2003).

Figura 5-5. Diagrama de los procesos de una laguna anaerobia

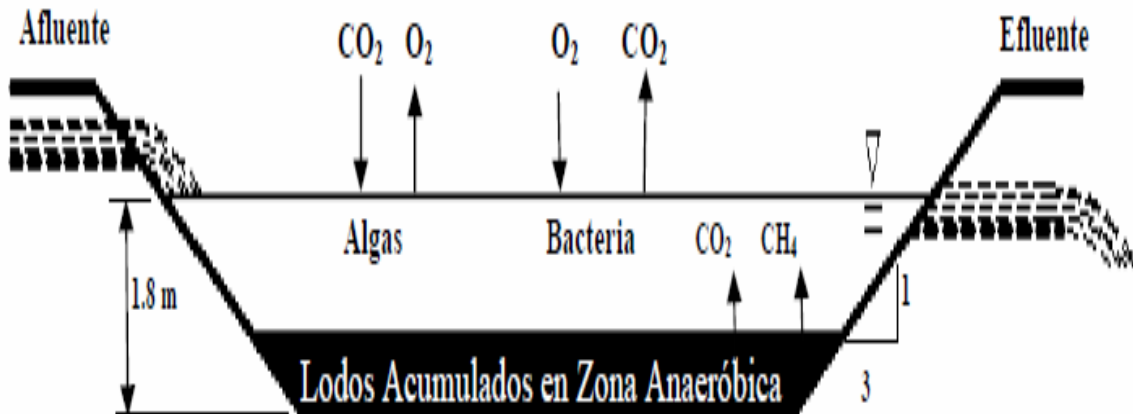


Fuente: Oakley (2005).

Las lagunas anaerobias pueden recibir cargas orgánicas volumétricas de 100 a 350 g DBO_5/m^3 día, dependiendo de la temperatura de diseño. Estas, tienen un buen desempeño en climas cálidos, logrando eficiencias de remoción de materia orgánica mayores a 70% en temperaturas superiores a los 25 °C. El tiempo de retención puede ser de un día a temperaturas superiores a 20°C y con cargas de DBO_5 menores o iguales a 300 mg/l. La profundidad es de 2 a 5 metros, generalmente se manejan entre 3 a 4 metros y dependen del contexto por los costos de excavación (Peña y Mara, 2004).

Las lagunas facultativas se utilizan para la remoción de DBO₅, mediante procesos que se desarrollan en las zonas anaerobia y aerobia. En la zona aerobia se desarrollan algas y bacterias; y en la zona anaeróbica se acumulan y digieren los lodos (Figura 5-6) (Oakley, 2005; Peña y Mara, 2004).

Figura 5-6. Diagrama de una laguna facultativa



Fuente: Oakley, (2005)

Las lagunas facultativas reciben cargas orgánicas por superficie de 80 a 400 kg DBO₅/hectárea por día, dependiendo de la temperatura de diseño. Al igual que las lagunas anaerobias tienen un buen desempeño en climas cálidos. Las remociones en estas lagunas son del orden de 60 a 70% en temperaturas de 20 a 25 °C con tiempos de retención hidráulica de 4 a 6 días. La profundidad es de 1 a 2 metros, comúnmente se manejan 1.5 metros (Peña y Mara, 2004).

Las lagunas de maduración son utilizadas como tratamiento terciario del agua residual, tienen como función principal la remoción de patógenos y contribuyen en la remoción de nutrientes (nitrógeno y fosforo) (Mara, 2003). Los mecanismos principales son impulsados por la actividad de las algas y la foto-oxidación. Se desempeñan de forma óptima en climas cálidos, logran remociones de coliformes fecales de 2 a 3 Log a temperaturas de 20 a 25 °C con tiempos de retención hidráulica de 3 a 4 días. La profundidad de estas lagunas oscila entre 1 a 1.5 metros, siendo 1 metro la profundidad óptima (Peña y Mara, 2004).

Las ventajas y desventajas de la utilización de lagunas de estabilización frente a otros métodos de tratamiento convencionales se muestran en la Tabla 5-3, las cuales deben considerarse para su empleo en el tratamiento de aguas residuales.

Tabla 5-3. Ventajas y desventajas de las lagunas de estabilización.

Ventajas	Desventajas
----------	-------------

– Simplicidad operativa. – Sistemas altamente eficientes en la remoción de materia orgánica y patógena. – Requieren únicamente energía solar. – Formación de biomasa más efectiva y variada. – Pueden soportar sobrecargas hidráulicas y orgánicas con mayor flexibilidad. – Mínimo mantenimiento. – No requiere personal calificado. – Mínimo de recursos para su diseño, construcción, operación y mantenimiento. – No requieren equipos mecánicos y eléctricos. – Altamente sostenibles. – Evacuación y disposición de lodos se realiza en intervalos de 10 a 20 años.	– Requieren grandes área de terreno para su implementación. – Los sistemas de lagunas son sensibles a las condiciones climáticas. – Pueden producir vectores. – No permite modificaciones en las condiciones de proceso. – Pueden causar impactos negativos sobre las aguas subterráneas si no se impermeabilizan.
---	--

Fuente: OPS, (2005); Oakley, (2005); Moscoso y Egocheaga, (2002); Peña y Mara, (2004), Crites y Tchobanoglous, (2000).

La operación y mantenimiento de las lagunas de estabilización consiste principalmente en operación básica y mantenimiento rutinario. En la operación básica se deben hacer medición diaria de caudales en la entrada y salida de las lagunas, control de niveles de agua, ajustar el nivel de descarga, monitorear olores y colores en las lagunas y medición de la profundidad de lodos. El mantenimiento rutinario consiste en la limpieza diaria de rejillas, mantenimiento del desarenador dos veces diarios, remoción de natas y sólidos flotantes diariamente, corte de vegetación en los bordes del talud, inspección de taludes, cuidado de cercos y caminos (Oakley, 2005).

Humedales construidos

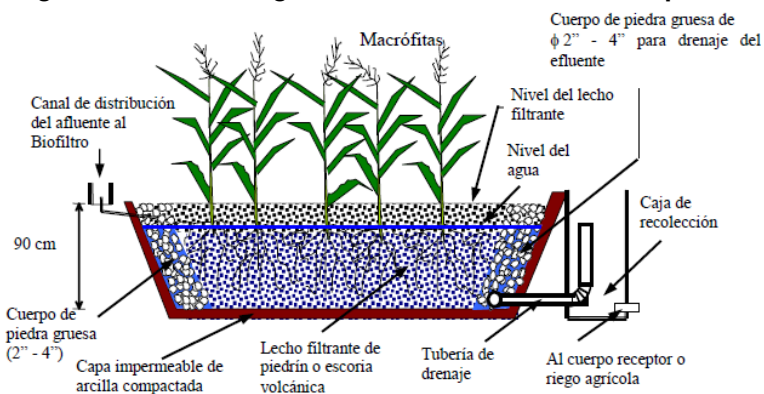
Los humedales son considerados como alternativas de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales municipales, industriales y agrícolas (Ayaz y Akca, 2001). Estos son ecosistemas complejos de medio saturado que mediante procesos de sedimentación, degradación microbiana, precipitación y absorción de las plantas son capaces de remover sólidos suspendidos, materia orgánica, patógenos, fosforo, nitrógeno y metales pesados (Platzer *et al.*, 2002); estos procesos se logran debido a la interacción existente entre plantas, microorganismos y suelo con los contaminantes presentes en el agua residual en la zona radicular o rizosfera del humedal construido (Stottmeister *et al.*, 2003).

Se diferencian dos tipos básicos de humedales construidos, los humedales de flujo superficial y los de flujo subsuperficial.

Los humedales de flujo superficial se caracterizan por la exposición del agua a la atmosfera, su diseño y construcción permite el flujo de agua sobre la superficie del suelo a través de canales de poca profundidad (0.3 a 0.8 m) con recubrimiento del fondo y una capa sumergida de suelo para las raíces de la vegetación macrófita emergente. Presenta muy buen tratamiento en climas cálidos, mientras que en climas fríos es recomendable aumentar el tiempo de retención hidráulica para mejorar las eficiencias de remoción, pero esto incrementa considerablemente el tamaño del humedal (Oakley, 2005).

Los humedales de flujo subsuperficial son utilizados como tratamiento secundario o terciario de aguas residuales, se caracterizan porque el agua fluye por debajo de la superficie del medio. Este tipo de humedal está constituido típicamente por canales de poca profundidad con un lecho filtrante y vegetación emergente, como se aprecia en Figura 5-7 (EPA, 2000).

Figura 5-7. Corte longitudinal de un humedal subsuperficial



Fuente: Platzer *et al.* (2002)

Los canales deben estar recubiertos con arcilla o membrana plástica para evitar la contaminación del manto freático. La profundidad del medio filtrante puede ser de 0.3 a 0.9 metros, puede utilizarse grava, roca triturada, arena u otro material; en Estados Unidos se utiliza grava fina con un diámetro mayor o igual a 0.6 cm hasta roca triturada mayor o igual de 15.2 cm (EPA, 2000).

La vegetación emergente más utilizada son micrófitas tales como *Typha spp.*, *Scirpus spp.*, *Phragmites spp.*, *Bambusa sp.*, *Dendrocalamus sp.*, (EPA, 2000; Madera *et al.*, 2003); estas plantas fisiológicamente se adaptan a medios saturados transportando y transfiriendo oxígeno hacia la zona radicular. Es importante considerar especies nativas de la zona donde se construirá el humedal para asegurar su crecimiento y función; de

preferencia, utilizar aquellas que generen un valor económico adicional (Madera *et al.*, 2003).

Las eficiencias de remoción de DBO₅, DQO y sólidos suspendidos totales son confiables (EPA, 2000), según Reed y colaboradores (1995) citado por (Madera *et al.*, 2003) las eficiencias de DBO₅ y sólidos suspendidos totales pueden estar en el orden de 60 a 90%. La remoción de nitrógeno y fósforo se logra con tiempos de retención lagos (EPA, 2000). Las eficiencias de remoción de bacterias patógenas de acuerdo con Reed *et al.*, (1995) citado por (Madera *et al.*, 2003) puede ser superior a 90%, y de 95 a 100% en la eficiencia de remoción de huevos de helmintos.

En la Tabla 5-4 se mencionan las ventajas y desventajas de los humedales construidos frente a otras tecnologías de tratamiento de aguas residuales.

Tabla 5-4. Ventajas y desventajas de los humedales construidos

Ventajas	Desventajas
– Proporcionan un tratamiento efectivo en la remoción de DBO₅, DQO, sólidos suspendidos, metales y algunos compuestos refractarios. – Minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo de operadores calificados – Bajos costos de construcción, operación y mantenimiento – Operación a nivel de tratamiento secundario es posible durante todo el año con excepción de climas más fríos. – No producen biosólidos y lodos residuales – Los humedales de flujo subsuperficial evitan problemas de mosquitos y otros insectos. – Proveen un entorno paisajístico	– Requieren extensas áreas para su implementación. – Operan con bajas tasas hidráulicas y orgánicas. – La remoción de DBO₅, DQO y nitrógeno es un proceso continuo renovable. – En climas fríos las bajas temperaturas durante el invierno reducen las tasas de remoción de DBO₅, NH₃, y NO₃. – Limitado potencial de nitrificación del amoníaco del agua residual. – En humedales de flujo subsuperficial los costos se incrementan por la compra de grava. – Los humedales de flujo superficial pueden generar mosquitos y otros insectos vectores.

Fuente: EPA (2000a); EPA (2000b); Ayaz y Akca (2001).

En los humedales construidos la operación y mantenimiento son rutinarias e incluyen el control hidráulico y de la profundidad del agua periódicamente, la limpieza de estructuras de entrada y descarga, el corte de hierbas en los taludes, inspección de taludes, corte de vegetación del humedal y monitoreo rutinario de la calidad del agua. En los humedales de flujo superficial deben hacerse un control de mosquitos y vectores (EPA 2000a; EPA 2000b).

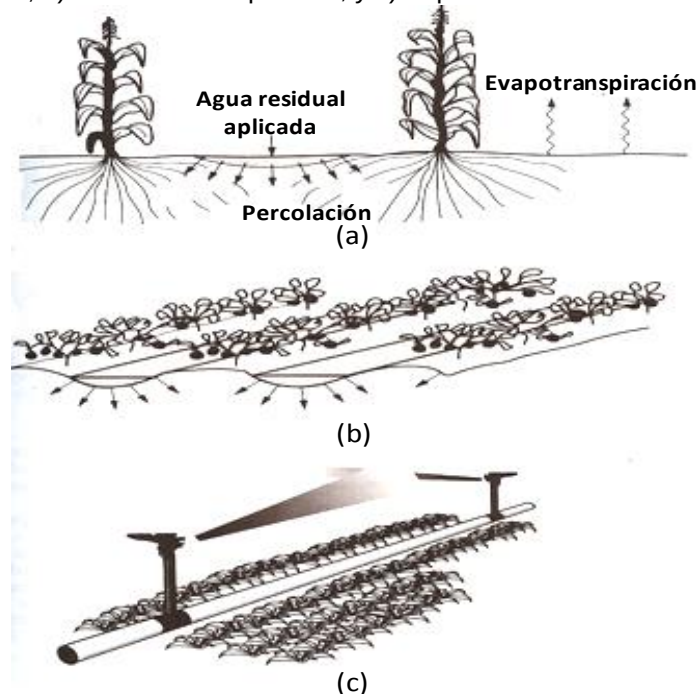
Tratamiento de aguas residuales sobre el suelo

El tratamiento de aguas residuales sobre el suelo se clasifican en sistemas de baja carga, sistemas de infiltración rápida y riego superficial; la aplicación de uno u otro método depende de las características del agua residual, topografía, disponibilidad de terreno, propiedades del suelo y de la consideración de las normas ambientales vigentes (Metcalf & Eddy, 1995b).

El sistema de baja carga es un método de tratamiento muy utilizado, en donde se emplea la capacidad hídrica de las plantas, la comunidad microbial y el suelo para remover y degradar los contaminantes presentes en el agua residual a medida que el flujo atraviesa la matriz planta-suelo (Figura 5-8). Los componentes orgánicos son removidos en los primeros dos centímetros del suelo por filtración, adsorción y oxidación bacterial; la remoción del nitrógeno es mediante la asimilación del cultivo, volatilización de amoníaco y almacenamiento del suelo; y la remoción del fósforo, mediante procesos de adsorción y precipitación química (Romero, 2004).

Figura 5-8. Tratamiento de baja carga

a) Trayectoria hidráulica; b) Distribución superficial, y c) Aspersión.



Fuente: Metcalf & Eddy (1995b).

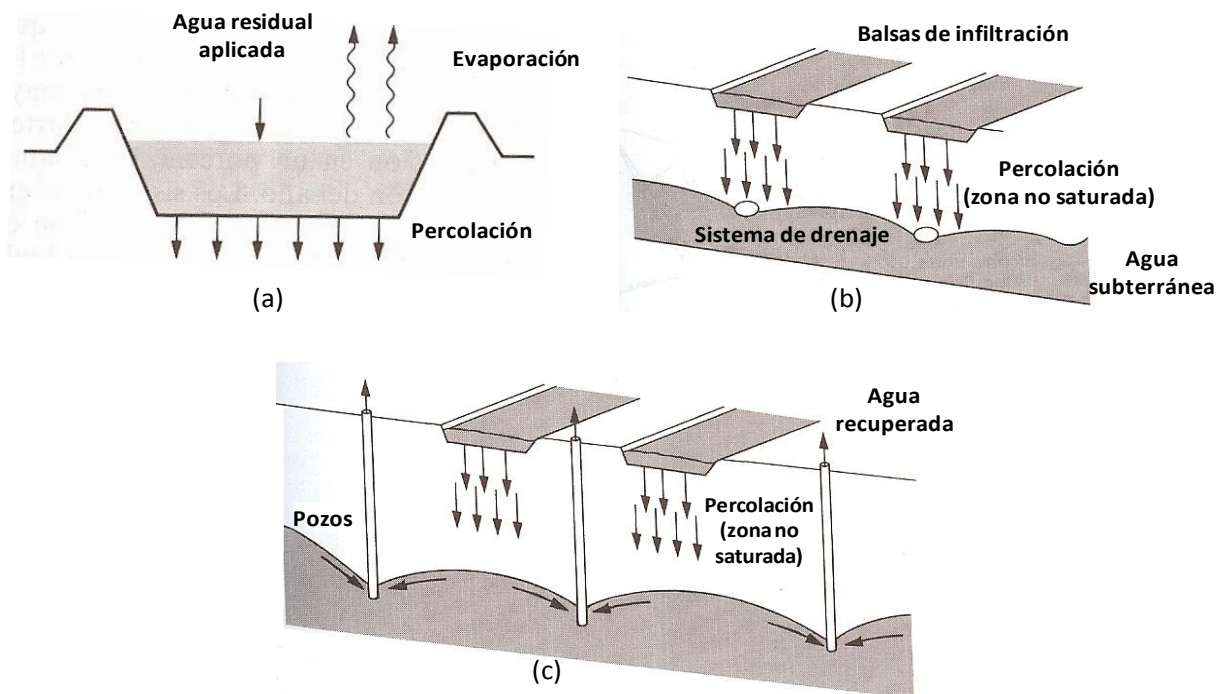
El método consiste en aplicar el agua residual de forma intermitente con efluentes primario o secundario, mediante cualquier método de riego a cultivos agrícolas o

vegetación (Figura 5-9). Se utilizan ciclos de aplicación de 4 a 10 días para mantener el terreno en condiciones aerobias (Metcalf & Eddy, 1995b).

Los sistemas de infiltración rápida consisten en una serie de estanques de infiltración de poca profundidad con ciclos de inundación del suelo, percolación y secado (Figura 5-9). La utilización de este método está limitada por las características del suelo, costos del terreno y los impactos sobre el agua subterránea. Es necesario un pre tratamiento para asegurar la calidad del efluente y evitar taponamiento del suelo y malos olores (Metcalf & Eddy, 1995b; Romero, 2004).

Figura 5-9. Trayectorias hidráulicas en sistemas de infiltración rápida

a) Trayectoria hidráulica; b) Recuperación mediante drenes, y c) Recuperación mediante pozos de extracción



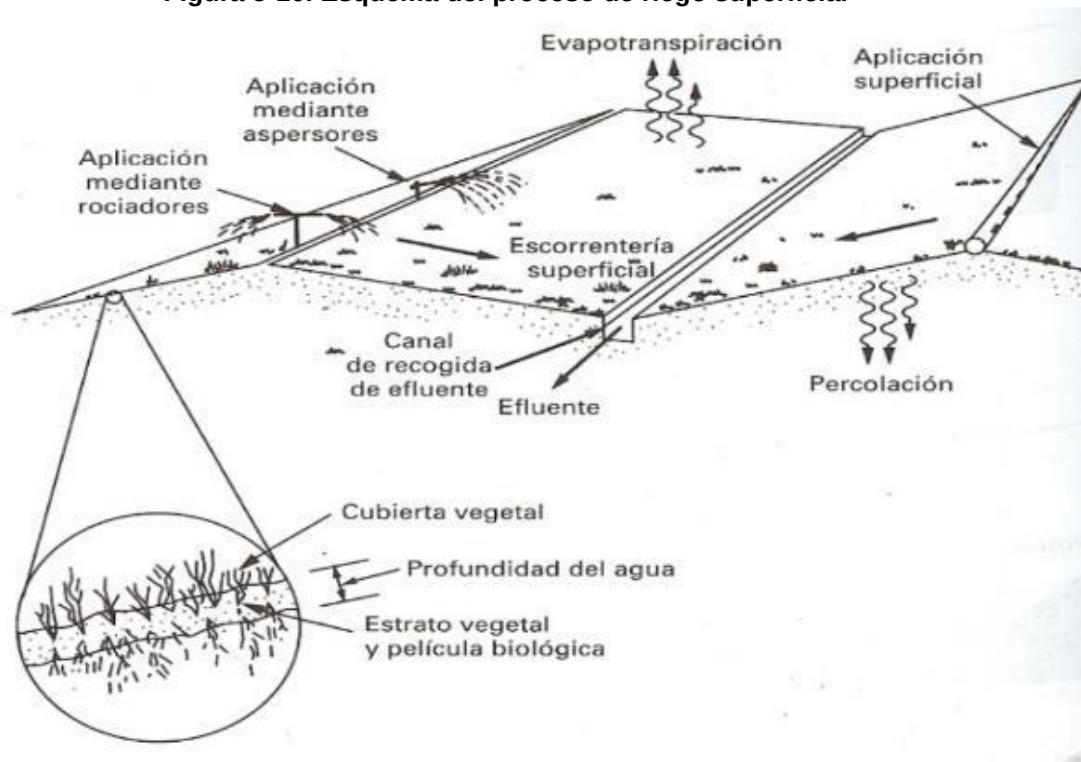
Fuente: Metcalf & Eddy (1995b).

Los métodos más adecuados para la distribución en los sistemas de infiltración son los aspersores y los estanques de infiltración de fondo permeable el uso de uno u otro depende de la topografía, y recursos económicos (Romero, 2004).

Los sistemas de riego superficial consisten en la aplicación del agua residual en la zona superior del terreno con pendientes seleccionadas, dejando fluir el agua residual en recorridos de 30 a 100 metros con vegetación hasta unas zanjas recolectoras de la escorrentía superficial situadas en el extremo de la pendiente (Figura 5-10). Se utilizan

ciclos de operativos de un día con un periodo de aplicación de 8 a 12 horas seguido de una fase de secado de 16 a 12 horas. Las pendientes utilizadas van de 1 a 12%. Los métodos de aplicación pueden ser por aspersores, rociadores y aplicación superficial como se aprecia en la Figura 5-10 (Metcalf & Eddy, 1995b; Romero, 2004).

Figura 5-10. Esquema del proceso de riego superficial



Fuente: Metcalf & Eddy (1995b).

Deben considerarse para este método la carga hidráulica, tasa de aplicación, período de aplicación, longitud de la pendiente y la carga orgánica. Es de gran importancia la atención del clima debido a que este método de tratamiento de agua residual depende de la actividad microbiológica. En climas cálidos se logra una mejor eficiencia de remoción de contaminantes, mientras que, en climas fríos los rendimientos de remoción de nitrógeno pueden verse disminuidos al igual que otros contaminantes (Metcalf & Eddy, 1995b).

En la Tabla 5-5 se mencionan las ventajas y desventajas de los tratamientos sobre el suelo en comparación con tecnologías convencionales de tratamiento de aguas residuales.

Tabla 5-5. Ventajas y desventajas de los tratamientos sobre el suelo

Ventajas	Desventajas
----------	-------------

– Minimizan la necesidad de equipos mecánicos y energéticos. – Son fuente de nutrientes para la vegetación implementada. – Recargan acuíferos. – Bajos costos de construcción, operación y mantenimiento – Generan productos con valor económico – Tratamiento terciario que protege los cuerpos de agua superficiales al evitar la descarga del efluente tratado.	– Requieren extensas áreas para su implementación. – Limitada por condiciones climáticas y características físicas y químicas de los suelos. – En algunos casos puede generar cambios en las propiedades físicas y químicas del suelo. – Puede contaminar las aguas subterráneas si los tratamientos previos son inadecuados.
---	--

Fuente: Metcalf & Eddy (1995b); Polprasert, (2007).

La operación y mantenimiento en este tipo de sistemas está enfocado al suelo, deben hacerse arados para controlar la compactación, acumulación de sólidos, endurecimiento de la capa superficial y de la superficie de la fosa. Deben de monitorearse periódicamente los niveles de pH y sodio intercambiable para verificar el balance químico del suelo. En los sistemas de infiltración rápida deben mantenerse las tasas de infiltración, prevenir la formación de hielo en climas fríos y evitar el taponamiento con sólidos del suelo. En los sistemas de riego superficial deben incluir la afinación de aplicación del agua residual, cosecha de la vegetación y el mantenimiento de los canales colectores de escorrentía (Crites y Tchobanoglous, 2000).

– **Tratamiento de aguas residuales convencionales**

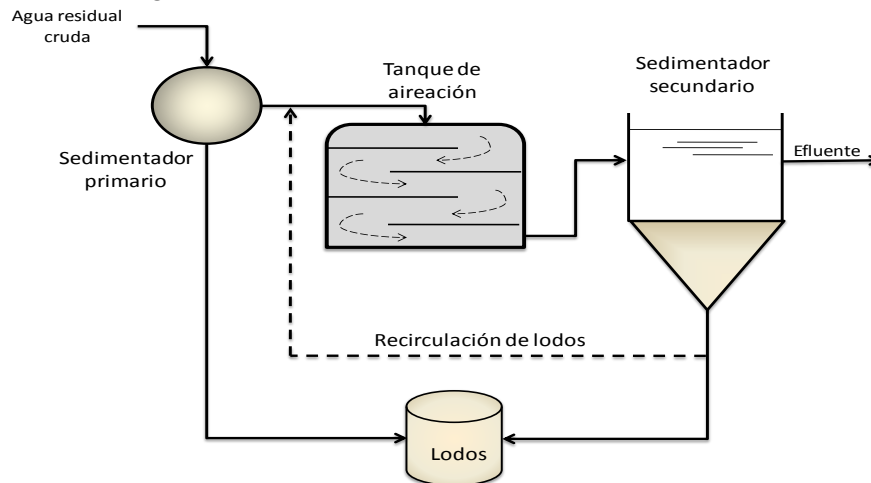
Existen varios procesos para el tratamiento de aguas residuales que se han utilizado desde hace muchos años y que se siguen utilizando. Se describen a continuación los más utilizados:

Lodos activados

Los lodos activados es un proceso biológico que consiste principalmente en un tanque de aireación, sedimentador, recirculación de los lodos y una línea de desecho de lodos (Figura 5-11). El proceso se basa en el contacto de las aguas residuales con el floc biológico previamente formado en un tanque de aireación. El lodo activado consiste en una masa floculante de microorganismos, materia orgánica muerta y materiales inorgánicos que tiene una superficie altamente activa para la adsorción de materiales coloidales y suspendidos (Romero, 2004).

El sistema convencional opera con tiempos de retención celular de 5-15 días, con cargas volumétricas de 0.32 a 0.64 kg de DBO₅ aplicada/m³ por día. La temperatura óptima para el crecimiento bacteriano debe ser de 35 °C (Metcalf & Eddy, 1995b).

Figura 5-11. Proceso de lodos activados convencional

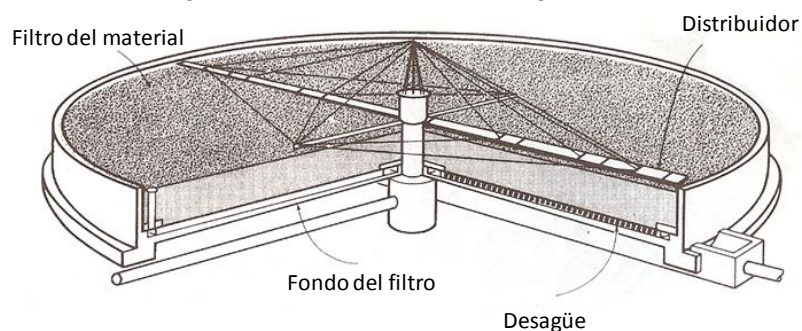


Fuente: Metcalf & Eddy (1995b).

Filtro percolador

El filtro percolador es un tratamiento biológico en donde la materia orgánica es degradada por la acción de microorganismos adheridos al medio, consiste en la aplicación de agua residual sobre un lecho filtrante y dejar percolar (Figura 5-12). El lecho filtrante es un medio altamente permeable que tiene adheridos microorganismos y usualmente el medio es piedra de tamaño entre 2.5 a 10 cm, de profundidad variable de 0.9 a 2.5 m (Metcalf & Eddy, 1995a).

Figura 5-12. Corte de un filtro percolador



Fuente: Metcalf & Eddy (1995a).

El filtro se construye generalmente de forma circular con un distribuidor rotatorio superficial de agua, aunque también existen rectangulares con aplicación de agua

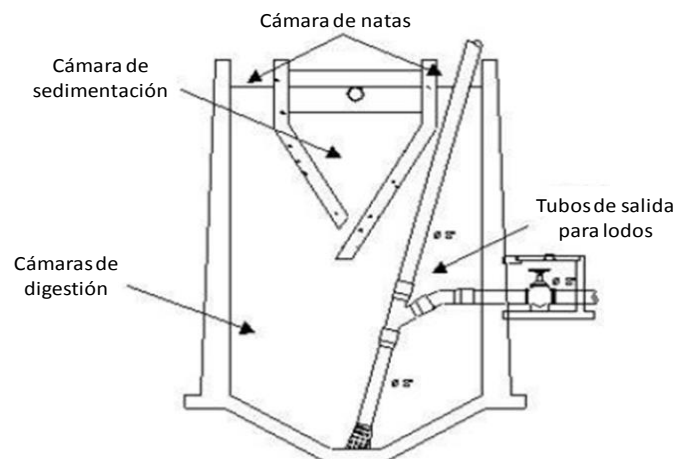
mediante tuberías y toberas fijas. Están provistos en su parte inferior de un sistema de drenaje que recoge el agua residual y los sólidos biológicos (Figura 5-12). Los compuestos orgánicos son removidos mediante proceso de adsorción y descomposición por la biomasa adherida al medio filtrante (Romero, 2004).

Los filtros percoladores se clasifican de acuerdo a la carga orgánica en baja carga, media, alta, muy alta, desbaste y de doble etapa. La carga orgánica varía de 0.08 a 1.80 kg DBO₅/m³-día y la carga hidráulica de 1.20 a 37.55 m³/m²-día (Metcalf & Eddy, 1995b).

Tanque Imhoff

El tanque Imhoff consiste en un sistema de tratamiento anaerobio de dos pisos. Está constituido por un compartimento inferior para digestión de sólidos sedimentados y una cámara superior de sedimentación. El agua residual ingresa al sedimentador en donde los sólidos se sedimentan y luego pasan a través de una abertura del compartimiento superior hacia la zona de digestión (Figura 5-13). En el proceso existe una producción de gas producto de la digestión anaerobia que debe ser eliminado a través de una zona de ventilación (Romero, 2004).

Figura 5-13. Vista de los componentes de un tanque Imhoff

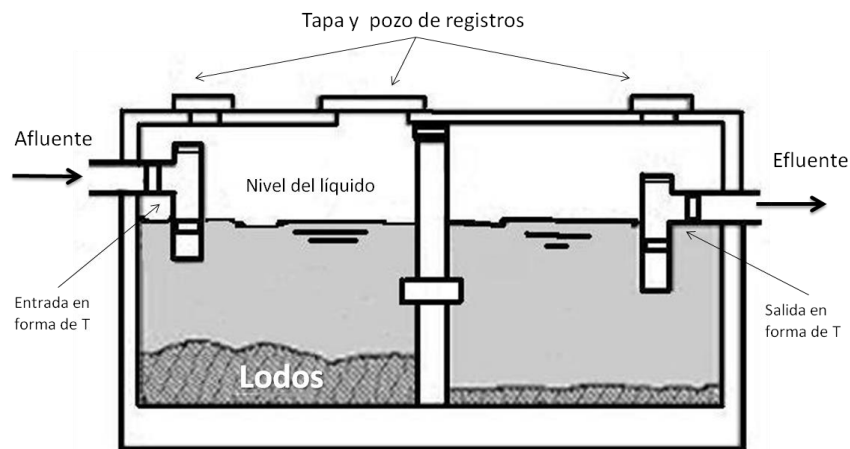


Fuente: OPS (2005).

Tanque séptico

El tanque séptico consiste en uno o varios tanques o compartimentos en serie (Figura 5-14), para la sedimentación de sólidos y digestión. La función principal del tanque séptico es el acondicionamiento de las aguas residuales para su disposición subsuperficial en sitios donde no exista sistema de alcantarillado (Romero, 2004).

Figura 5-14. Sección transversal de fosa séptica convencional de dos compartimentos



Fuente: Crites y Tchobanoglous, (2000).

5.4. Selección de tratamientos de aguas residuales

La selección de tecnología sostenible para el tratamiento de aguas residuales domésticas debe considerar las diferentes características sociales, topográficas, tecnológicas, demográficas, económicas, climatológicas (Bernal *et al.*, 2003a; b) y políticas, así como la disponibilidad tecnológica y la experiencia. La selección del sistema depende de la naturaleza del agua residual (degradabilidad y tratabilidad) y los requisitos de descarga. Otros factores importantes a considerar son el impacto ambiental, disponibilidad de tierra, la vida del proyecto y el costo (Abbassi y Baz, 2008).

El contexto de los países debe considerarse en la selección de los sistemas de tratamiento de aguas residuales. En países desarrollados los puntos críticos son eficiencia, fiabilidad, eliminación de lodos y requisitos de tierra, mientras que en los países en desarrollo los puntos críticos son los costos de construcción, la sostenibilidad, simplicidad y costos de operación (Abdel-Halim y Rosenwinkel, 2005).

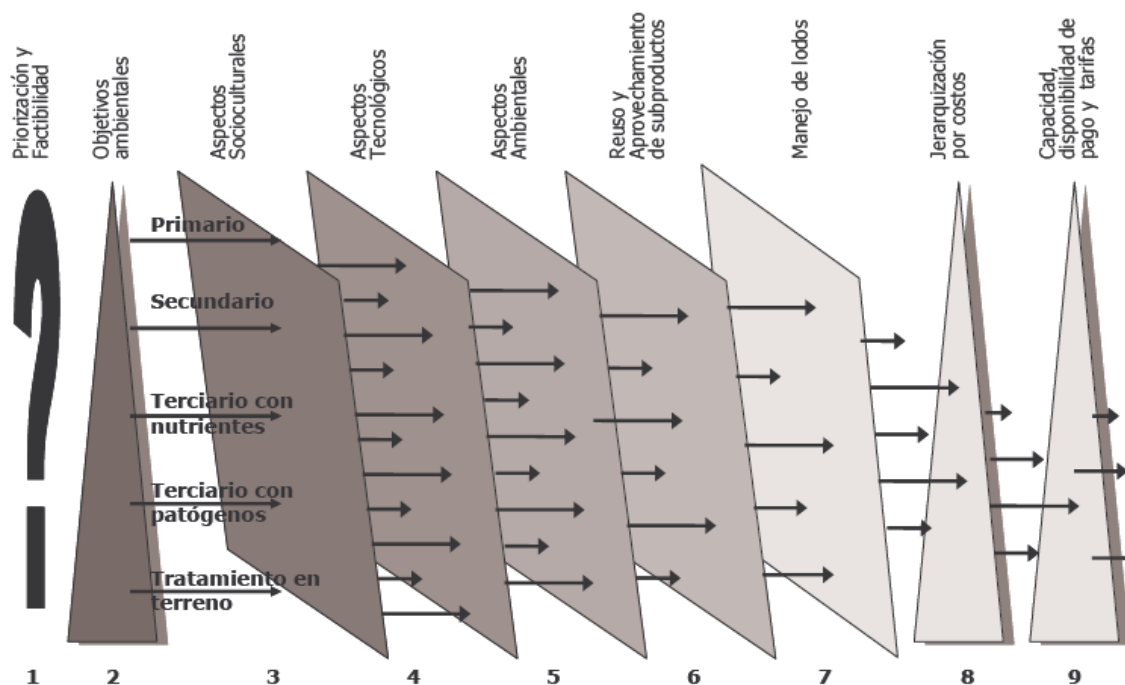
Existen varias metodologías para la selección de tecnología, Horan y Parr (1994) citado por (Galvis *et al.*, 2007), las clasifican en cinco categorías: documentos descriptivos, listas de chequeo, matrices de selección, algoritmos y métodos que incluyen programas computacionales.

En los últimos años, se han desarrollado nuevas metodologías considerando el contexto multidisciplinario y evaluando procesos medioambientales, socioculturales, tecnológicos, económicos (Guerrero, 2003), institucionales y financieros; como por ejemplo el modelo conceptual de Selección de Tecnologías para el Control de la Contaminación por Aguas Residuales (SELTAR) para poblaciones entre 500 y 30000 habitantes, que tiene como punto de partida la priorización de inversiones y objetivos ambientales (Galvis *et al.*, 2007).

El modelo conceptual SELTAR (CINARA et al., 2005), es una herramienta de planeación, que permite seleccionar y jerarquizar alternativas tecnológicas sostenibles, considerando niveles definidos que se articulan para configurar un solo algoritmo.

Este modelo está conformado por 9 bloques temáticos a través de los cuales se realiza la selección de tecnologías sostenibles para el tratamiento de aguas residuales (104 esquemas de tratamiento) y el manejo y disposición de lodos (9 alternativas tecnológicas). Los bloques temáticos considerados en este modelo son: priorización y factibilidad; objetivos ambientales; aspectos socioculturales; aspectos tecnológicos; aspectos ambientales; reuso y aprovechamiento de subproductos; manejo de lodos; jerarquización por costos; capacidad, disponibilidad de pago y tarifa (Figura 5-15).

Figura 5-15. Esquema general del modelo conceptual SELTAR



Fuente: CINARA et al., (2005).

Los bloques del modelo conceptual contienen formatos de datos de entrada, criterios básicos, procedimientos y selecciones; estos son utilizados en los niveles posteriores. La información requerida por los 9 bloques se listan en la Tabla 5-6.

Tabla 5-6. Información requerida en los diferentes bloques del modelo conceptual		
BLOQUE	NOMBRE	INFORMACIÓN REQUERIDA

1	Priorización y factibilidad del proyecto	- Plan de ordenamiento de la cuenca, Plan de desarrollo del municipio, Plan de ordenamiento territorial del municipio, Índice de Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI). - Coberturas de acueducto, alcantarillado, aseo, disposición de residuos sólidos, agua potable, macromedición, micromedición, porcentaje de pérdidas en acueductos.
2	Objetivos Ambientales	- Caudal, calidad fisicoquímica y microbiológica del agua residual. - Tipo de fuente receptora, cantidad y calidad fisicoquímica y microbiológica del cuerpo receptor.
3	Aspectos socioculturales	Aceptación de la comunidad, disponibilidad de energía eléctrica, disponibilidad de materiales de construcción, disponibilidad de mano de obra, capacidad de gestión, acceso a centro regional urbano.
4	Aspectos tecnológicos	Caudal, temperatura, área disponible, nivel freático, pendiente del terreno, permeabilidad.
5	Aspectos ambientales	Vocación de usos del suelo en el área de influencia de la planta
6	Reuso y aprovechamiento de subproductos	- Actividades con potencial de reuso. - Conocimiento y aceptación del reuso.
7	Manejo de lodos	- Área de terreno disponible, caudal de agua residual, temperatura, precipitaciones, nivel freático, pendiente del terreno. - Vocación de uso del suelo, demanda potencial de biosólidos.
8	Análisis de costos	Costos de inversión inicial, costos de terreno, costos de requerimiento para administración, operación y mantenimiento.
9	Capacidad y disponibilidad de pago	Número de usuarios, ingreso promedio por familia, capacidad de pago, distribución de la población por estrato socioeconómico, recursos disponibles para subsidios, disponibilidad a pagar.

Fuente: Galvis *et al.*, (2007).

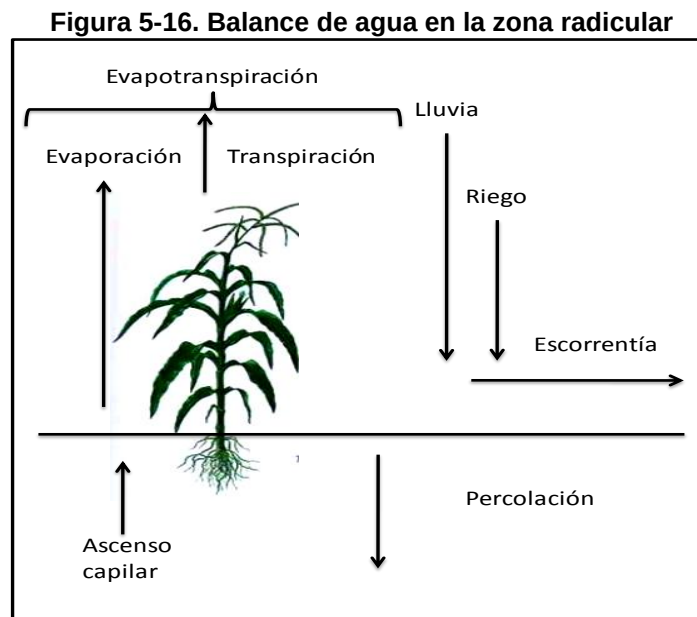
El bloque uno permite establecer la factibilidad del proyecto, mediante el cumplimiento de criterios relacionados con los aspectos fisicoquímicos de la fuente receptora, cobertura del acueducto y alcantarillado. El bloque dos considera los criterios normativos y ambientales. El bloque tres analiza los criterios de del contexto donde se implementará la planta de tratamiento; las tecnologías evaluadas son las filtradas en el bloque dos. El bloque cuatro considera aspectos técnicos de diseño, utilizando las tecnologías filtradas por el bloque anterior. El bloque cinco filtra las tecnologías en función de la capacidad de generar problemas asociados con producción de olores y vectores en la zona donde se establecerá la planta de tratamiento. El bloque seis considerando las normativas nacionales e internacionales para el reuso del agua residual y subproductos. El bloque siete selecciona entre 9 tecnologías el esquema para el manejo de lodos. En el bloque ocho se realizan un análisis de costos con valor presente neto de las tecnologías seleccionadas en el bloque 4 y bloque 7. Finalmente el bloque 9 mediante un análisis socioeconómico de la comunidad se establece la capacidad y disponibilidad de pago.

5.5. Riego

5.5.1. Definición

El riego es una práctica que se realiza con el fin de proporcionar agua a los cultivos cuando la cantidad de lluvia es insuficiente para satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos (FAO, 2010).

La necesidad hídrica de los cultivos se calcula considerando el balance diario del agua presente en la zona radicular del suelo, como se observa en la Figura 5-16. Los procesos que añaden agua a la zona radicular son la lluvia, el riego y el ascenso capilar del agua subterránea. Mientras que la evaporación, transpiración del cultivo y la percolación remueven el agua (Allen *et al.*, 2006).



Fuente: Adaptado de Allen *et al.* (2006)

El riego debe compensar las pérdidas de agua por evapotranspiración (ETc). La evapotranspiración está compuesta por la evaporación y la transpiración, que ocurren simultáneamente y están influenciadas por factores como el clima, características del cultivo, el manejo y el medio de desarrollo (Allen *et al.*, 2006).

La evapotranspiración es el producto entre la evapotranspiración potencial (ETo) y el coeficiente de cultivo. El valor de Kc, es determinado experimentalmente, es único para cada cultivo y zona de producción; representa un promedio en el tiempo de evaporación del suelo y la transpiración.

5.5.2. *Proyectos de irrigación de pequeña escala*

De acuerdo con la FAO (2002), en zonas áridas para mejorar la productividad de la agricultura es elemental disponer de riego suplementario para superar las sequías de corta duración, las cuales son críticas y reducen la productividad. El rendimiento de los cultivos en regadíos es más del doble que los producidos sin riego; debido a ello es de importancia proyectos de riego a pequeña escala, para incrementar la productividad de las áreas de secano y asegurar la producción de alimentos, siempre que se disponga de agua localmente.

El riego a pequeña escala se define según el contexto; considera principalmente la extensión de la superficie del proyecto y factores socioeconómicos.

En México de acuerdo con Noriega y colaboradores (2008), son pequeños aprovechamientos de agua (presas de almacenamiento, presas derivadas, plantas de bombeo, pozos profundos y manantiales) que funcionan en general por un manejo campesino para la producción de alimentos, generación de ingresos y empleos.

Bahena y Tornero (2009), en un diagnóstico de las unidades de producción familiar en pequeña irrigación en la subcuenca del río Yautepec, Morelos, precisa las características de la pequeña irrigación, dentro de las cuales se resaltan la avanzada edad de los productores, bajos niveles educativos, limitaciones económicas, bajos ingresos por la venta de cosechas, baja rentabilidad agrícola.

Otra característica que resaltan Bahena y Tornero (2009) es que la agricultura de pequeña irrigación en esta región es de tipo minifundista, con agricultores en su mayoría propietarios de la tierra y con superficies de cultivo menores a 4 ha; esta extensión es similar a la reportada por Noriega y colaboradores en proyectos de riego a pequeña escala (2008).

En Colombia el sector de pequeña irrigación comprende proyectos con áreas menores a 500 ha, de acuerdo a Urrutia (2008), las características principales son ubicación en zonas de ladera, baja producción y rendimientos de cultivos, agricultura dependiente de las lluvias, baja tecnología y prácticas culturales inapropiadas, deterioro de recursos naturales, pequeñas áreas de cultivo (minifundios), bajos ingresos y capacidad de crédito, altos índices de analfabetismo y desnutrición.

En Guatemala el riego a pequeña escala también denominado mini-riego, consiste representativamente en la captación de un manantial e instalación parcelaria con riego aplicado por aspersión. Estos sistemas son construidos con recursos propios o crediticios y operados por los beneficiarios (FAO, 2000).

La pequeña irrigación tiene un papel muy importante en el sector agrícola, pues contribuye a elevar el nivel de vida de los pequeños agricultores mediante la implementación de agricultura bajo riego, incrementa la productividad y producción agrícola, incrementa el número de cosechas al año y detiene procesos migratorios a los centros urbanos (Urrutia, 2008).

5.5.3. Aspectos organizacionales

De acuerdo a Daft (2005), las organizaciones deben concebirse como un sistema que tienen un conjunto de elementos que interactúan entre sí, que recibe entradas del entorno, las transforma y descarga en él un producto determinado. En este sentido, las dimensiones organizacionales se pueden dividir en dos tipos: estructural y contextual (Figura 5-17). Las dimensiones estructurales proporcionan las etiquetas para describir las características internas de una organización. Las dimensiones contextuales describen las características de la organización global (tamaño, tecnología, entorno y metas) y elementos interrelacionados que son la base de la estructura de una organización y de los procesos de trabajo.

Figura 5-17. Interacción dimensiones contextuales y estructurales del diseño organizacional



Fuente: Daft (2005).

Las dimensiones que configuran las organizaciones deben verse de forma integral por tanto deben considerarse las dimensiones de carácter político-cultural (poder y conflicto y cultura organizativa), socio-técnico (estructura administrativa, recursos humanos, procesos administrativos y prestación de servicios), control y mejora (información y control; cambio organizativo y mejora organizativa), (Ramíó, 1999); deben considerarse además que las organizaciones no son estáticas y deben adaptarse a los cambios del ambiente (Daft, 2005).

Los desafíos específicos de las organizaciones están relacionadas con cuestiones diversas como: la globalización, la conservación de altos estándares éticos y la responsabilidad social, la rápida respuesta ante los cambios en el entorno mundial, las necesidades de clientes, la administración del ámbito digital de trabajo y el respeto a la diversidad (Daft, 2005), otro desafío es el comportamiento organizacional para determinar el impacto que individuos, grupos y estructuras tienen en la conducta dentro de la organización, con la finalidad de mejorar la eficacia de las organizaciones (Robbins, 2004).

Las organizaciones comunitarias se clasifican dentro de las organizaciones sin fines de lucro, suponen distintas formas de funcionamiento particular, dentro de ellas están: Individual, grupal, sistemas institucionales comunitarios y conexiones distantes (Atria *et al.*, 2003). La grupal es una extensión de las redes individuales, las relaciones se cruzan entre si y se densifican (4 a 12 personas), conformando un grupo capaz de funcionar como equipo, este tipo de capital suele tener emprendimientos asociativos para generar ingresos. Los sistemas institucionales comunitarios son generados por el capital social de personas o grupos, con la idea de propiedad de toda la comunidad, bajo términos de liderazgo y control social de sus miembros.

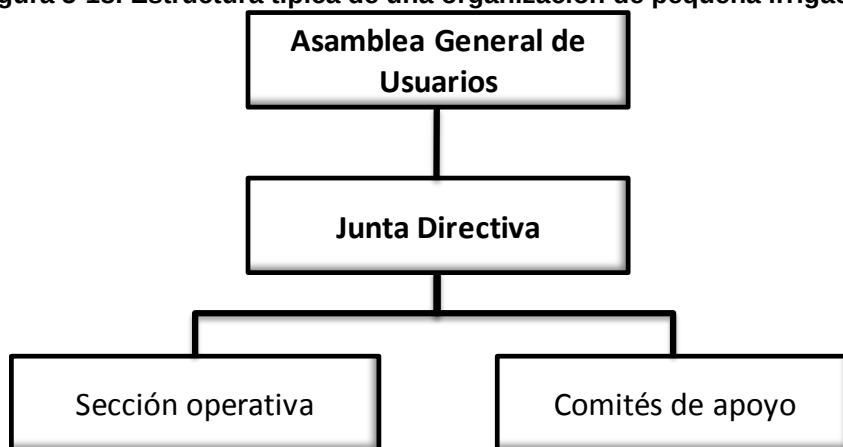
La gestión comunitaria del agua es un actividad de la comunidad que abarca la socio territorialidad, la relación en los ciclos de producción agrícola, la participación amplia de los comunitarios, una estructura de equidad entre sus miembros y una gran flexibilidad en la aplicabilidad de reglas y normas relacionadas con la circunstancialidad de la gestión comunitaria (Gerbrandy y Hoogendam, 1998).

Para la gestión de los sistemas de riego es necesario una coordinación y organización de los usuarios o participantes (Gerbrandy y Hoogendam, 1998), mediante una autoridad constitutiva para lograr la sostenibilidad de los sistemas de riego y drenaje (Hunt, 1988).

Apollin y Eberhart (1998), indican que es importante considerar el riego como una construcción social que lleva a grupos humanos, comunidades e individuos (hombres y mujeres), a definir colectivamente las modalidades de acceso al agua y de creación o conservación de los derechos del agua, así como las obligaciones y reglas que todos deben cumplir para mantener y conservar el acceso a este recurso. Estas normas se derivan de acuerdos sociales y relaciones de poder entre poblaciones. Dentro de las relaciones de poder son muy importantes aquellas, producto de las diferencias de acceso a la tierra, condición étnica, condición de género, diferenciación económica y social, y de las condiciones agroecológicas entre otras. Las normas que resultan de estas relaciones condicionan finalmente el diseño técnico de la infraestructura que tiene que adecuarse a este manejo socialmente establecido.

Las formas organizativas en los sistemas de pequeña irrigación normalmente son de tipo lineal, cuya estructura es simple y es común en pequeñas organizaciones. De acuerdo con Arango (1998) y Urrutia (2009) estas organizaciones están constituidas básicamente por la Asamblea General de Usuarios que es la máxima autoridad en la toma de decisiones; la Junta directiva, constituida por los usuarios elegidos democráticamente en Asamblea y quienes dirigen la organización; Sección operativa integrada por fontanero y auxiliar; y finalmente por Comités de apoyo en educación, mercadeo, inversiones, etc., esta estructura organizativa se observa en la Figura 5-18.

Figura 5-18. Estructura típica de una organización de pequeña irrigación



Fuente: Urrutia (2009).

Esta estructura se caracteriza por tener líneas directas de responsabilidad y mando en la Tabla 5-7 se mencionan las ventajas y desventajas.

Tabla 5-7. Ventajas y desventajas de las organizaciones con estructura lineal

Ventajas	Desventajas
– Sencilla y fácil de comprender – Las decisiones se toman con rapidez y eficiencia pero no con exactitud – Fácil comunicación – Personal sabe a quién informa, evitando rehuir responsabilidad – Se puede obtener acción rápida con un mínimo de requisitos	– Estructura rígida e inflexible – Falta de asesoría de expertos en la estructura – Requiere habilidad, preparación y conocimiento técnico – La ausencia de uno de los encargados o jefes anula la organización. – La coordinación y trabajo en equipo se ve restringido por diferencias entre los encargados

Fuente: Blank (2002).

5.5.4. Infraestructura hidráulica

Los sistemas de riego están provistos de diferentes obras hidráulicas, las cuales son necesarias para asegurar la cantidad de agua necesaria en el área de riego; dentro de las obras están las de captación, conducción, distribución e infraestructura predial.

Se describen a continuación cada una de las obras hidráulicas, considerando especialmente aquellos relacionados a los sistemas de riego en ladera:

– Fuente hídrica

Para la construcción de la infraestructura de riego es importante disponer de fuentes de agua, las cuales pueden ser ríos, manantiales y aguas subterráneas (García, 2008); los ríos son la fuente más común para los proyectos de riego y en zonas de ladera es muy común el uso de manantiales, mediante la captación de los afloramientos de agua en la zona montañosa o cordillera.

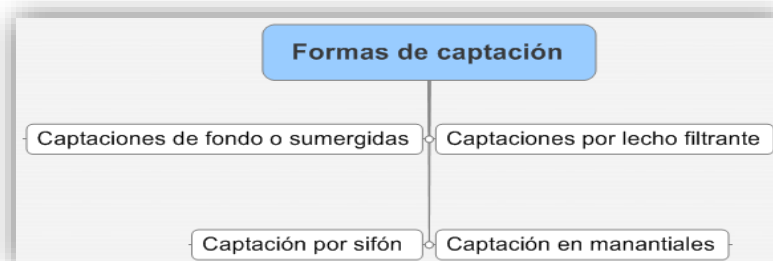
Adicionalmente se debe considerar el agua residual tratada como una fuente con gran valor en aquellas zonas con ausencia de otras fuentes de agua para riego (FAO, 2002).

– Captación

Las obras de captación son estructuras destinadas a captar o extraer una determinada cantidad de agua de una corriente de agua. Estas obras dependen del tipo de uso y las características hidrológicas e hidráulicas de la corriente de agua que se quiere aprovechar (Materón, 1997).

Existen diferentes formas de captación de las corrientes de agua. La selección del tipo de captación depende de la corriente a derivar, la magnitud de los caudales a captar y problemas de sedimentación; para este caso se consideran las utilizadas para pequeños caudales (Figura 5-19).

Figura 5-19. Formas de captación en pequeñas corrientes de agua



Fuente: adaptado de Materón (1997).

En las captaciones de fondo el punto de toma se apoya sobre el lecho del río; este tipo de captaciones consta de una estructura rectangular con un muro de encauzamiento transversal y rejilla. La estructura de encauzamiento puede ser un canal o tubos perforados y debe ubicarse perpendicular al flujo del río.

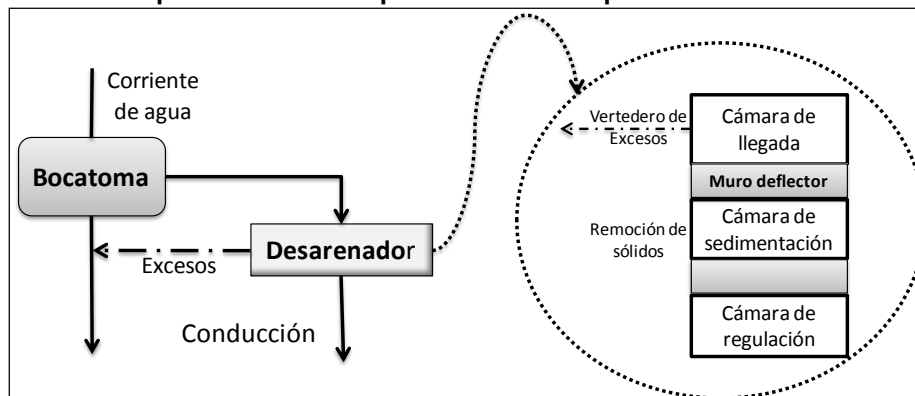
Las captaciones por lecho filtrante, permiten captar el agua utilizando un filtro en el fondo de la corriente del agua, logrando de esta forma una mayor calidad del agua. Este tipo de captación consta de una presa o dique, muros laterales con aletas de entrada y salida, material filtrante, tubería perforada, decantador de flujo ascendente, válvulas, desarenador y vertedero. Este tipo de captación es ampliamente utilizado.

En las captaciones por sifón, se utilizan sifones de PVC de diámetros comerciales y acorde al caudal. Los sifones son fabricados a partir de formaleatas que permiten tener la curvatura deseada y son utilizados para facilitar el riego en cultivos con caudales pequeños que circulan en surcos superficiales.

La captación en manantiales de ladera consta de protección del afloramiento, cámara húmeda para regular el gasto a utilizarse y la cámara seca que sirve para proteger la válvula de control. La primea parte consta de una losa de concreto que cubre la extensión total del área adyacente al afloramiento; la segunda, está provista de una canastilla de salida para conducir el agua requerida y un cono de rebose para eliminar el exceso de agua; la tercera es una estructura de concreto en donde se instalan las válvulas (CEPIS, 2004)

De acuerdo a Arango (1998) en los sistemas de riego en ladera las obras de captación regularmente se componen de una bocatoma y desarenador, como se muestra en la Figura 5-20.

Figura 5-20. Esquema de los componentes de la captación de corrientes de agua



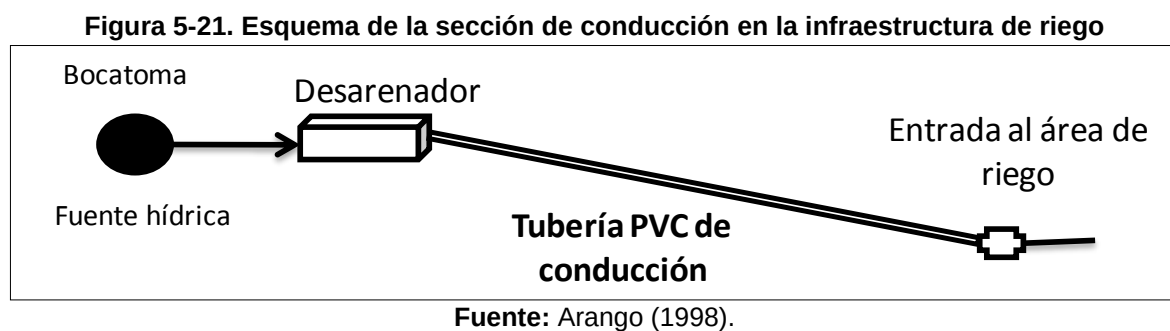
Fuente: adaptado de Materón (1997).

La bocatoma, es una estructura hidráulica con la cual se capta y deriva el agua de una corriente superficial hacia el sistema de riego. Está compuesta por muro de presa, rejilla y cámara de derivación.

El desarenador, es una estructura hidráulica que permite retener y evacuar los sedimentos como arena y grava, para evitar obturaciones del sistema. El desarenador tiene tres cámaras (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). La primera tiene un vertedero de excesos de agua; la segunda cámara permite la sedimentación de las partículas debido a un muro deflector con orificios en donde el agua pierde turbulencia y la tercera cámara es equivalente a un tanque de regulación del caudal.

– Conducción

Las obras de conducción son aquellas destinadas a transportar el agua desde el punto de la captación hasta la zona de riego (Arango, 1998), como se muestra en la Figura 5-21. En las zonas de ladera, se transporta con ductos cerrados de tubería PVC para garantizar una buena eficiencia de conducción (Arango, 1998).



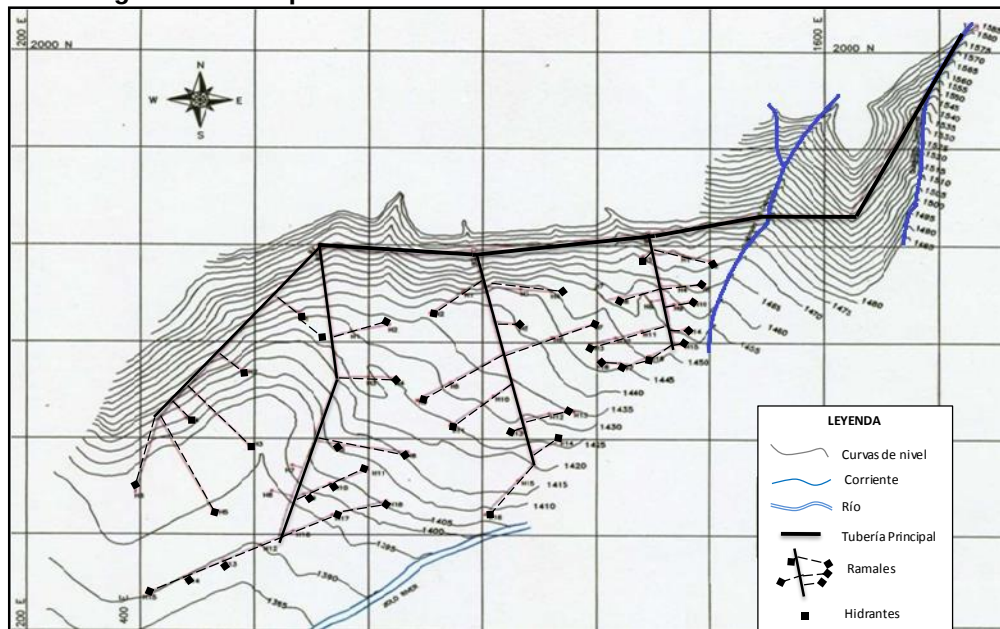
Por las características de ubicación y topografía los sistemas son por gravedad, debido a que generalmente la bocatoma se encuentra más alta que el área de riego, esta diferencia de nivel permite que el agua fluya a través de la tubería manteniendo la presión suficiente para operar el sistema de riego sin necesidad de bombeo.

– Distribución

La red de distribución se encuentra constituida por la tubería principal, tuberías secundarias y terciarias desde la entrada a la zona de riego hasta las tomas de riego prediales o hidrantes (Loaiza, 2003). Las tuberías secundarias y terciarias se denominan ramales. En la Figura 5-22 se aprecian los componentes de la red de distribución.

En el sistema de distribución suele emplearse la gravedad como fuerza de acción del flujo de agua para mantener el caudal y presión en los predios de riego (Arango, 1998).

Figura 5-22. Esquema de la red de distribución en zonas de ladera



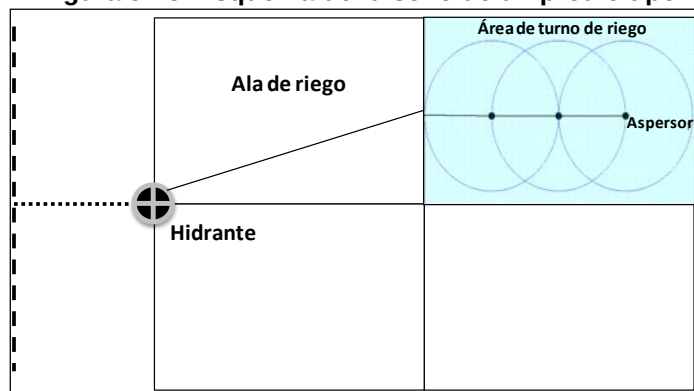
Fuente: Urrutia (2009).

– Infraestructura predial

La infraestructura predial comprende desde las tomas de riego prediales o hidrantes hasta el área de riego del predio de cada finca o propiedad que tenga influencia en el proyecto de riego (Loaiza, 2003).

Esta infraestructura depende básicamente del método de riego a utilizar, por ejemplo en la Figura 5-23 se observa el esquema de un diseño de un predio tipo con método de riego por aspersión, provisto de un hidrante que mediante una tubería o manguera lleva al tubo elevador y al aspersor, este conjunto se le llama ala de riego.

Figura 5-23. Esquema del diseño de un predio tipo



Fuente: Adaptado de Loaiza (2003)

Los métodos de riego utilizados en la actualidad se clasifican en métodos por aspersión (aspersión y micro-aspersión), métodos localizados (riego por goteo) y métodos superficiales por surcos o inundación (Villasante, 2009). De acuerdo con Arango (1998), en las zonas de ladera es posible utilizar los métodos de riego por aspersión, goteo y micro-aspersión. Se describen a continuación estos tres métodos de riego:

El riego por aspersión, consiste en aplicar el agua a la superficie del terreno imitando la lluvia. Este sistema se basa en la conversión de la energía de presión en energía de velocidad a la salida de la boquilla del aspersor (García, 1997). El agua es trasladada desde el hidrante por medio de tuberías hasta los aspersores.

Un buen sistema de riego por aspersión debe contar con buena presión en el agua, red de tuberías adecuadas a la presión y aspersores adecuados capaces de esparcir uniformemente el agua (Salinas, 2010).

En la Tabla 5-8 se mencionan las ventajas y desventajas del método de riego por aspersión relacionadas con la construcción, operación y características técnicas.

Tabla 5-8. Ventajas y desventajas del método de riego por aspersión.

Ventajas	Desventajas
– Control efectivo sobre la cantidad y tasa de aplicación de agua. – Requerimiento de mano de obra reducida y poco especializada. – Adaptación al terreno, no necesita nivelación del terreno. – Eficiencia de riego por aspersión de 80% superior al 50% del método por inundación tradicional. – No limita las operaciones de labranza. – Riesgos de erosión mínimos. – Útil para distintas clases de suelos	– Daños a hojas tiernas y flores por el impacto del agua. – Requiere una inversión inicial grande. – El viento puede afectar la uniformidad de la aplicación del riego. – Los plaguicidas pueden ser lavados del follaje de las plantas – Aumento de enfermedades y propagación de hongos, por humedecimiento total de plantas. – Requiere de continuo suministro de agua y uso intensivo de energía. – Problemas de salinidad

Fuente: Salinas (2010); García (1997).

El riego por goteo, consiste en la aplicación del agua directamente a la planta en la zona de influencia de las raíces mediante un sistema de tuberías y emisores (Salinas, 2010). Los emisores, también denominados “goteros”, son anexados a la línea lateral de la red y mediante la pérdida de presión por pequeños orificios, vórtices, pasos tortuosos, placas de impacto o una combinación logran la descarga de agua deseada (García, 1997).

Los sistemas de riego por goteo se caracterizan por la utilización de pequeños caudales a baja presión, localización del agua a proximidad de las plantas por los emisores y una alta frecuencia de aplicación. En estos sistemas se aprovecha para hacer fertilización conjuntamente con el riego (Salinas, 2010), práctica denominada como fertiriego, donde se mezclan los fertilizantes químicos, algunos pesticidas y el agua.

En la Tabla 5-9 se mencionan las ventajas y desventajas del método de riego por goteo relacionadas con la construcción, operación y características técnicas.

Tabla 5-9. Ventajas y desventajas del método de riego por goteo

Ventajas	Desventajas
– Permite utilizar caudales pequeños de agua – Ahorro considerable de agua – Se pueden utilizar aguas más salinas, comparado con los otros tipos de riego. – Fácil adaptación en terrenos rocosos o con fuertes pendientes. – Reducción considerable de vegetación no deseable. – Aporte controlado de nutrientes y agua de riego. – Permite el uso de aguas residuales, evitando dispersión de gotas con posibles patógenos al aire. – Reducción considerable de la incidencia de enfermedades fungosas y otras. – Minimiza la formación de costras en la superficie del suelo. – Mejora la penetración de las raíces al suelo. – Puede operar en suelos con muy baja tasa de infiltración	– Alto costo de inversión, comparado con los otros sistemas. – Alta especialización y habilidad para el diseño, instalación y mantenimiento. – Alto riesgo de obturación de emisores y efectos de uniformidad del riego. – Problemas con la distribución de la humedad, pues algunos cultivos no responden bien a una sola localización de la humedad. – Suelo seco y formación de polvo durante las operaciones mecánicas. – Limita operación de labranza por movilización de la manguera de riego.

Fuente: Salinas, (2010) y García (1997).

El riego por micro-aspersión, es un sistema intermedio entre el goteo y aspersión, que se caracteriza por la aplicación de mayores volúmenes de agua con mayor diámetro de humedecimiento comparado con el método por goteo y las gotas precipitadas son menor tamaño comparadas con el método de aspersión. Es frecuentemente utilizado en almácigos, viveros y trasplante de plantas por crear un microclima favorable para los cultivos (Salinas, 2010).

La selección del método de riego depende de varios factores, tales como el cultivo, suelo, topografía, clima, disponibilidad de mano de obra; así como las labores vinculadas al desarrollo físico, manejo del riego y administración del sistema (Díaz, 2006).

5.5.5. Operación y mantenimiento del sistema de riego

La magnitud de operación y mantenimiento (O&M) de un sistema de riego depende del tamaño y características del sistema de riego, número de usuarios, tipo de unidades agrícolas, experiencia y cultura de riego de los usuarios, demanda de agua de los cultivos y caudales disponibles en relación a la demanda (García, 2008).

La operación del sistema de riego debe hacerse de forma adecuada para asegurar el buen funcionamiento y prolongar su vida útil.

Antes de poner en marcha el sistema por primera vez o para restablecerlo después de un corte, es necesario hacer un llenado especial. Para realizar esta actividad debe informarse con anterioridad a los usuarios del sistema e indicarles de dejar conectados los aspersores. Para el llenado debe abrirse la compuerta de la cámara de derivación y llenar el desarenador; debe llenarse lentamente la tubería con una pequeña parte del caudal total que requiere el sistema y aumentar lentamente hasta completar todo el caudal. Durante esta acción debe vigilarse la salida de aire en las ventosas y comprobar la llegada de agua a cada una de las válvulas de purga y luego cerrarlas lentamente (Arango, 1998).

Otra actividad importante es el vaciado del sistema cuando se necesite suspender el servicio. Al igual que el llenado, debe informarse a los usuarios del sistema. El vaciado debe hacerse lentamente, cerrando la válvula principal. Conviene revisarse las válvulas ventosas antes y durante el vaciado (Arango, 1998).

El mantenimiento del sistema de riego puede ser normal o rutinario, preventivo, de emergencia, estructural esencial (estructuras), actualización de mantenimiento diferido y rehabilitación (García, 2008).

Para estas actividades es necesario que la organización cuente con recursos humanos y económicos.

De acuerdo con Arango (1998), las tareas más usuales de mantenimiento en un sistema de riego en ladera son:

- Conservación y rehabilitación de la microcuenca

- Revisión de todas la obras de la infraestructura de riego (captación, conducción, distribución e infraestructura predial).
- Revisión de los equipos de aplicación y la revisión del uso del riego a nivel predial.
- Control de malezas, junto a las estructuras de concreto y accesorios del sistema.
- Extracción de sedimentos en las bocatomas laterales, desarenadores y cámaras.
- Reparación y remplazo de tuberías y accesorios
- Reparación de concretos de canales, tanques y otros componentes del sistema de riego que lo requieran.

5.5.6. Manejo del sistema de riego

El manejo del sistema de riego de acuerdo con García (2008) y Urrutia (2009) requiere una autoridad de regantes y debe considerar aspectos como la estructura organizativa, normatividad (estatutos y reglamentos, manual de O&M, actas de acuerdos, libros de caja), reconocimiento oficial, tarifas y métodos de recaudación, control de fondos, mecanismos de control y sanciones, instancias de solución de conflictos, personal técnico, equipamiento e inventario de la infraestructura de riego.

El manejo del sistema de riego es un proceso por el cual los servicios de riego y drenaje se suministran usando los recursos asignados de manera sostenible y de costo efectivo, todo ello mediante una planeación, organización, liderazgo y control (Urrutia, 2009). Se deben ordenar de forma eficaz las actividades e insumos, para ello es necesario contar con un sistema de derechos de uso de las aguas, sistema de administración y una infraestructura en buenas condiciones para operar de esta forma se garantizara la sostenibilidad del proyecto (García, 2008).

De acuerdo con Urrutia (2009), el manejo del sistema de riego involucra actividades tales como:

- Adquisición, asignación y distribución del agua.
- Planeación y diseño, construcción, operación y mantenimiento de la infraestructura.
- Toma de decisiones, movilización de recursos, comunicación y resolución de conflictos a través de la estructura organizativa establecida.

En la distribución del recurso hídrico debe considerarse el método de distribución, en este sentido puede utilizarse una distribución continua o una distribución rotacional. La selección del método de distribución está en función de criterios socioeconómicos, culturales y técnicos.

En la distribución continua el suministro de agua a nivel predial es continuo durante el periodo de riego; los sectores y fincas son irrigados simultáneamente. Mientras que la distribución rotacional el suministro de agua a nivel predial es entregado por rotación a diferentes sectores del área del proyecto durante el período del ciclo de riego.

5.6. Normatividad internacional y nacional del reuso de agua residual

Para el reuso de aguas residuales deben considerarse las guías y regulaciones nacionales e internacionales; en este sentido la Organización Mundial de Salud publicó en el 2006 las guías de uso de aguas residuales, excretas y aguas grises, definiendo metas basadas en la protección de la salud considerando tres grados de exposición tales como Irrigación no restringida, irrigación restringida y riego por goteo (WHO, 2006), como se observa en la Tabla 5-10.

La guía recomienda valores para huevos de helmintos menores a 1 por litro en riego con o sin restricción, para los cultivos de tallo alto con riego por goteo no recomienda valores (Tabla 5-10). Además incluyen las medidas de control para la salud con un enfoque multibarrera desde el tratamiento, riego, manejo agronómico, cosecha y pos cosecha.

Tabla 5-10. Metas basadas en protección de salud para reuso de agua residual en la agricultura

EXPOSICIÓN	AVAD per cápita por año	Reducción de und. Log de patógenos	No. de Huevos de Helminto por litro
Irrigación no restringida			
Lechuga	$<10^{-6}$	6	<1
Cebolla		7	<1
Irrigación restringida			
Altamente mecanizada	$<10^{-6}$	3	<1
Mano de obra intensiva		4	<1
Riego por goteo			Sin recomendación
Cultivos de tallo alto	$<10^{-6}$	2	Menor o igual a 1
Cultivos de tallo bajo		4	

Fuente: WHO (2006).

La FAO formuló la directriz de calidad físico-química del agua para riego (Tabla 5-11) en donde clasifica el grado de restricción en tres niveles diferentes, según parámetros físico-químicos como la conductividad, el RAS y la toxicidad de algunos iones, el grado de restricción de uso del agua para riego (Silva *et al.*, 2008).

Tabla 5-11. Parámetros físico-químicos de la calidad del agua para riego

Problema potencial		Unidades	Grado de Restricción		
			Ninguno	Moderado	Severo
Salinidad (afecta la disponibilidad de agua para el cultivo)					
Conductividad eléctrica		dS/m	< 0,7	0,7 - 3,0	> 3,0
Sólidos suspendidos totales		mg/l	< 450	450 - 2000	> 2000
Infiltración (evaluar usando a la vez CE y RAS)					
Relación de adsorción/sodio (Polprasert)	0-3	dS/m	> 0,7	0,7 - 0,2	< 0,2
	3-6	dS/m	> 1,2	1,2 - 0,3	< 0,3
	6-12	dS/m	> 1,9	1,9 - 0,5	< 0,5
	12-20	dS/m	> 2,9	2,9 - 1,3	< 1,3
	20-40	dS/m	> 5,0	5,0 - 2,9	< 2,9
Toxicidad de iones específicos (afecta cultivos sensibles)					
Sodio (Na)					
Riego por superficie		RAS	< 3,0	3,0 - 9,0	> 9,0
Riego por aspersión		meq/l	< 3,0	> 3,0	
Cloro (Cl)					
Riego por superficie		meq/l	< 4,0	4,0 - 10,0	> 10,0
Riego por aspersión		meq/l	< 3,0	> 3,0	
Boro (B)		mg/l	< 0,7	0,7 - 3,0	> 3,0
Varios (afectan cultivos sensibles)					
Nitrógeno		mg/l	< 5,0	5,0 - 30,0	> 30,0
Bicarbonato					
Aspersión foliar únicamente		mg/l	< 1,5	1,5 - 8,5	> 8,5
pH			Rango normal 6,5 - 8,4		

Fuente: Ayers & Westcot 1987, citado por Silva *et al*, (2008)

En Guatemala el Acuerdo Gubernativo No. 236-2006 del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (2006) reglamenta el reuso de aguas residuales, autorizando cinco tipos (Artículo 34):

- Tipo I para riego agrícola en general, para cultivos que previamente a su consumo requieren proceso industrial.
- Tipo II para cultivos comestibles con restricciones en el riego en productos que se consumen crudos o pre cocido como hortalizas y frutas.
- Tipo III uso del efluente para la piscicultura y camaronicultura.
- Tipo IV para pastos y otros cultivos con restricciones en cultivos no alimenticios para el ser humano (pastos, forrajes, fibras, semillas, otros).
- Tipo V reuso recreativo con restricciones en el aprovechamiento para fines recreativos en estanques artificiales, donde el ser humano sólo puede tener contacto incidental, incluido el riego en áreas verdes, donde el público tenga o no contacto.

Los parámetros y límites máximos permisibles para reuso se muestran en la Tabla 5-12 y Tabla 5-13. Los valores en coliformes fecales están basados en las directrices de la

OMS (1989). Para el reuso en cultivos comestibles (Tipo II), el límite permitido de coliformes fecales es estricto con valores inferiores a 200 coliformes fecales por 100 ml.

Tabla 5-12. Parámetros y límites máximos permisibles por tipo de reuso

Tipo de reuso	Demanda bioquímica de oxígeno, (mg/l)	Coliformes fecales, número más probable/ 100 ml
Tipo I	No aplica	No aplica
Tipo II	No aplica	< 2x10 ²
Tipo III	200	No aplica
Tipo IV	No aplica	< 1x10 ³
Tipo V	200	< 1x10 ³

Fuente: Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, (2006).

Tabla 5-13. Parámetros y límites máximos permisibles del agua residual para reuso

Parámetros	Dimensionales	Límites máximos permisibles
Temperatura	Grados Celsius	+/- 7
Grasas y aceites	Miligramos por litro	10
Materia flotante	Ausencia/presencia	Ausente
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	100
Nitrógeno total	Miligramos por litro	20
Fósforo total	Miligramos por litro	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	< 1x10 ⁴
Arsénico	Miligramos por litro	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	1
Cobre	Miligramos por litro	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.01
Níquel	Miligramos por litro	2
Plomo	Miligramos por litro	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10
Color	Unidades platino cobalto	500

Fuente: Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (2006).

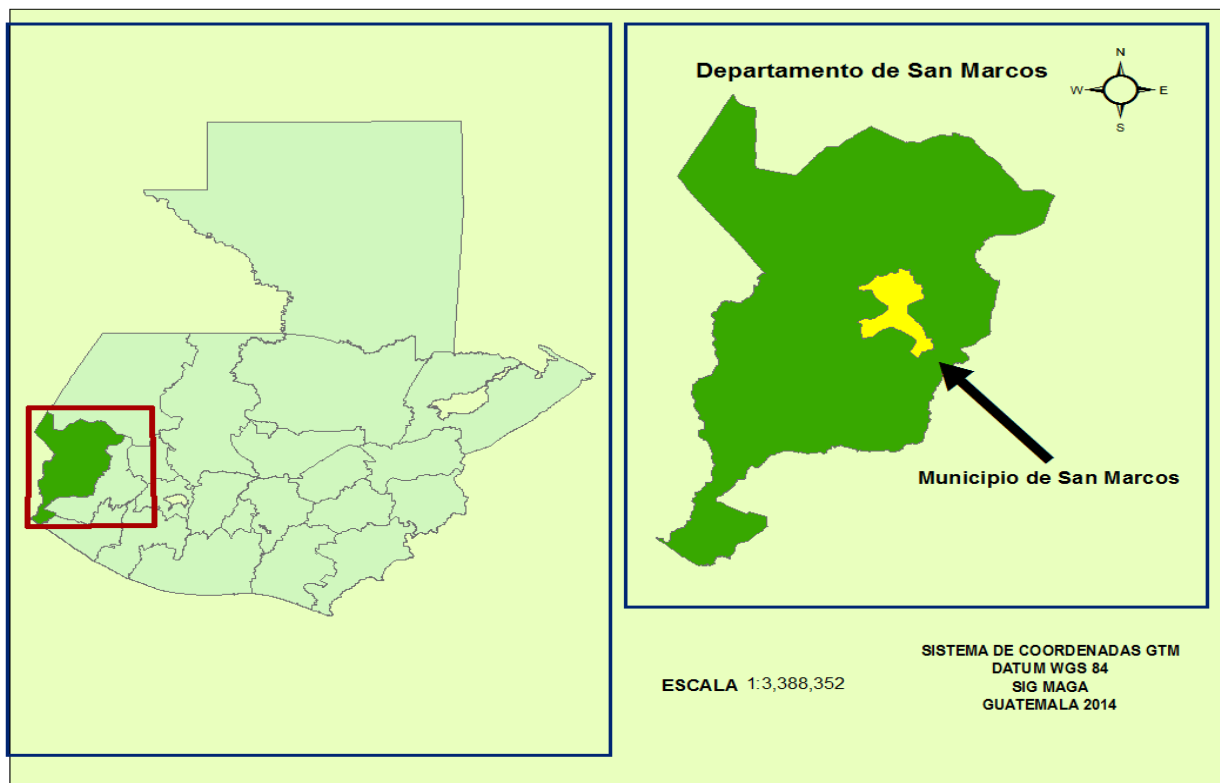
La normativa guatemalteca propone valores establecidos con base al consumo y no al riesgos asociados con el manejo del agua residual, como propone la OMS (2006). Además no estima parámetros de la calidad microbiológica en cuanto a huevos de helmintos.

6. METODOLOGÍA

El estudio se realizó considerando la zona periurbana donde se ubican los efluentes de la red de alcantarillado provenientes del área urbana de municipio de San Marcos.

El municipio de San Marcos está ubicado en el área de la Sierra Madre, en el altiplano de Guatemala, región VI Sur Occidental (Figura 6-1) con una altitud de 2,398 metros sobre el nivel del mar.

Figura 6-1. Ubicación del municipio de San Marcos, Guatemala



Fuente: Elaboración propia con base en el Sistema de Información Geográfica de Guatemala (MAGA, 2004)

Para el manejo del estudio se contemplaron 7 fases, cada una de ellas se desarrolló de forma secuencial. La fase I contempla el cumplimiento del objetivo 1; las fases II y III el objetivo 2; las fases IV y VI el objetivo 3; integrando la información de toda las fases en la propuesta integral.

6.1. Fase I: Criterios de selección de métodos naturales para el tratamiento complementario de agua residual doméstica para el reuso agrícola en zonas de ladera en San Marcos

Para establecer los factores y criterios para el caso de San Marcos se consideraron los propuestos por Bernal et al, (2003) y del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (2002), agrupándolos en factores sociales, tecnológicos, ambientales, económicos, institucionales y legales.

A partir de los factores y criterios definidos, se realizó un análisis de importancia por grupo de actores como se muestra en la Tabla 6-1, utilizando el método SCORING (Anderson, Sweeney y Williams, 1998) para determinar los criterios apropiados considerando el contexto del municipio de San Marcos, Guatemala.

Tabla 6-1. Factores y criterios considerados en el proceso de selección de métodos naturales para el tratamiento complementario del agua residual tratada en el municipio de San Marcos, Guatemala

Guatemala									
FACTORES	CRITERIOS	Ponderación de criterios (Wi)	Ponderación por actores						Valor rij
			Autoridades Municipales		Técnicos		Usuarios del servicio		
			Valor	ri1	Valor	ri2	Valor	ri3	
Sociales	Formación ambiental								
	Producción de olores								
	Ubicación de la planta								
	Participación en la toma de decisiones								
	Degradación paisajística								
	Devaluación de los inmuebles								
	Capacidad y voluntad de pago								
	Potencial de generación de vectores								
	Valor sub-total								
Tecnológicos	Eficiencia de la tecnología								
	Características del agua residual.								
	Expectativas de calidad del efluente y estándares de reuso en la agricultura								
	Topografía								
	Condiciones climáticas (temperatura y precipitación)								
	Impacto ambiental del sistema de tratamiento								
	Valor sub-total								
Ambientales	Vigilancia de la calidad del agua residual								
	Evaluación de riesgos a fenómenos hidroclicmáticos								
	Valor sub-total								
Económicos	Costos de terreno								
	Costos de inversión								
	Costos de mano de obra								
	Costos de operación y mantenimiento								
	Valor sub-total								
Institucional y legal	Parámetros de calidad para la disposición y uso de aguas residuales domésticas								
	Normas técnicas para el tratamiento de aguas residuales domésticas								
	Derechos de uso de aguas residuales tratadas								
	Valor sub-total								
Valor Si									

Fuente: Adaptado de (Bernal et al., 2003) y (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2002).

Para cada factor se definió un listado de criterios, asignando una ponderación para cada uno, empleando una escala de 5 puntos (Tabla 6-2) en función del nivel de importancia en el contexto del área de estudio.

Tabla 6-2. Ponderación de criterios según el nivel de importancia

Escala	Característica
1	Muy poco importante
2	Poco importante
3	Importancia media
4	Algo importante
5	Muy importante

Fuente: Anderson, Sweeney y Williams (1998).

Para dicho análisis, se consideran tres actores principales los cuales son:

- Autoridad municipal: Representado a través del Concejal responsable de Ambiente y Recursos Naturales del municipio de San Marcos.
- Técnicos (as): Compuesto por técnicos de organizaciones gubernamentales y privadas que realizan diseño y planificación de plantas de tratamiento de aguas residuales.
- Usuarios del servicio: Representado por siete (7) integrantes del Comité emergente del proyecto, beneficiarios con la construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR).

Posteriormente se realizó un rating del nivel de percepción (Tabla 6-3) para cada actor empleando una escala de 9 puntos.

Tabla 6-3 Ponderación del nivel de percepción de importancia de los criterios según el actor

Escala	Característica
1	Extra bajo
2	Muy bajo
3	Bajo
4	Poco bajo
5	Medio
6	Poco alto
7	Alto
8	Muy alto
9	Extra alto

Fuente: Anderson, Sweeney y Williams (1998).

A partir de los valores generados se calculó el *Score* para cada actor y criterio. Considerando el modelo presentado en la Ecuación 6-1.

$$\text{Ecuación 6-1 } S_j = \sum_i w_i r_{ij}$$

Dónde: r_{ij} =rating del actor j en función del criterio i

w_i = ponderación para cada criterio i.

S_j = Score para el actor j

Finalmente se ordenaron los criterios en función del *Score* obtenido por los tres actores para estimar los criterios que a juicio de los actores son de mayor relevancia para la selección de métodos naturales para el tratamiento complementario de agua residual doméstica para el reuso agrícola en zonas de ladera en San Marcos.

6.2. Fase II: Selección de la alternativa más apropiada para el tratamiento complementario de agua residual doméstica tratada para el caso del municipio de San Marcos

Para la selección de la alternativa de tratamiento complementario se consideró el modelo conceptual SELTAR (CINARA et al., 2005). Este modelo está conformado por 9 bloques temáticos a través de los cuales se realiza la selección de tecnologías sostenibles para el tratamiento de aguas residuales (104 esquemas de tratamiento) y el manejo y disposición de lodos (9 alternativas tecnológicas).

Se consideraron las variables e información del bloque 1 (Priorización y factibilidad del proyecto), el nivel de tratamiento deseado en el bloque 2 (Objetivos ambientales) y la selección del esquema tecnológico sostenible por los aspectos considerados en los bloques 3 y 4 (Aspectos culturales y tecnológicos).

En la selección del esquema tecnológico en el bloque 4 (aspectos tecnológicos) con nivel de tratamiento terciario con remoción de patógenos, solamente permitió seleccionar tecnología considerando el caudal del agua residual, temperatura, área disponible y nivel de manto freático; pues las tecnologías seleccionadas hasta estos criterios, tenían como restricción la pendiente del sitio de la planta, la cual debía ser menor o igual al 5%, valor inferior al del sitio de la planta (12%), razón por la cual no continuó utilizando el modelo SELTAR para la selección del esquema tecnológico sostenible para el caso de estudio.

Ante esta situación, se realizó un análisis de información documental para proponer tecnología para el tratamiento complementario considerando en todo momento los

aspectos indicados en los bloques 5 y 6 (aspectos ambientales, reuso y aprovechamiento de subproductos).

Se realizaron las siguientes actividades:

- Caracterización de la zona periurbana donde se propone el reuso del agua residual tratada, través de información secundaria y primaria, para establecer las particularidades biofísicas (topografía, áreas y tipos de cultivos). A partir de esta caracterización se determinó la actividad con potencial de reuso del agua residual y se estimaron áreas potenciales.
- Se realizaron encuestas a una muestra aleatoria simple de 80 jefes de hogar con un nivel de confianza del 95%, para conocer sobre la percepción sobre el reuso y los beneficios. La información recopilada se tabuló y se realizó un análisis estadístico descriptivo, presentando los resultados de manera gráfica.
- Se realizó un taller de trabajo con los productores de la zona de estudio y mediante una encuesta rápida donde se planearon interrogantes relacionadas a la “*aceptación de reuso por los productores*”.

6.3. Fase III: Selección del método de riego más apropiado de acuerdo las condiciones de San Marcos

Para realizar la selección del método de riego más apropiado se consideraron los propuestos por Pereira y Trout (1999). Se agruparon en factores técnicos y socioeconómicos.

A partir de los factores técnicos identificados (Tabla 6-4) se definieron los atributos de acuerdo al método de riego. Posteriormente se realizó el análisis para el caso de estudio, considerando el nivel de importancia del atributo para cada factor, la condición y una breve descripción de la situación.

Tabla 6-4. Factores técnicos que condicionan la elección del método de riego en la zona de estudio

No	Factores	Condición de acuerdo al método de riego		Situación para el caso de estudio		
		Aspersión	Riego Localizado	Nivel de importancia	Condición	Descripción
1	Disponibilidad del agua	Regular	Continuo			
2	Calidad del agua	Sin sólidos	Elevada			
3	Capacidad de infiltración del suelo	Media a baja	Cualquiera			
4	Topografía	Relieve suave	Irregular			

Fuente: Pereira y Trout (1999).

Una vez realizado el análisis se seleccionaron los factores con mayor nivel de importancia a juicio de los actores técnicos, mediante un taller participativo.

Para el caso de los factores socioeconómicos (Tabla 6-5), se realizó un análisis de importancia por grupo de actores, utilizando el método SCORING (Anderson, Sweeney y Williams, 1998) siguiendo los mismos pasos metodológicos descritos en el punto 5.1.

Tabla 6-5. Factores socioeconómicos que condicionan la elección del método de riego en la zona de estudio

de estudio					Ponderación por actores				
No	Factores	Condición de acuerdo al método de riego		Ponderación de criterios (Wi)	Técnicos		Usuarios del servicio		Valor rij
		Aspersión	Riego Localizado		Valor	ri2	Valor	ri3	
1	Precio del agua	Medio	Alto						
2	Valor de producción	Medio	Alto						
3	Costo de la mano de obra	Medio	Alto						
4	Coste de la energía/bombeo	Bajo	Moderado						
5	Disponibilidad de capital	Medio-alto	Alto						
6	Exigencia en tecnología	Medio-alto	Muy Alto						
Valor Sj									

Fuente: Anderson, Sweeney y Williams (1998) y Pereira y Trout (1999).

Posteriormente, al igual que los factores técnicos, se consideraron los de mayor nivel de importancia a juicio de los actores.

Finalmente, considerando el nivel de asociación o interdependencia de factores (Tabla 6-6) técnicos y socioeconómicos; y utilizando una escala nominal (Independencia y asociación perfecta) se seleccionó el método de riego apropiado para la zona de estudio.

Tabla 6-6 Nivel de asociación e interdependencia de factores

Factores	Disponibilidad de capital	Exigencia en tecnología	Calidad del agua	Topografía
Disponibilidad de capital				
Exigencia en tecnología				
Calidad del agua				
Topografía				

Fuente: Elaboración propia, 2013.

6.4. Fase IV: Propuesta de infraestructura hidráulica del sistema de riego para el caso de San Marcos

Una vez seleccionado el método de riego para el caso de San Marcos se procedió a realizar cálculos para realizar la propuesta de infraestructura hidráulica se describe a continuación metodología utilizada.

6.4.1. Determinación demanda hídrica

Para la determinación de la demanda hídrica del proyecto se consideraron las fuentes de información indicadas en la Tabla 6-7, se describe a continuación la secuencia metodológica.

Tabla 6-7. Fuentes de información

INFORMACIÓN	FUENTE DE INFORMACIÓN	OBSERVACIONES
Precipitación	INSIVUMEH	Estación San Marcos Altitud: 2420 Latitud: 14,94°N Longitud: 91,79°E
Temperaturas, Brillo solar, velocidad del viento, Humedad relativa	INSIVUMEH	Estación San Marcos Altitud: 2420 Latitud: 14,94°N Longitud: 91,79°E
Plan de cultivos	Investigación de campo	
Coeficientes de cultivo (Kc)	FAO, 2006	

Fuente: Elaboración propia, 2013.

6.4.1.1. Análisis de la precipitación

Para el análisis de precipitación se utilizó la serie mensual multianual de la estación San Marcos (periodo 1980 a 2009). Se estimaron los datos faltantes mediante el método racional (Guevara, 2003 y Carvajal, 2011), el cual permite estimar los registros mensuales faltantes, apoyándose en la información que brindan los años completos. El método acepta la hipótesis que considera que los meses desconocidos tendrán un porcentaje igual al porcentaje promedio (Si).

Se designan las siguientes variables:

- i : Cada uno de los meses desconocidos
- Pi : Precipitación mensual desconocida en cada año incompleto, en mm.
- $\sum Si$: Suma de los porcentajes promedio de los meses cuya precipitación se desconoce, en %.
- $\sum P$: Suma de las precipitaciones mensuales conocidas en los años incompletos, en mm.
- Si : Porcentaje promedio asignado a cada uno de los meses desconocidos o faltantes.

De acuerdo a las variables anteriores se pueden establecer las siguientes ecuaciones:

$$\text{Ecuación 6-2} \quad \frac{Pi}{Si} = \frac{\sum P}{1200 - \sum Si}$$

$$\text{Ecuación 6-3} \quad Pi = \left[\frac{\sum P}{1200 - \sum Si} \right] Si$$

La expresión entre paréntesis es una cantidad constante para cada año incompleto, por lo que finalmente se tiene: **$Pi = K \times Si$** .

Una vez completa la serie de precipitación, se realizó un análisis de probabilidad tipo Weibull, descrito en la Ecuación 6-4, siendo **m** el número de orden, **n** el número de datos (años) y **P** la probabilidad de excelencia.

$$Px_i = \frac{m}{n+1}$$

Ecuación 6-4

Se seleccionó la serie de probabilidad de excedencia más cercana al 75% y se calculó la precipitación efectiva de acuerdo al método propuesto por la USDA (Ven Te Chow, 2000), utilizando la siguiente ecuación:

$$Pe = P \times \frac{[125 - (0.2 \times P)]}{125}$$

Ecuación 6-5

Donde **Pe** es la precipitación efectiva y **P** es la precipitación incidente.

6.4.1.2. Cálculo de la evapotranspiración de referencia

La evapotranspiración de referencia se calculó mediante el método de Penman Monteith, para lo cual se utilizó el software CROPWAT FOR WINDOWS 8.0, desarrollado por la FAO. La información climática utilizada fueron los datos promedios mensuales multianuales de Temperatura máxima, Temperatura mínima, Velocidad del viento, Humedad relativa y Brillo solar de la estación San Marcos (periodo 1980 a 2009).

6.4.1.3. Cálculo de requerimientos hídricos de los cultivos

Para el cálculo del requerimiento hídrico se definió el plan de cultivos en la zona periurbana del municipio de San Marcos, posteriormente se definieron los valores de coeficiente de cultivo para cada cultivo en cada una de sus etapas de desarrollo y finalmente se aplicó la expresión:

$$ETc = ETo \times Kc$$

Ecuación 6-6

6.4.1.4. Necesidades de riego netas

La necesidad neta de riego (NRn) se calculó como la diferencia entre el requerimiento hídrico del cultivo (ETc) y la precipitación efectiva correspondiente a un 74.19% de probabilidad de excedencia (Pe), de acuerdo a la siguiente expresión.

$$NRn = ETc - Pe$$

Ecuación 6-7

6.4.1.5. Eficiencia del proyecto

Se estimó las eficiencias del proyecto siendo el producto de la eficiencia de conducción (E_c), Distribución (E_d) y Aplicación (E_a) con base a información secundaria de referencia. Para el presente estudio, se considera la eficiencia de aplicación por el método de aspersión.

6.4.1.6. Necesidades de riego totales

Las necesidades de riego totales (NR_t) se calcularon para cada cultivo teniendo en cuenta la eficiencia del proyecto. La expresión utilizada fue la siguiente:

$$\text{Ecuación 6-8} \quad NR_t = \frac{NR_n}{E_p} = \frac{NR_n}{E_c \cdot E_d \cdot E_a}$$

6.4.1.7. Determinación de caudales

Una vez determinadas las necesidades de riego se calculó el caudal en flujo continuo para cada cultivo a partir de la siguiente expresión:

$$\text{Ecuación 6-9} \quad Q_{fc} = \frac{10000}{(86400)} NR_t \times A$$

Donde, Q_{fc} es el de caudal en flujo continuo en lt/seg-ha, NR_t es la necesidad total de riego en mm/día y A es el área en ha.

A partir de la estimación del caudal en flujo continuo se determinó el caudal de distribución mediante la utilización de la Ecuación 6-10.

$$\text{Ecuación 6-10} \quad Q_d = \frac{Q_{fc} \times 24}{JR}$$

Donde, Q_d es el caudal de distribución, JR la jornada de riego y Q_{fc} es el de caudal en flujo continuo.

Una vez calculado el caudal demandado en flujo continuo (Q_{fc}), definido la jornada de riego (JR) y calculado el caudal de distribución (Q_d) se procedió a realizar la comparación temporal con el caudal de oferta (Q_{oferta}) para concluir sobre la viabilidad del proyecto en este aspecto.

6.4.2. Diseño predial tipo

Para el diseño predial tipo, primero se realizó el diseño agronómico y posteriormente el diseño hidráulico predial. Se describe a continuación la secuencia metodología utilizada.

6.4.2.1. Diseño agronómico

A continuación se presenta la secuencia y ecuaciones del cálculo para el diseño agronómico.

– **Lámina de agua rápidamente aprovechable**

$$\text{Ecuación 6-11} \quad LARA = \frac{(CC - PMP) \times Da \times Z \times f}{100\%}$$

Donde, **LARA** es Lámina de agua rápidamente aprovechable (mm/día), **CC**: Capacidad de Campo (%), **PMP**: Punto de Marchites Permanente (%), **Da**: Densidad aparente del suelo (gr/cm³), **Z**: Profundidad efectiva radicular del cultivo (mm) y **f** es el Factor de agotamiento (adimensional).

– **Frecuencia de riego**

$$\text{Ecuación 6-12} \quad FR = \frac{LARA}{ET_c}$$

Donde, **FR**: Frecuencia de riego (días), **LARA**: Lámina de agua rápidamente aprovechable (mm/día) y **ET_c**: Evapotranspiración del cultivo (mm/día).

– **Lámina de agua rápidamente aprovechable ajustada**

Con la frecuencia de riego ajustada (FR') y se recalcula la LARA y se denomina LARA corregida (LARA'):

$$\text{Ecuación 6-13} \quad LARA' = FR' \times ET_0$$

Donde, **LARA_{ajus}**: LARA ajustada (mm), **FR'**: Frecuencia de riego redondeada (días) y **ET_c**: Evapotranspiración del cultivo (mm/día).

– **Lámina bruta de riego**

$$\text{Ecuación 6-14} \quad LB = \frac{LARA'}{E_a}$$

Donde, **LB**: lámina bruta de riego (mm), **LARA_{ajus}**: LARA ajustada y **E_a**: Eficiencia de aplicación (%).

– **Área de influencia del aspersor**

Definiendo la separación entre laterales de riego como DEL y la separación entre aspersores en la lateral como DEA, el área de influencia de un aspersor se calcula con la siguiente expresión:

$$\text{Ecuación 6-15} \quad A_{asp} = DEA \times DEL$$

Donde, **A_{asp}**: área de influencia de un aspersor (m²), **DEL**: Distancia entre laterales (m) y **DEA**: Distancia entre aspersores en la línea lateral (m)

– **Intensidad del aspersor**

La intensidad de lluvia del aspersor se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 6-16} \quad I_{asp} = \frac{Q_{asp}}{A_{asp}} \times 1000$$

Donde, **I_{asp}**: Intensidad de lluvia del aspersor (mm/h), **Q_{asp}**: Caudal del aspersor (m³/h) y **A_{asp}**: área de influencia de un aspersor (m²)

– **Tiempo de riego por posición**

$$\text{Ecuación 6-17} \quad T_{pp} = \frac{LB}{I_{asp}}$$

Donde, **T_{pp}**: Tiempo de riego por posición (horas), **LB**: Lámina bruta (mm) y **I_a**: Intensidad de la lluvia del aspersor (mm/h).

– **Turnos de riego por día**

$$\text{Ecuación 6-18} \quad T_d = \frac{T_{pp}}{JR}$$

Donde, **T_d**: Número de turnos de riego por día, **JR**: Jornada de riego (horas) y **T_{pp}**: Tiempo de riego por posición (horas).

– **Número total de turnos**

$$\text{Ecuación 6-19} \quad N_{tt} = PR \times T_d$$

Donde, **Ntt**: Número total de turnos, **Td**: Número de turnos por día y **PR**: Periodo de riego (días).

– **Área regada en un turno**

Ecuación 6-20

$$At = \frac{Ap}{Ntt} \times 10000$$

Donde, **At**: Área del turno de riego (m²), **Ap**: Área del predio (m²) y **Ntt**: Número total de posiciones en el predio.

– **Número de aspersores simultáneos**

Ecuación 6-21

$$N_{asp} = \frac{At}{A_{asp}}$$

Donde, **Nasp**: Número de aspersores simultáneos, **At**: Área del turno de riego (m²) y **Aasp**: área de influencia de un aspersor (m²)

– **Caudal del turno**

Ecuación 6-22

$$Qt = Q_{asp} \times N_{asp}$$

Donde, **Qt**: Caudal requerido para el turno de riego (l/s), **Qasp**: Caudal del aspersor (l/s) y **Nasp**: Número de aspersores ajustado funcionando de manera simultánea.

6.4.2.2. Diseño hidráulico predial

A continuación se presenta la secuencia y ecuaciones de cálculo para el diseño hidráulico predial.

– **Cálculo del diámetro mínimo en la tubería lateral**

Se aplicó el criterio de pérdida de presión admisible de la ecuación de Hazen Williams.

Ecuación 6-23

$$D \geq \left[\frac{10.665 Q^{1.852} L}{C^{1.852} (0.2 H_{asp})} \right]^{1/4.869}$$

Donde, **D**: Diámetro interior de tubería lateral (m), **Q**: Caudal de tubería lateral (m³/s), **L**: Longitud tubería lateral (m), **C**: Coeficiente de rugosidad de Hazen Williams y **Hasp**: Presión requerida por el aspersor (m.c.a.).

– ***Cálculo de pérdidas por fricción en la tubería lateral***

Una vez calculado el diámetro mínimo se procedió a seleccionar un diámetro comercial que cumpliera este criterio. Las pérdidas por fricción se calcularon aplicando la ecuación de Hazen Williams.

$$\text{Ecuación 6-24} \quad Hf_{lat} = \left[\frac{10.665 Q^{1.852} L}{C^{1.852} D^{4.869}} \right]$$

Donde, **Hf lat**: Pérdidas por fricción en la tubería lateral (m.c.a.), **D**: Diámetro interior de tubería secundaria o principal (m), **Q**: Caudal de tubería secundaria o principal (m³/s), **L**: Longitud tubería secundaria o lateral (m), **C**: Coeficiente de rugosidad de Hazen Williams.

– ***Cálculo de diámetro mínimo en tuberías secundaria y principal***

Para el cálculo de diámetro mínimo en tuberías secundarias y principal se utilizó la Ecuación 6-23

– ***Cálculo de pérdidas por fricción en tuberías secundaria y principal***

Una vez calculado el diámetro mínimo se procedió a seleccionar un diámetro comercial que cumpliera este criterio. Las pérdidas por fricción se calcularon aplicando la ecuación de Hazen Williams (Ecuación 6-24).

– ***Cálculo de presión requerida***

Para calcular la presión requerida en la entrada del predio se realizó un balance desde el punto final de la lateral crítica hasta la entrada del predio. A continuación se presenta la expresión utilizada.

$$\text{Ecuación 6-25} \quad CDT = (H_{asp} + H_{elev} + Hf_{lat} + Hf_{sec} + Hf_{ppal}) \times 1.05$$

Donde, **Hasp**: Presión requerida por el aspersor (m.c.a.), **Helev**: Altura del elevador (m), **Hf lat**: Pérdidas por fricción en la tubería lateral (m.c.a.), **Hf sec**: Pérdidas por fricción en la tubería secundaria (m.c.a.), **Hf ppal**: Pérdidas por fricción en la tubería principal (m.c.a.).

6.4.3. Diseño hidráulico de la red de conducción y distribución

El cálculo de la red de conducción y distribución se realizó mediante la ayuda del software EPANET. Para realizar la simulación, los criterios de diseño tenidos en cuenta fueron los siguientes:

- Presiones manométricas positivas (>0) en todos los nodos.
- Velocidad de flujo en las tuberías entre 0.5 y 2 m/s.
- Presión en nodos con demanda mayor a 15 m.c.a. (el requerimiento de presión es de 25.7 m.c.a, pero la pendiente promedio de los predios es de 16% lo que en una longitud de 67 m significa un desnivel a favor de 10.6 m)
- Método de distribución: Continua (todos los predios reciben el caudal de distribución de manera simultánea).
- RDE de tuberías: De acuerdo a la presión estática y a la siguiente Tabla:
- Modelo de cálculo de pérdidas: El modelo utilizado para el cálculo de pérdidas por fricción fue Hazen-Williams (Ecuación 6-24).
- Coeficiente de rugosidad: 145 (PVC).
- Cota del nivel del agua en la fuente: 2339 m.s.n.m. (levantamiento topográfico).
- Diámetro de tuberías: a variar de acuerdo a criterios de diseño.

6.4.4. Estimación de costos de la infraestructura de riego

A partir del diseño hidráulico de la red de conducción, distribución y riego predial se estimaron los materiales a utilizar y costos de la infraestructura.

6.5. Fase V: Dimensionamiento del Humedal de Flujo Subsuperficial como unidad de tratamiento complementario del agua residual

A partir de la selección de la tecnología del tratamiento complementario indicado metodológicamente en el numeral 6.2, la calidad fisicoquímica y microbiológica del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales propuesta por MANCUERNA (2008), se realizó el dimensionamiento del **Humedal de flujo subsuperficial** como unidad de tratamiento complementario utilizando la siguiente secuencia metodológica.

6.5.1. Consideración y selección del tipo de planta

Se realizó la selección en función de vegetación utilizada con anterioridad en humedales de flujos subsuperficial y su adaptación a las condiciones climáticas de San Marcos.

6.5.2. Determinación de la Constante de Velocidad de Reacción (K_1)

Para la determinación de la constante de velocidad de reacción se consideró la Ecuación 6-26, que propone Mara (2003).

$$\text{Ecuación 6-26} \quad k_1 = 68.6e^{4.172(1.06)^{T-20}}$$

Donde, k_1 es la constante de velocidad de reacción, ε : porosidad del medio y T : temperatura del agua residual.

6.5.3. Área del Humedal

Se determinó mediante la utilización de la siguiente ecuación.

$$A_{CW} = \left[\frac{\left[-2Q_i \ln\left(\frac{Le}{Li}\right) \right]}{2k_1 \varepsilon D_{CW} - \left(0.001e \ln\left(\frac{Le}{Li}\right) \right)} \right]$$

Ecuación 6-27.

Donde, A_{CW} es el área del humedal, Q_i es el caudal de entrada, Le : concentración de salida, Li : concentración de entrada, k_1 : Constante de velocidad de reacción, ε : porosidad del medio, D_{CW} : profundidad las raíces, e : evapotranspiración.

6.5.4. Tiempo de Retención Hidráulica (θ)

El tiempo de retención hidráulica se determinó a partir de la Ecuación 6-28.

Ecuación 6-28

$$\theta = \frac{\varepsilon A_{CW} D_{CW}}{Q}$$

Donde, A_{CW} es el área del humedal, Q es el caudal de entrada, ε : porosidad del medio, D_{CW} : profundidad las raíces.

6.5.5. Dimensiones del Humedal

El ancho del humedal se calculó a partir de la Ecuación 6-29 y el largo mediante la Ecuación 6-30.

Ecuación 6-29

$$w = \left(\frac{A_{CW}}{R_A} \right)^{1/2}$$

Donde, w es igual al ancho (m), A_{CW} es el área del humedal (m^2) y R_A es la proporción, como longitud/ancho. Para el caso se utilizará una relación largo/ancho de 4:1 (OPS/OMS, 1999)

Ecuación 6-30

$$l = \frac{A_{CW}}{w}$$

Donde, **w** es igual al ancho (m), **A_{cw}** es el área del humedal (m²).

A partir de la determinación de largo y ancho se recalculo la dimensiones del humedal considerando 16 celdas utilizando la Ecuación 6-27. La cantidad de celdas se realizó tomando en cuenta la adecuación del terreno y la pendiente.

6.5.6. Remoción de Sólidos Suspendedos (SS)

Utilizando la Ecuación 6-31 propuesto por Mara (2003) se calculó la remoción de solidos suspendidos del efluente del humedal.

$$\text{Ecuación 6-31} \quad (SS)_e = (SS)_i [0.106 + 0.11(AHLR)]$$

Donde, **SS_e** es sólidos suspendidos del efluente, **SS_i** sólidos suspendidos del afluente y **AHLR** el área tasa de carga hidráulica por área.

El cálculo de AHLR se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación 6-32} \quad AHLR = \frac{Q_i}{A_{cw}}$$

Donde, **AHLR** el área tasa de carga hidráulica por área, **A_{cw}** es el área del humedal y **Q_i** es el caudal de entrada.

6.5.7. Remoción de coliformes fecales

Utilizando la Ecuación 6-33 y Ecuación 6-34 y considerando las valores por Reed et al. (1995) citado por UNEP-IETC (2005) y Mara (2003), se calculó la remoción de coliformes fecales. Reed sostiene que los mecanismos para la eliminación de patógenos son esencialmente los mismos para lagunas de estabilización y humedales construidos. En investigaciones realizadas en humedales construidos sobre la remoción de patógenos la Ecuación 6-1 ha sido confiable para la predicción.

$$\text{Ecuación 6-33} \quad K_t = k_{20} \cdot (\theta)^{T-20}$$

Donde, **k_t** es el coeficiente de degradación estimada, **k₂₀** y **θ**: coeficientes de degradación para el caso de humedales de flujo subsuperficial se consideran **k₂₀** de 2.6 y **θ** de 1.19.

$$\text{Ecuación 6-34} \quad Ne = \frac{Ni}{(1 + tK_t)^n}$$

Donde, **N_e** es la concentración de coliformes fecales del efluente, **N_i** : la concentración de coliformes fecales en el afluente, **K_t** : coeficiente de degradación estimada, **n** : número de celdas en serie, y **t** : tiempo de retención hidráulica.

6.6. Fase VI: Propuesta organizacional para el manejo y operación del sistema de riego propuesto

Se realizó una caracterización del contexto organizacional del municipio y del área de influencia a través de información secundaria y mediante el análisis de las encuestas aplicadas a la muestra aleatoria simple indicadas en el punto 6.2 y 6.3

Posteriormente se realizó una revisión bibliográfica en diferentes bases de datos para establecer modelos administrativos, de operación y mantenimiento de sistemas de riego. Mediante un análisis cualitativo se realizó la estructuración de la propuesta organizacional más apropiada para el sistema de acuerdo a las condiciones del municipio de San Marcos.

Finalmente se realizó la socialización y validación de la propuesta organizativa a los actores involucrados.

6.7. Fase VII: Estructuración de la propuesta

Una vez seleccionada la alternativa más apropiada para el tratamiento complementario del agua residual domestica tratada, el sistema de riego y la estructura organizacional para el manejo y operación del sistema de riego para el caso del municipio de San Marcos, se generó el pre-diseño de la infraestructura hidráulica del sistema de riego y el esquema integral de tratamiento y reuso del agua residual en la zonas de ladera del municipio de San Marcos.

7. RESULTADOS Y ANALISIS

7.1. Criterios de selección de métodos naturales para el tratamiento complementario del agua residual doméstica para el reuso agrícola en zonas de ladera en San Marcos

En el presente apartado se realiza un análisis de los principales “**Factores y criterios considerados en el proceso de selección de tecnología para el tratamiento complementario o de aguas residuales por métodos naturales en la zona periurbana de San Marcos**”, considerando el contexto del municipio de San Marcos Guatemala, se enlistan y ponderan de acuerdo al método SCORING (Anderson, Sweeney y Williams, 1998).

Tabla 7-1 Factores y criterios considerados en el proceso de selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales por métodos naturales en la zona periurbana de San Marcos

			Ponderación por actores						Valor rij
FACTORES	CRITERIOS	Ponderaci ón de criterios (Wi)	Autoridades Municipales		Técnicos		Usuarios del servicio		
			Valor	ri1	Val or	ri2	Valor	ri3	
Sociales	Formación ambiental	3	4	12	5	15	5	15	42
	Producción de olores	5	8	40	8	40	9	45	125
	Ubicación de la planta	5	9	45	7	35	9	45	125
	Participación en la toma de decisiones	5	4	20	5	25	8	40	85
	Degradación paisajística	3	3	9	3	9	7	21	39
	Devaluación de los inmuebles	4	3	12	3	12	7	28	52
	Capacidad y voluntad de pago	4	6	24	5	20	5	20	64
	Potencial de generación de vectores	4	6	24	8	32	7	28	84
	Valor sub-total			186		188		242	
Tecnológicos	Eficiencia de la tecnología	4	6	24	8	32	3	12	68
	Características del agua residual.	4	3	12	7	28	3	12	52
	Expectativas de calidad del efluente y estándares de reuso en la agricultura	3	4	12	3	9	5	15	36
	Topografía	5	5	25	9	45	4	20	90
	Condiciones climáticas (temperatura y precipitación)	5	3	15	9	45	3	15	75
	Impacto ambiental del sistema de tratamiento	3	5	15	6	18	4	12	45
	Valor sub-total			103		177		86	
Ambientales	Vigilancia de la calidad del agua residual	4	4	16	5	20	7	28	64
	Evaluación de riesgos a fenómenos hidroclimáticos	5	4	20	8	40	5	25	85
	Valor sub-total			36		60		53	
Económicos	Costos de terreno	5	9	45	5	25	7	35	105
	Costos de inversión	5	9	45	5	25	5	25	95
	Costos de mano de obra	4	6	24	5	20	3	12	56
	Costos de operación y mantenimiento	4	7	28	5	20	6	24	72
	Valor sub-total			142		90		96	
Institucional y legal	Parámetros de calidad para la disposición y uso de aguas residuales domésticas	4	5	20	5	20	3	12	52
	Normas técnicas para el tratamiento de aguas residuales domésticas	3	3	9	6	18	3	9	36
	Derechos de uso de aguas residuales tratadas	3	4	12	3	9	7	21	42

Fuente: Información de campo 2011 y considerando Bernal *et al.*, (2003) y Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, (2002).

	Valor sub-total		41	47	42	
	Valor Sj		508	562	519	

En la Tabla 7-1 se enlistan los criterios según los factores sociales, tecnológicos, ambientales, económicos, institucionales y legales. Se realizó una ponderación por grupo de criterios según factor (Tabla 6-2) por cada uno de los actores entre ellos el Concejal responsable de Ambiente y Recursos Naturales del municipio de San Marcos, cinco (5) técnicos de organizaciones que realizan diseño y planificación de plantas de tratamiento de aguas residuales y siete (7) integrantes del Comité emergente del proyecto, beneficiarios con el proyecto de reúso de agua residual.

En mesa de trabajo cada uno de los actores realizaron una ponderación de acuerdo a su nivel de percepción de importancia de cada uno de los criterios (Tabla 6-3). A partir de ahí se obtuvieron los productos “**ri1**”, “**ri2**” y “**ri3**”, entre la ponderación por criterios “**Wi**” y en el primer caso por el valor establecido por el Concejal Municipal, para el segundo, por el valor establecido por los técnicos y el tercero por los integrantes del Comité. La sumatoria de estos productos (**valor rij**) es el valor total para cada criterio.

La sumatoria vertical de productos “**ri1**”, “**ri2**” y “**ri3**” de cada actor es el valor total de la percepción de todos los criterios. En este sentido de acuerdo a los resultados mostrados en el Tabla 7-1 se observa que el valor “**Sj**” es menor en las Autoridades Municipales y usuarios del servicio, que concuerda con el poco conocimiento, sobre el tratamiento de aguas residuales y de alternativas para el tratamiento complementario.

Por otro lado, de acuerdo con los resultados, los técnicos de organizaciones gubernamentales y privadas, relacionadas con el diseño y planificación de PTAR, muestran un mayor conocimiento sobre este tema, sin embargo, de los entrevistados, solamente el 40% conoce de forma parcial la tecnología de tratamiento de aguas residuales por métodos naturales.

En la Tabla 7-2, se muestran los criterios más importantes a juicio de los actores municipales, técnicos y usuarios del servicio. Dentro de ellos están, en orden de importancia los sociales, los económicos, tecnológicos y ambientales.

Tabla 7-2. Criterios más importantes según juicio de actores

FACTOR	CRITERIO	VALOR rij
Social	Producción de olores	125
	Ubicación de la planta	125
	Participación en la toma de decisiones	85
	Potencial de generación de vectores	84
Económicos	Costos de terreno	105
	Costos de inversión	95
Tecnológicos	Topografía	90
Ambiental	Evaluación de riesgos a fenómenos hidroclimáticos	85

Fuente: Con datos de información de campo 2012.

Dentro del análisis y ponderación, los tres actores, le dan mayor valor al factor social (Tabla 7-1 y Tabla 7-2), entre los criterios más importantes están, la producción de olores, ubicación de la planta y la participación en la toma de decisiones.

El factor tecnológico que se considera de mucha importancia es el criterio de topografía, esto debido a que el territorio de San Marcos se encuentra ubicado en una zona con topografía irregular con pendientes superiores al 12% en algunas áreas. Esto, según los actores condiciona el diseño y ubicación de la PTAR.

En el factor Ambiental los técnicos tienen una percepción mayor sobre el grado de importancia, principalmente con la evaluación de riesgos a fenómenos hidrológicos. Este aspecto, es debido a que en el territorio de San Marcos, han sucedido varios desastres de origen hidrológico, siendo necesario, según los técnicos hacer evaluaciones de riesgos en las áreas potenciales a construir una PTAR.

El factor económico es considerado por parte de los actores municipales el más importante, debido a que todas las inversiones en el tema de saneamiento son con fondos municipales.

Finalmente, los aspectos o factores institucionales y legales son de importancia media para todos los actores. Sin embargo, de acuerdo a Colom (2009), este aspecto debe ser el más importante, pues, a medida que se institucionalicen acciones y procesos se logrará una gobernabilidad del agua en el territorio de San Marcos.

7.2. Selección de alternativa para el tratamiento complementario de agua residual doméstica y del sistema de riego para el caso de San Marcos

7.2.1. Selección de alternativa para el tratamiento complementario de agua residual doméstica

Para la selección de la alternativa de tratamiento complementario se consideró el modelo conceptual SELTAR (CINARA et al., 2005), basándose únicamente en los bloques de reuso y aprovechamiento de subproductos y análisis de costos, debido a que a nivel institucional se tiene los estudios de factibilidad definidos para la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas.

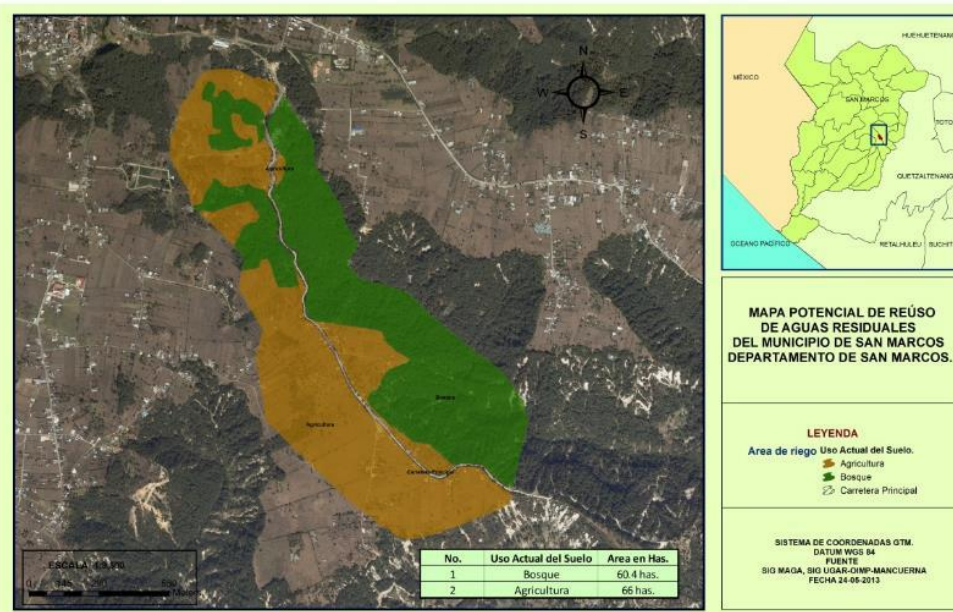
Se presentan a continuación los resultados obtenidos de la determinación del potencial de reuso de agua residual, percepción y aceptación del reuso por los productores y pobladores, optimización y selección de la alternativa para el tratamiento complementario de aguas residual.

7.2.1.1. Potencial de reuso de agua residual en el área periurbana del municipio de San Marcos.

– Situación agrícola actual en el área de estudio

De las 126.4 ha (Figura 7-1) que conforman el área de estudio, el 48% es de bosque mixto con especies de ciprés y aliso; y el 52% de cultivos agrícolas de secano (cuya fuente abastecedora de agua es la precipitación).

Figura 7-1. Uso actual del suelo en el área de estudio y área potencial de cultivo



Fuente: Elaboración propia con base en el Sistema de Información Geográfica de Guatemala (MAGA, 2004).

La producción agrícola se basa principalmente en la producción de granos básicos (maíz y frijol), cuyos rendimientos son bajos, aproximadamente 2,047.47 kg/ha en maíz y 101.25 a 121.5 kg/ha en frijol y en menor escala la producción de hortalizas (brócoli, coliflor, zanahoria, papa, repollo, rábano, acelga, lechuga). La producción frutícola es muy escasa y se maneja en asocio con los cultivos de maíz, dentro de las especies cultivadas están el aguacate, durazno, manzana y ciruelo.

La producción agrícola de secano, se inicia en los meses de marzo a mayo con la siembra y culmina entre los meses de agosto y diciembre con la cosecha (Tabla 7-3).

La producción de granos básicos en un 90% es para autoconsumo, el 10% de la producción se destina para la venta en el municipio, el precio por kilogramo de maíz es de 0.62 USD y por kilogramo de frijol es de 1.60 USD. Para el caso de las hortalizas, el

95% de la producción se destina para la venta, dentro del municipio de San Marcos, además se comercializa en San Pedro Sacatepéquez, los precios varían dependiendo la época del año, generalmente aumentan en la época seca, debido a que los productores de secano dejan de producir.

Tabla 7-3 Calendario agrícola del municipio de San Marcos

Cultivo	Siembra (mes)	Cosecha (mes)	Ciclo de cultivo (días)
Maíz	Marzo y abril	Octubre y Noviembre	237
Frijol	Mayo	Octubre	
Papa	Mayo	Agosto	120
Hortalizas	Abril	Noviembre	---
Frutales	Todo el año	Todo el año	---

Fuente: Información de campo 2012-2013.

– **Cultivos potenciales**

Considerando la situación agrícola actual y la disponibilidad de agua residual domestica tratada para riego, se consideran potencialmente para el proyecto, un asocio de cultivos de maíz, papa y aguacate. El primer ciclo se considera del mes de marzo a noviembre con aguacate y maíz, mientras que el segundo ciclo del mes de noviembre (15 días del mes de noviembre) a marzo y realizar la preparación del suelo nuevamente para el ciclo 1 (Tabla 7-4).

Tabla 7-4. Cultivos potenciales para la zona periurbana del municipio de San Marcos

No	Cultivo	Área (Ha)	%	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	Fecha de siembra
1	Aguacate	4.69	35%																24 de marzo
2	Maíz	8.81	65%																24 de marzo
Total Ciclo 1		13.50	100%																
1	Aguacate	4.69	35%																
2	Papa	8.81	65%																23 de noviembre
Total Ciclo 2		13.50	100%																

Fuente: Información de campo 2012-2013.

Se estima un área de cultivo total de 13.5 Ha. En la Figura 7-1 se aprecia la ubicación del área potencial de cultivo, dicha área se determinó en función de la aceptación de los productores para el reuso de agua residual y caudal de agua residual disponible.

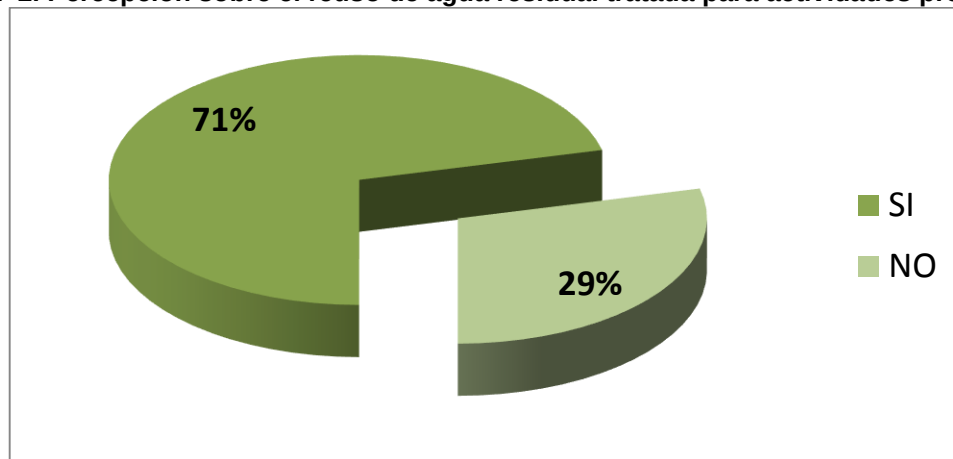
7.2.1.2. Percepción sobre el reuso de agua residual tratada de productores y pobladores ubicados en el área de estudio

El 71% de los entrevistados (Figura 7-2), perciben como positivo y de buena manera el reuso de agua residual tratada para actividades productivas, argumentando el 90% que es una alternativa productiva ante la ausencia de fuentes de agua para riego y que generaría fuentes de trabajo en el sector agrícola del municipio. El restante 10%

considera que es positivo, porque se estaría contribuyendo a la Gestión Integrada del Recurso Hídrico.

El restante 29% de los entrevistados (Figura 7-2), perciben como negativo el reuso de aguas residuales tratadas para actividades productivas, porque lo consideran “no higiénico”.

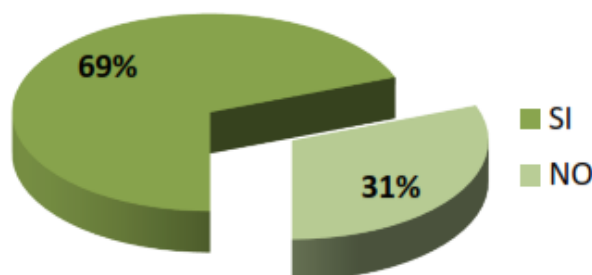
Figura 7-2. Percepción sobre el reuso de agua residual tratada para actividades productivas



Fuente: Elaboración propia, 2013.

Por otro lado, el 69% de las personas entrevistadas estarían en disposición de consumir productos agrícolas que provengan de campos irrigados con aguas residuales (Figura 7-3), argumentan en su totalidad, que en zonas productivas del occidente de Guatemala, se utiliza agua de ríos para irrigación y que estos cuerpos de agua están altamente contaminados por la descarga de agua residual sin ningún tratamiento, aspecto también lo concluye el Perfil Ambiental de Guatemala (IARNA, 2012); por tanto, aseguran que los productos agrícolas provenientes con aguas tratadas serían más seguras.

Figura 7-3. Disposición de la población a consumir productos agrícolas que provengan de campos irrigados con aguas residuales



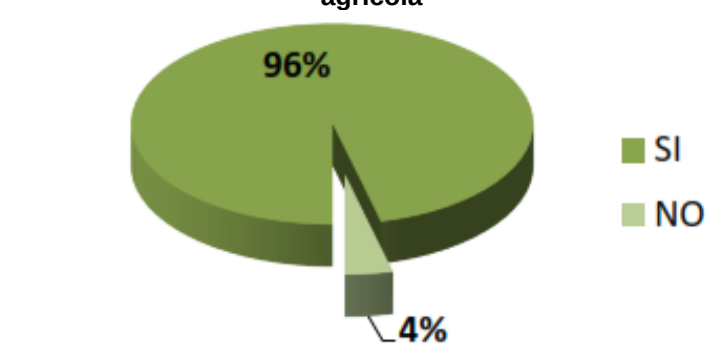
Fuente: Elaboración propia, 2013.

El 31% no consumirían productos agrícolas que provengan de campos irrigados con aguas residuales, el 90% asegura que es por “cultura” y saber la procedencia de los productos, el 10% restante por salud e higiene.

En general, de acuerdo a los resultados se considera que los pobladores del área urbana y periurbana del municipio de San Marcos están de acuerdo con el reuso de agua residual y reconocen los beneficios ambientales y económicos de los mismos.

El 96 % de los agricultores entrevistados, están dispuestos a utilizar agua residual tratada para la irrigación de sus cultivos (Figura 7-4). En su totalidad afirman que lo harían por la ausencia de fuentes de agua para riego en la zona y por la generación de ingresos por la producción agrícola en todo el año.

Figura 7-4. Disposición de los productores para utilizar agua residual tratada para la actividad agrícola



Fuente: Elaboración propia, 2013

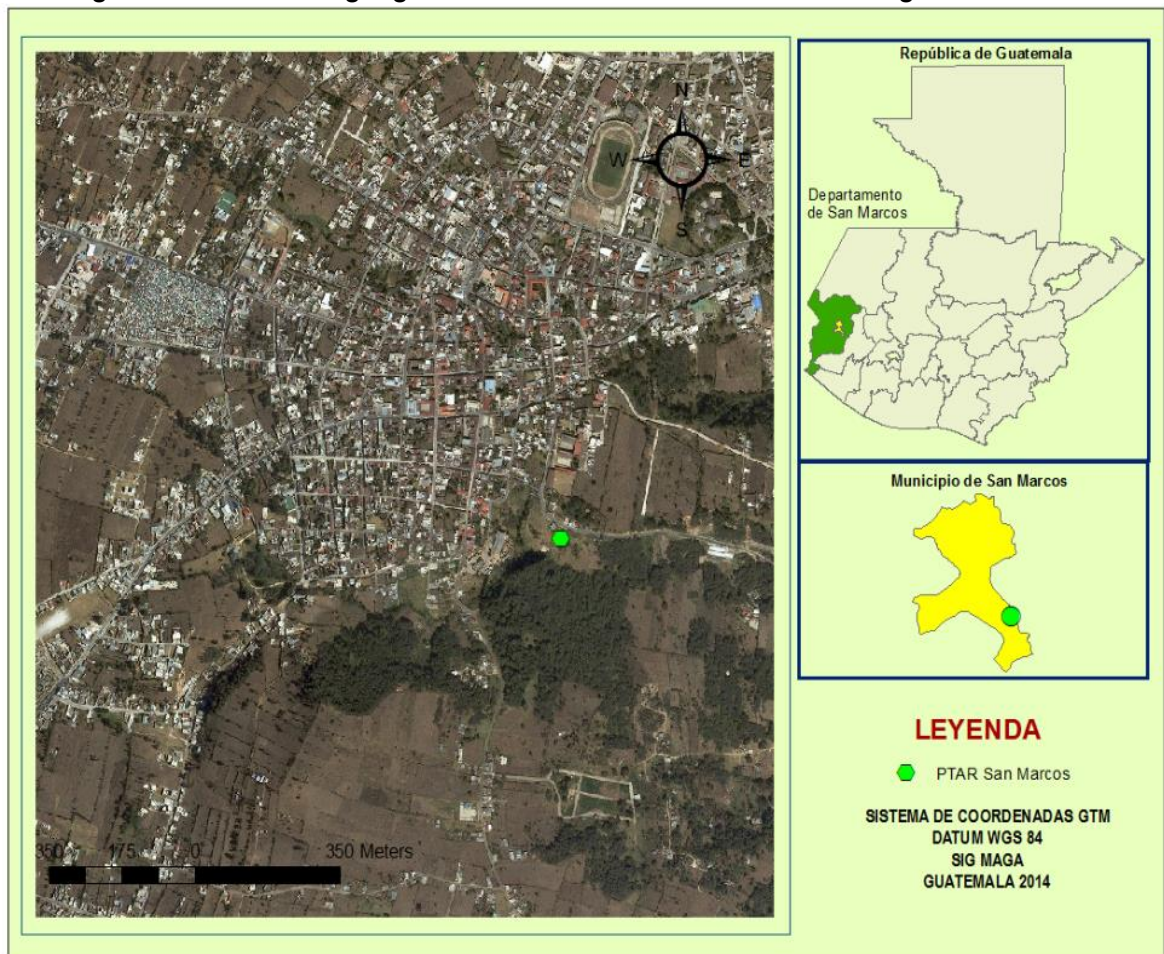
El restante 4% no está de acuerdo, según argumentan por higiene y salud. Además porque su actividad económica se basa en la construcción, por tanto aseguran no tener disponibilidad de tiempo para la agricultura.

7.2.1.3. Selección de alternativa para el tratamiento complementario de agua residual doméstica

– Planta de tratamiento previo al tratamiento complementario del agua residual

El efluente para el tratamiento complementario provendrá de una planta de tratamiento de aguas residuales domesticas del área urbana y periurbana del municipio de San Marcos, de la cual se tiene contemplada su construcción (MANCUERNA, 2008) en el sureste de la cabecera municipal de San Marcos (Figura 7-5).

Figura 7-5. Ubicación geográfica de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales



Fuente: Elaboración propia con base en el Sistema de Información Geográfica de Guatemala (MAGA, 2004).

La planta de tratamiento de aguas residuales, tratará a futuro un caudal máximo de 6,208.2 m³/día y caudal mínimo de 1,552.05 m³/día proveniente de 6 descargas de aguas residuales domésticas que son descargadas sobre el río Chivisgüe, proyectado para una población futura de 17,245 habitantes considerando una dotación de agua potable de 150 L/hab/día, un factor de retorno del 80% y una tasa de crecimiento poblacional de 2.93%. Utilizando para el análisis poblacional el método geométrico.

Según el estudio de factibilidad de la construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales para el área urbana y peri-urbana de San Marcos (MANCUERNA 2008) la calidad del efluente esperado está por debajo de los límites máximos permitidos en el reglamento 236-2006 del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, como se muestra en la Tabla 7-5.

Tabla 7-5. Límites máximos permitidos y proyección de calidad del agua residual

Parámetro	Unidad	LMP*	CE-PTAR	CDT***
Aceites y Grasas	Miligramos por litro	100	30.3	10
Coliformes fecales	NMP/100 ml	< 1E+8	9.2E+07	1.0E+04
Color	Unidades platino cobalto	1500	794	500
Demanda Bioquímica de Oxígeno	Miligramos por litro	700	222	32.17
Demanda Química de Oxígeno	Miligramos por litro	--	380	
Fósforo total	Miligramos por litro	50	5.3	5.2
Material flotante	Ausencia/presencia	Ausente	Presente	Ausente
Plomo	Miligramos por litro	4	0	0
pH		6 a 9	7.48	7.48
Temperatura	Grados Celsius	TCR+/-7	18	18
Sólidos suspendidos totales	Miligramos por litro	300	101	100
Nitrógeno Total	Miligramos por litro	150	12.5	10
*LMP: Límites máximos permitidos según decreto 236-2006 del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.				
** CE-PTAR: Concentración de entrada en la planta de tratamiento de aguas residuales propuesta.				
***CDT: Concentración esperada después del tratamiento del agua residual en la PTAR propuesta.				

Fuente: Decreto 236-2006 del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, Análisis de calidad del agua y MANCUERNA (2008).

Las descargas de aguas residuales se conducirán por una línea de unificación, hasta la planta de tratamiento, previo a la entrada, se construirá una caja de excedencias para desfogar el caudal excedente y evitar sobrecargas.

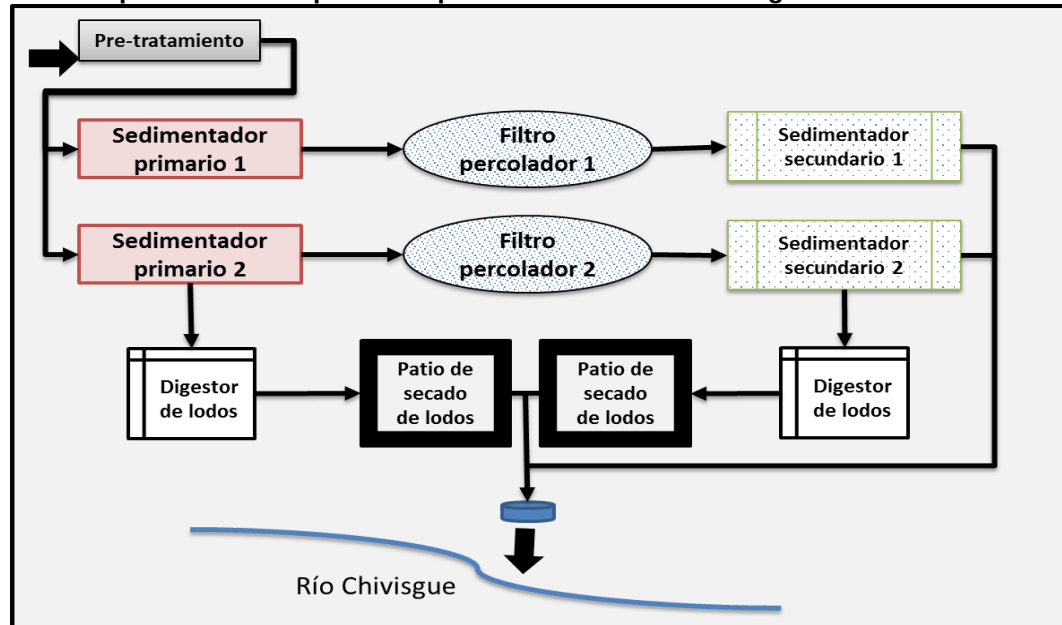
El sistema de tratamiento propuesto estará integrado por pre-tratamiento, sedimentadores sedimentadores primarios, filtros percoladores, sedimentadores secundarios, digestores de lodos de lodos y patios de secado de lodos (

Figura 7-6), en el Anexo 1 se visualizan los planos de diseño de la planta de tratamiento; se describen a continuación los componentes.

Pre tratamiento

Dispondrá de un canal de rejas y desarenador; el canal de rejas tendrá un espesor de barras de ¼ de pulgada, una separación de barras de 1 ½ pulgadas y un ángulo de inclinación de rejas de 60 grados. El desarenador tendrá una carga por unidad de superficie de 1,000.00 m³/m²/d con una tasa de arenas de 30 L/1000 m con un periodo de extracción de arenas de 5 días, construyéndose dos unidades.

Figura 7-6. Componentes de la planta de planta de tratamiento de aguas residuales de San Marcos



Fuente: Elaboración propia con información de MANCUERNA, (2008).

Tratamiento primario

El tratamiento primario será mediante métodos físicos con la construcción de sedimentadores primarios que tendrán 10.20 metros de longitud, 3.5 metros de ancho y 3.40 metros de profundidad, con carga de $18 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$, construyéndose dos unidades.

Tratamiento secundario

El tratamiento secundario se realizará a través de un filtro percolador con lecho filtrante de piedra con un tamaño nominal promedio de 100 mm, superficie específica de $60 \text{ m}^2/\text{m}^3$ y porcentaje de huecos de 40%. Se construirán dos unidades con una DBO de entrada de 250 mg/L y de salida de 50 mg/L, con una carga de DBO promedio de $0.415 \text{ Kg}/\text{m}^3$, carga Hidráulica promedio de $3.69 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$. Cada unidad tendrá 20.0 metros de ancho, 14 metros de largo y 1.80 metros de profundidad.

Separación de sólidos

Para la separación de sólidos previo a la descarga del agua residual, se construirán sedimentadores secundarios que tendrán 7.20 metros de longitud, 2.4 metros de ancho y 3.80 metros de profundidad, con carga de $18 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$, construyéndose dos unidades.

Manejo de lodos

Los lodos retirados de los sedimentadores primarios se dispondrán en un digestor de lodos, para que mediante un proceso anaerobio se transformen aquellos elementos no deseados en los lodos extraídos. El digestor de lodos tendrá un volumen de digestión a 18 °C de 473.38 m³ repartido en dos unidades.

Los lodos digeridos, se dispondrán para su deshidratación en el patio de secado de lodos mediante la acción solar. El patio de secado de lodos tendrá un volumen de almacenamiento de lodos de 141.74 m³, con profundidad promedio de 0.30 m. construyéndose dos unidades.

Obras accesorias

Se construirán accesos para el operador, cerco perimetral, cunetas para recolección de agua pluvial y muros de contención; estas obras accesorias permitirán garantizar el óptimo funcionamiento de la planta de tratamiento.

– Optimización y selección de la alternativa de tratamiento complementario del agua residual doméstica

En concordancia con los criterios más importantes a juicio de los actores municipales, técnicos y usuarios descritos en el apartado 7.1 y resumidos en la Tabla 7-2 se utilizó el modelo conceptual SELTAR como herramienta para la selección de tecnología del tratamiento complementario.

Sin embargo, en función de la pendiente del sitio de la planta (Bloque 4. Aspectos Tecnológicos) ninguno de los esquemas tecnológicos propuestos permitía pendientes mayores a 5%, pues el área tiene la pendientes en algunos puntos mayores al 12%; quedando hasta este punto la selección de la tecnología según el modelo.

Ante esta situación y la necesidad de encontrar alternativas tecnológicas para el tratamiento del agua residual para reuso en la zona periurbana de San Marcos, se realizó un análisis de información documental para proponer tecnología para el tratamiento complementario considerando en todo momento los aspectos indicados en los bloques 5 y 6 (aspectos ambientales, reuso y aprovechamiento de subproductos).

Así entonces, tomando en cuenta los componentes de la planta de tratamiento de aguas residuales propuesta por MANCUERNA (2008) y que dicho efluente será tratado para reuso, se consideró el tratamiento complementario como nivel de tratamiento terciario, describiendo a continuación los resultados obtenidos.

Tabla 7-6. Bloques y variables consideradas en la Selección de Tecnología

Nombre del bloque	Variables consideradas para la ST*	Descripción
Priorización y factibilidad del proyecto	Tipo de localidad	Cabecera municipal
	Fuente receptora	Rio Chivisgüe
	Existencia de planificación	Plan de ordenamiento territorial municipal Plan estrategia territorial municipal
	Cobertura de alcantarillado	100%
	Cobertura de acueducto	100%
	Cobertura tren de aseo municipal	85%
	Disposición controlada de residuos solidos	Rellenos sanitario ubicado en el municipio de Malacatan
	Relación DBO ₅ /DQO	222/380= 0.58 mg/L
Objetivos Ambientales	Nivel de tratamiento con remoción de patógenos.	Tomando en cuenta los componentes de la planta de tratamiento de aguas residuales propuesta y que dicho efluente será tratado para reuso se considera el tratamiento complementario como nivel de tratamiento terciario.
Aspectos socioculturales	Disponibilidad de energía eléctrica.	Interconexión nacional con una continuidad del 95-100%, la cual es suministrada por la Empresa de Energía Eléctrica de San Marcos.
	Categoría de localidad	Según el modelo conceptual San Marcos (cabecera departamental) corresponde a una ciudad entre 12,501 y 30,000 habitantes, se ajusta en la Categoría "11". Existen varios establecimientos comerciales que suministran materiales de construcción y accesorios para proyectos de alcantarillado, agua potable y construcción en general. También se encuentran diversos talleres de mecánica, electricidad, soldadura que prestan diversidad de servicios. Por ser San Marcos, cabecera departamental es común encontrar tiendas de prestigiosas cadenas comerciales. A nivel institucional, se encuentra delegaciones departamentales de organismos gubernamentales (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Bosques, Ministerio de Educación, Ministerio de Salud, Secretaría de Seguridad Alimentaria y Nutricional, Secretaría de la Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres); además diversas ONGs y entidades bancarias. Existen centros educativos de nivel primario, básico y diversificado; además de universidades (Universidad de San Carlos, Universidad Rural de Guatemala, Universidad Da Vinci, Panamericana, Mariano Gálvez) que forman profesionales de diferentes áreas administrativas y técnicas. También existen instituciones que promueven la educación no formal a través de cursos, capacitaciones, talleres, etc., entre ellas están el INTECAP, Pastoral de la Tierra, MANCUERNA, Helvetas y otras. En el tema ambiental existe la presencia de MANCUERNA ² , que ha impulsado, gestionado y construido infraestructura de saneamiento ambiental, siendo relevante para proyectos de este tipo.
	Acceso Urbano	San Marcos es la cabecera departamental de San Marcos, se comunica al departamento de Quetzaltenango y a la ciudad Capital de Guatemala por vía terrestre pavimentada transitable todo el año; también se comunica con la República de México por ser departamento fronterizo.
	Capacidad de Gestión	San Marcos, según el modelo conceptual se sitúa con un nivel de gestión media. Los indicadores que complican la capacidad de gestión son el número de proyectos ambientales ejecutados por año, el índice de desempeño fiscal y la capacidad de gestión de servicios públicos.
Aspectos tecnológicos	Caudal	Tomando en cuenta el caudal demanda máxima de los cultivos potenciales en una jornada de 14 horas 18.51 L/s, el caudal actual de Agua Residual (19 L/s) y la disponibilidad de área para la construcción de la infraestructura del tratamiento complementario; se consideró un caudal del 19 L/s. El aumento de agua residual proyectada, será desviado al cuerpo receptor después del tratamiento secundario de la planta.
	Temperatura	La temperatura del agua residual de la zona de estudio es mayor a los 10°C (18°C).
	Área disponible	Para la construcción de la PTAR se tiene la disponibilidad máxima de 1.5 hectáreas, las cuales requieren adecuación.
	Nivel Freático	El nivel freático donde se ubicará la PTAR es mayor a 6 metros.
	Pendiente	La pendiente varía de 5 a 12% (puntos con pendientes mayores al 12%), siendo necesaria la adecuación que permita la construcción de las unidades de la PTAR.
*ST= Selección de Tecnología		

Fuente: Información de campo y documental 2012-2013 basado en el Modelo SELTAR (CINARA et al, 2005).

² MANCUERNA, es una asociación de nueve municipios de los Departamento de San Marcos y Quetzaltenango que promueven la Gestión Integrada del Recurso Hídrico en los municipios de ubicados en la Cuenca del Rio Naranjo. El nombre significa "Mancomunidad de municipios de la Cuenca del Rio Naranjo".

Para el modelo SELTAR, se consideraron las variables descritas en la

Figura 7-6, iniciando con la información considerada en el bloque 1 (Priorización y factibilidad del proyecto), el nivel de tratamiento deseado en el bloque 2 (Objetivos ambientales) y la selección del esquema tecnológico sostenible por los aspectos considerados en los bloques 3 y 4 (Aspectos culturales y tecnológicos).

Tabla 7-7. Selección del esquema tecnológico para el caso de San Marcos

Objetivos Ambientales	Aspectos socioculturales				Aspectos Tecnológicos					
NTRP	DEE	CL	AU	CG	Q	Tº	A-RET	S-Área	NMF	PENT
TP1	TP1	TP1	TP1	TP1						
TP2	TP2	TP2	TP2	TP2						
TP3	TP3	TP3	TP3	TP3						
TP4	TP4	TP4	TP4	TP4	TP4	TP4	1.50	TP4	TP4	
TP5	TP5	TP5	TP5	TP5	TP5	TP5	1.50	TP5	TP5	
TP6	TP6	TP6	TP6	TP6						
TP7	TP7	TP7	TP7	TP7						
TP8	TP8	TP8	TP8	TP8	TP8	TP8	2.61			
TP9	TP9	TP9	TP9	TP9	TP9	TP9	2.61			
TP10	TP10	TP10	TP10							
TP11	TP11	TP11	TP11							
TP12	TP12	TP12	TP12	TP12	TP12	TP12	3.83			
TP13	TP13	TP13	TP13	TP13	TP13	TP13	3.83			
TP14	TP14									
TP15	TP15									
TP16	TP16	TP16	TP16	TP16						
TP17	TP17	TP17	TP17	TP17						
TP18	TP18	TP18	TP18	TP18	TP18	TP18	2.69			
TP19	TP19	TP19	TP19	TP19	TP19	TP19	2.69			
TP20	TP20	TP20	TP20	TP20	TP20	TP20	3.90			
TP21	TP21	TP21	TP21	TP21	TP21	TP21	3.90			
TP22	TP22	TP22	TP22	TP22						
TP23	TP23	TP23	TP23	TP23						
TP24	TP24	TP24	TP24	TP24	TP24	TP24	5.04			
TP25	TP25	TP25	TP25	TP25	TP25	TP25	5.04			
TP26	TP26	TP26	TP26	TP26						
TP27	TP27	TP27	TP27	TP27						
TP28	TP28	TP28	TP28	TP28						

NTRP= Nivel de tratamiento terciario con remoción de patógenos.
 DEE= Disponibilidad de energía eléctrica.
 CL= Categoría de la localidad.
 AU= Accesos urbano
 CG= Capacidad de gestión.
 Q= Caudal
 Tº= Temperatura
 A-RET= Área del terreno requerido por el esquema tecnológico
 S-Área= Selección en función del área.
 NMF= Nivel del manto freático
 PENT= Pendiente

Fuente: CINARA et al, (2005).

A partir del análisis de la información contenida en la Tabla 7-6 y utilizando el modelo conceptual en el bloque 2 se identificaron 28 esquemas posibles, en el bloque 3 se identificaron 24 y en el bloque 4 (considerando el nivel friático como última variable de análisis) se identificaron 2 (Tabla 7-7). En función del análisis de estos bloques, los esquemas tecnológicos sostenibles son **P4 y TP5**.

De acuerdo al análisis anterior las **tecnologías de tratamiento terciario con Laguna de maduración y Laguna de maduración con revestimiento artificial son sostenibles para estos bloques** (Figura 7-8).

Tabla 7-8. Descripción de los esquemas tecnológicos preseleccionados.

Número ET*	Tecnologías para el nivel de tratamiento del esquema tecnológico			
	Preliminar	Tratamiento Primario	Tratamiento Secundario	Tratamiento Terciario
TP4**	Tratamiento preliminar de Rejilla Gruesa, rejilla fina y desarenador.	Sedimentador primario.	Filtro percolador más sedimentador secundario	Laguna de Maduración
TP5**	Tratamiento preliminar de Rejilla Gruesa, rejilla fina y desarenador.	Sedimentador primario.	Filtro percolador más sedimentador secundario	Laguna de Maduración con revestimiento artificial

*ET= Esquema tecnológico
 **TP4 y TP5= Número de Esquema tecnológico para nivel de tratamiento terciario con remoción de patógenos según el modelo SELTAR.

Fuente: CINARA et al, (2005).

Los esquemas sostenibles para las condiciones de San Marcos según el modelo en el tratamiento preliminar, primario y secundarios son similares a las unidades propuestas en el estudio de factibilidad por MANCUERNA para la construcción de la planta de tratamiento.

Derivado de lo anterior, para la selección de la alternativa del tratamiento complementario (tratamiento terciario) se consideraron los aspectos mencionados y descritos en la Tabla 7-9, en la cual se enlistan las variables y criterios más importantes a juicio de los actores municipales, técnicos y usuarios descritos en el apartado 7.1 y resumidos en la Tabla 7-2 y los aspectos indicados en los bloques 5 y 6 (aspectos ambientales, reuso y aprovechamiento de subproductos).

A partir de las condiciones descritas en la Tabla 7-9 y mediante el análisis documental, se ha seleccionado como tecnología de tratamiento complementario **Humedales de flujo subsuperficial (HFSS)**.

CINARA et al, (2005) propone dentro de los esquemas tecnológicos para nivel de tratamiento terciario con remoción de nutrientes tecnologías como **TN9 y TN10**, dichos esquemas incluyen tecnologías similares a los componentes de la planta de tratamiento propuesto según MANCUERNA (2008) como se muestra en la Tabla 7-10, considerando

como tratamiento terciario Humedal de flujo subsuperficial o flujo subsuperficial con revestimiento artificial cuando la permeabilidad es mayor a 5 mm/h.

Tabla 7-9. Criterios y variables considerados para la selección de tecnología del tratamiento complementario

Nombre del bloque/Factor	Variables/Criterio consideradas para la ST*	Descripción
Aspectos ambientales	Vocación del suelo en el área de influencia del proyecto	En el caso estudio, el lote dispuesto para la construcción de la planta, está ubicado aproximadamente a 120 metros de la periferia del casco urbano, por lo tanto esta por fuera del área de influencia según RAS 2000, el cual define que la distancia al área de influencia es aquella que se encuentra a 100 m a la redonda de la planta de tratamiento de aguas residuales.
Reuso y aprovechamiento de subproductos	Actividades con potencial de reuso de agua residual	Se estima un área total de 13.5 Ha con cultivos de Maíz para grano y forraje, papa y frutales de aguacate para industrialización. En la Figura 7-1 se aprecia la ubicación del área potencial de cultivo, dicha área se determinó en función de la aceptación de los productores para el reuso de agua residual y alcance del sistema de riego.
	La comunidad conoce sobre el reuso y sus beneficios	El 71% de los entrevistados del área potencial para reuso perciben como positivo y de buena manera el reuso de agua residual tratada para actividades productivas, argumentando el 90% que es una alternativa productiva ante la ausencia de fuentes de agua para riego y que generaría fuentes de trabajo en el sector agrícola del municipio.
	Aceptación del reuso por los productores.	El 96 % de los agricultores entrevistados, están dispuestos a utilizar agua residual tratada para la irrigación de sus cultivos
Factores sociales	Producción de olores	La tecnología seleccionada debe considerar que la producción de olores sea mínima o nula.
	Ubicación de la planta	El área propuesta es aceptada por los actores.
	Participación en la toma de decisiones	Previo a la selección de tecnología debe hacerse la socialización de la alternativa
Factores económicos	Costos de terreno	Los costos de terreno no son restricción alguna, pues en donde se ubicará la PTAR son de bajo costo.
	Costos de inversión	Es considerado por parte de los actores municipales el más importante, debido a que todas las inversiones en el tema de saneamiento son con fondos municipales.
Factores Tecnológicos	Topografía	La pendiente varía de 5 a 12% (puntos con pendientes mayores al 12%), siendo necesaria la adecuación que permita la construcción de las unidades de la PTAR.

Fuente: Información de campo 2012-2013 considerando el modelo SELTAR (CINARA et al, 2005).

Tabla 7-10. Descripción de los esquemas tecnológicos

Número ET*	Tecnologías para el nivel de tratamiento del esquema tecnológico			
	Preliminar	Tratamiento Primario	Tratamiento Secundario	Tratamiento Terciario
TP4**	Tratamiento preliminar de Rejilla Gruesa, rejilla fina y desarenador.	Sedimentador primario.	Filtro percolador más sedimentador secundario	Humedal de flujo subsuperficial.
TP5**	Tratamiento preliminar de Rejilla Gruesa, rejilla fina y desarenador.	Sedimentador primario.	Filtro percolador más sedimentador secundario	Humedal de flujo subsuperficial con revestimiento artificial.
*ET= Esquema tecnológico				
**TP4 y TP5= Número de Esquema tecnológico para nivel de tratamiento terciario con remoción de patógenos según el modelo SELTAR.				

Fuente: CINARA et al, (2005).

Aunque el modelo SELTAR propone dicho esquema para la remoción de nutrientes, en varios trabajos de estudio o análisis de humedales de flujos subsuperficial consideran que pueden ser utilizados para remoción de patógenos (García M., et al., 2009; Vymazal et al., citado por Delgadillo, O., 2010; García et al., y Rivera et al., 1995 citado por Cano, A.L., 2003) y como tratamiento terciario para utilizar el efluente para riego (Cano, A.L. 2003 y Rodríguez-González, M. R., et al., 2013).

Además, debido al tamaño de las celdas se podrá construir en el área destinada para esta unidad de tratamiento complementario. En la Tabla 7-11 se describen las características por las cuales se selecciona dicha tecnología de tratamiento complementario del agua residual para el caso de San Marcos.

Tabla 7-11. Características de los principales de los humedales de flujo subsuperficial (HFSS) que condicionan y optimizan la selección.

Nombre del bloque/Factor	Variables/Criterio consideradas para la ST*	Características de los HFSS
Aspectos ambientales	Vocación del suelo en el área de influencia del proyecto	No presentan problemas de proliferación de mosquitos y otros vectores debido a que el agua fluye por debajo del nivel del suelo ¹ .
Reuso y aprovechamiento de subproductos	Actividades con potencial de reuso de agua residual	Los humedales pueden reducir en uno o dos órdenes logarítmicos los coliformes fecales, se han obtenido en algunos casos valores de 200 UFC/100 ml o menores ² . Tienen la capacidad de reducir otros patógenos como protozoos y helmintos ³ . Pueden ser utilizados como tratamiento terciario apto para riego ⁴ . Los humedales construidos pueden funcionar eficazmente como tratamiento complementario de materia orgánica y tratamiento terciario ⁵ . En la república Checa, se reportaron entre 98 a 99% de eficiencia en la remoción de coliformes fecales y enterobacterias ⁶ .
Factores sociales	Producción de olores	No presentan problemas de generación de olores debido a que el agua fluye por debajo del nivel del suelo ¹ .
	Participación en la toma de decisiones	La alternativa fue socializada y validada por los actores.
Factores económicos	Costos de terreno	Los costos de terreno no son restricción alguna, pues en donde se ubicará la PTAR son de bajo costo.
	Costos de inversión	Los costos del medio de soporte utilizado, traslado y colocación son mayores comparados con otras tecnológicas naturales ¹ .
Factores Tecnológicos	Topografía	Se modificará para adecuar las celdas el humedal.
* Selección de tecnología. 1. Reed et al., (1995); Wittgren and Maehlum (1997) citado por Silva J. (Sin Fecha). 2. Garcia et al., (1999) citado por Cano, A.L. (2003) 3. Rivera et al., (1995) citado por Cano, A.L. (2003) 4. Cano, A.L. (2003) 5. Rodríguez-González, M. R., et al (2013). 6. Vymazal et al., citado por Delgadillo, O. (2010).		

7.2.2. Selección del método de riego para el caso de San Marcos

Para la selección del método de riego para el reuso de agua residual en el municipio de San Marcos, se consideraron factores técnicos y socioeconómicos.

a. Factores técnicos

Los factores técnicos de mayor importancia para la elección del método de riego en la zona de estudio son la topografía y la calidad del agua (Tabla 7-12). En el caso de la topografía en la zona de estudio el relieve es variado, en algunas áreas la pendiente es mayor al 12%. El agua residual del efluente se espera que su calidad sea baja, pues, según Santos et al (2003) citado por (Silva et al., 2008) puede tener acumulación de algas y sólidos suspendidos.

Tabla 7-12. Factores técnicos que condicionan la elección del método de riego en la zona de estudio

No	Factores	Método de riego		Situación para el caso de estudio		
		Aspersión	Riego Localizado	Nivel de importancia	Condición	Descripción
1	Disponibilidad del agua	Regular	Continuo	Media	Continuo	Caudal permanente de Agua Residual.
2	Calidad del agua	Sin sólidos	Elevada	Alta	Baja	
3	Capacidad de infiltración del suelo	Media a baja	Cualquiera	Media	Media	Suelos de origen volcánico, con textura franca.
4	Topografía	Relieve suave	Irregular	Alta	Irregular	Pendientes mayores al 12% en algunas zonas de cultivo.

Fuente: Elaboración propia con base a Pereira y Trout (1999).

De acuerdo a lo descrito en el Tabla 7-12 la calidad del agua se puede mejorar mediante la construcción de un sistema de filtrado, pero esto aumenta los costos de infraestructura de riego. La calidad del agua es un factor importante, pues la presencia de material sólido (algas y sólidos suspendidos) puede generar obturación de los emisores y aspersores.

La topografía irregular se mejorará mediante prácticas de conservación de suelo implementadas en los sistemas agroforestales propuestos.

b. Factores socioeconómicos

Para el análisis de los factores socioeconómicos que condicionan la elección del método de riego en el contexto del municipio de San Marcos Guatemala, se enlistan y ponderan de acuerdo al método SCORING (Anderson, Sweeney y Williams, 1998).

En la Tabla 7-13 se enlistan los principales factores socioeconómicos, basados en los propuestos por Pereira y Trout (1999). Se realizó una ponderación por grupo de criterios según factor por cada uno de los actores entre ellos siete (7) integrantes del Comité

emergente del proyecto, beneficiarios con el proyecto de reúso de agua residual y cinco (5) técnicos de organizaciones que realizan diseño y planificación de sistemas de riego en el departamento de San Marcos.

En mesa de trabajo cada uno de los actores realizaron una ponderación de acuerdo a su nivel de percepción de importancia de cada uno de los criterios (Tabla 6-3). A partir de ahí se obtuvieron los productos “**ri1**” y “**ri2**”, entre la ponderación por criterios “**Wi**” y en el primer caso por el valor establecido por los técnicos y el segundo por los integrantes del Comité. La sumatoria de estos productos (**valor rij**) es el valor total para cada criterio.

La sumatoria vertical de productos “**ri1**” y “**ri2**” de cada actor es el valor total de la percepción de todos los criterios. En este sentido de acuerdo a los resultados mostrados en el Tabla 7-13 se observa que el valor “**Sj**” es similar en los dos actores.

Tabla 7-13. Factores socioeconómicos que condicionan la elección del método de riego en la zona de estudio

No	Factores	Ponderación de criterios (Wi)	Ponderación por actores				
			Técnicos		Usuarios del servicio		Valor rij
			Valor	ri2	Valor	ri3	
1	Costo de mejora de la calidad de agua	3	2	6	2	6	12
2	Valor de producción	5	7	35	5	25	60
3	Costo de la mano de obra	2	5	10	6	12	22
5	Disponibilidad de capital	5	7	35	9	45	80
6	Exigencia en tecnología	5	7	35	8	40	75
Valor Sj				121		128	

Fuente: Elaboración propia con base a Pereira y Trout (1999)

Los factores socioeconómicos de mayor importancia, en la zona de estudio, son el valor de producción, disponibilidad de capital y exigencia tecnológica (Tabla 7-13).

De acuerdo a la percepción de los actores, la disponibilidad de capital por parte de los productores es el primer aspecto a considerar al momento de elegir la tecnología de riego, en este sentido, la disponibilidad de capital de los productores es medio a bajo, contrastado con estudio socioeconómico que evidencia que el ingreso de los productores de la zona de estudio fluctúa entre 100 a 250 dólares mensuales y que la generación de capital es limitada.

El segundo aspecto de mayor importancia es la exigencia de tecnología, pues, está relacionada con la disponibilidad de capital. A mayor especialización de la tecnología mayor el costo y por tanto mayor sería el capital necesario.

El tercer aspecto importante es el valor de producción, el cual es, el costo que implica la implementación de tecnología de riego en las áreas de cultivo.

Mediante el análisis de los factores técnicos y socioeconómicos a través del nivel de asociación o interdependencia de factores (Tabla 7-14) se establecieron aquellas que condicionan el tipo de método de riego apropiado.

Tabla 7-14. Asociación e interdependencia de factores

Factores	Disponibilidad de capital	Exigencia en tecnología	Pureza del agua	Topografía
Disponibilidad de capital		1	1	1
Exigencia en tecnología			1	0
Pureza del agua				0
Topografía				

Fuente: Elaboración propia, 2013.

De acuerdo a la asociación o interdependencia visualizada en la Tabla 7-14, un sistema de riego por método de goteo es altamente exigente en tecnología, requiere personal técnico capacitado, es exigente en la calidad del agua (pureza del agua; afectando estos factores en el requerimiento de capital elevado.

En el caso un sistema de riego por método de aspersión, es poco exigente en tecnología y calidad el agua; pero es la topografía inclinada debe considerarse para no generar problemas de erosión.

Por tanto, para mejorar la pureza del agua, es necesaria tecnología, cuando hay exigencia de tecnología, aumenta la inversión, factor que impacta Disponibilidad de capital de los productores.

La exigencia de tecnología del método de riego, genera un aumento en la inversión, factor que impacta la disponibilidad de capital por los productores.

Así entonces, mediante el análisis de los factores técnicos y socioeconómicos a través del nivel de asociación o interdependencia de factores (Tabla 7-14), se evidencia que el factor condicionante para la selección del método de riego es ***la disponibilidad de capital.***

Considerando este factor y la situación económica de los agricultores en el municipio de San Marcos, ***el método de riego por aspersión es el apropiado para la zona de estudio.***

7.3. Dimensionamiento del Humedal de Flujo Subsuperficial como unidad de tratamiento complementario

En función de la metodología indicada en el apartado 6.5 y los parámetros de diseño indicados en la Tabla 7-15, se dimensiono el humedal de flujo subsuperficial para el caso de San Marcos.

Tabla 7-15. Parámetros de diseño considerado para el humedal de flujo subsuperficial

Parámetro	Unidad	Valor
Caudal del efluente	m ³ /día	1,641.60
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	32.17
Temperatura del agua residual (T°)	°C	18.00
Coliformes fecales	UFC/100 mL	1.00E+04
Solidos suspendidos (SS)	mg/l	100
pH		7.48
Evapotranspiración (e)	mm/día	3.51
Precipitación promedio	m/día	0.023
Infiltración	m ³ /d	0.216
Porosidad medio filtrante		0.38
Coeficiente de cultivo (Kc)		0.8
K ₂₀	d ⁻¹	2.6
θ ₂₀		1.19

Fuente: Elaboración propia con base en MANCUERNA (2008), Mara (2003) y UNEP-IETC (2005).

La planta emergente utilizada para el tratamiento de aguas residuales será la caña (*Phragmites sp*), siendo éste género el más utilizado en humedales de flujo subsuperficial (OPS/OMS, 1999), su distribución cosmopolita y la adaptación en la región de San Marcos, son aspectos a tomar en cuenta en su selección. Esta planta tiene una profundidad radicular de 0.6 metros, rustica de gran producción de biomasa (OPS/OMS, 1999). Además es una planta con una tasa de transferencia de O₂ de 4.8 g/m²-d (Madera et al.), que se considera buena para los procesos aeróbicos en el humedal.

La calidad del efluente esperado será de 2.1E+01 UFC/100 mL, según el Acuerdo Gubernativo No. 236-2006 del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (2006) que reglamenta el reuso de aguas residuales, la calidad puede ser usada para todo tipo de actividad productiva, agrícola o recreativa (en el apartado 5.6. Normatividad internacional y nacional del reuso de agua residual, se indican los parámetros y límites permisibles para reuso).

La normativa guatemalteca no considera valores para huevos de helmintos, pero según la Organización Mundial de Salud (WHO, 2006), estos deben estar ausentes en el agua para riego. Por tanto, debe considerarse el monitoreo del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de San Marcos cuando sea construida y este funcionamiento.

En la Tabla 7-16 se detallan las características y dimensiones calculadas para el humedal de flujo subsuperficial para el caso de San Marcos.

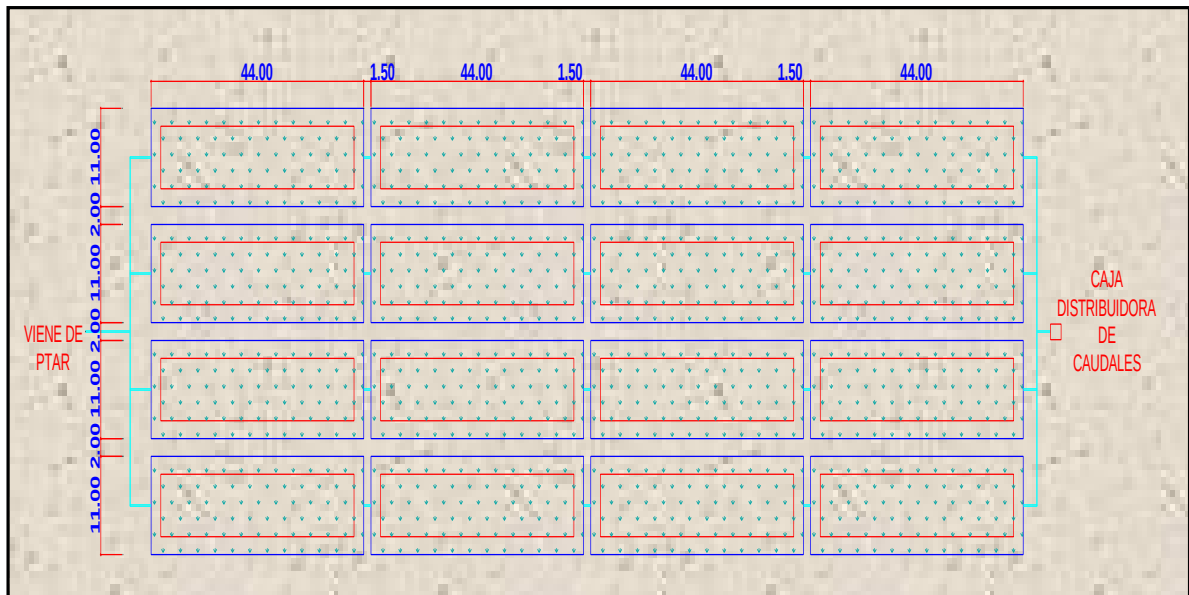
Tabla 7-16. Características y dimensionamiento del humedal de flujo subsuperficial

Variable	Estimación/cálculo	Observación
Tipo de planta	Phragmites sp	Se usará una especie adaptada a las condiciones de San Marcos.
Medio filtrante	Grava media	Tamaño efectivo de 32 mm
Área del humedal	7,740.41 m ²	
Tiempo de retención hidráulica	1.1 días	
Tiempo de retención hidráulica ajustada	2 días	
Número de celdas	16	
Tamaño de celdas	11 m de ancho (w) y 44 m de largo (l).	La cantidad de celdas se realizó tomando en cuenta la adecuación del terreno y la pendiente. Para el caso se consideró una relación largo/ancho de 4/1 (OPS/OMS, 1999)
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	10 mg/L	
Eficiencia de degradación de DBO ₅)		
Remoción de sólidos suspendidos	12.9 mg/L	
Eficiencia de remoción de sólidos suspendidos	87%	
Remoción de coliformes fecales	2.1E+01 UFC/100 mL	Considerando cuatro series en paralelo haciendo un total de 16 celdas.
Eficiencia de remoción	100%	
Perdida o ganancia de caudal	-38.50 m3/día (2%)	Como la diferencia de caudal es menor al 5% no se hace ajuste del caudal de diseño.

Fuente: Elaboración propia 2013.

Se construirán 16 celdas configuradas como se muestran en la Figura 7-7, que abarcarán un total de 7, 740.41 m² (0.77 hectáreas). Del Anexo 2 al Anexo 5 se visualizan los diseños del humedal construido que se propone para San Marcos

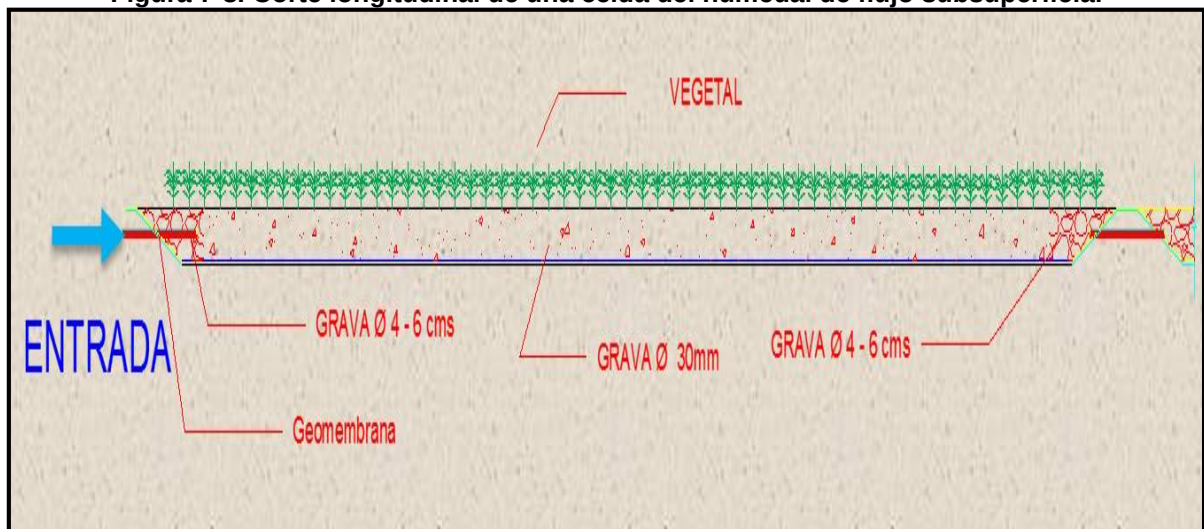
Figura 7-7. Configuración de celdas del humedal de flujo subsuperficial



Fuente: Elaboración propia 2013.

Cada celda tendrá 11 metros de ancho por 44 metros de largo Figura 7-8, de tal forma que permita la adecuación del terreno por la topografía en el área de construcción de los humedales mayor a 5 %.

Figura 7-8. Corte longitudinal de una celda del humedal de flujo subsuperficial



Fuente: Elaboración propia 2013.

7.4. Propuesta de infraestructura hidráulica y organizacional para el manejo y operación del sistema de riego para el caso de San Marcos

7.4.1. Propuesta de infraestructura hidráulica del sistema de riego para el caso de San Marcos.

En función de la metodología indicada en el apartado 6.4, se detalla a continuación los resultados de los cálculos y la propuesta de infraestructura hidráulica para el caso de San Marcos considerando **aspersión** como método de aplicación.

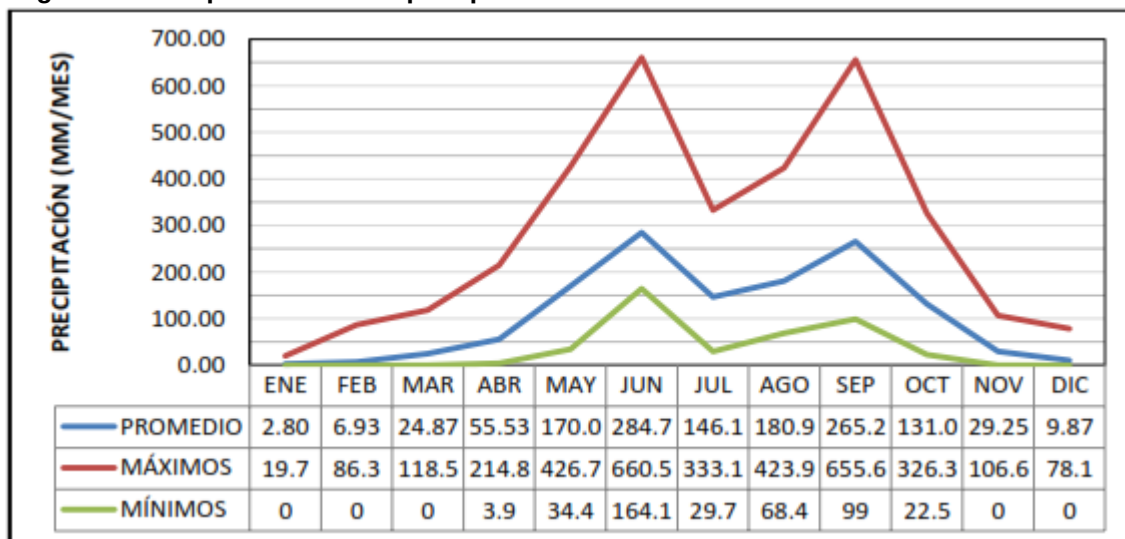
7.4.1.1. Determinación demanda hídrica

En función del análisis de la información recopilada en diversas fuentes (Tabla 6-7) se realizaron los cálculos para determinar la demanda hídrica, utilizando la metodología descrita en el apartado 6.4.1.

– Precipitación

En la Figura 7-9 presenta el comportamiento promedio, máximo y mínimo de este parámetro en la zona de estudio.

Figura 7-9 Comportamiento de precipitación de la zona de estudio. Estación San Marcos



Fuente: Elaboración propia con base en datos históricos de la Estación San Marcos.

En la figura anterior se aprecia que la precipitación tiene un marcado comportamiento unimodal, siendo la época de mayores lluvias la comprendida entre mayo y octubre con picos en junio y septiembre. Los meses de baja precipitación son enero, febrero, marzo, abril, noviembre y diciembre.

La precipitación efectiva (Pe) calculada es de 814.10 mm anuales. El cálculo se realizó mediante el análisis de probabilidad tipo Weibull. Se seleccionó la serie de probabilidad de excedencia más cercana al 75% (74,19%) y se calculó la precipitación efectiva de acuerdo al método propuesto por la USDA (Ven Te Chow, 2000).

En el cuadro Tabla 7-17 se muestran los datos de precipitación media mensual obtenida de la estación meteorológica San Marcos, la precipitación con un 75% de probabilidad.

Tabla 7-17. Precipitación incidente y efectiva para 74% probabilidad de excedencia

Variable	MES											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OC	NOV	DIC
Precipitación 74% prob. Excedencia (mm/mes)	0.0	0.0	2.6	18.1	105.6	203.8	94.9	123.1	176.6	85.0	5.0	0.0
P. Efectiva (mm/mes)	0.0	0.0	2.6	17.6	87.8	137.3	80.5	98.9	126.7	73.4	5.0	0.0

Fuente: Elaboración propia con base a precipitación multianual Estación San Marcos 1980-2009, INSIVUMEH 2012.

– **Evapotranspiración de referencia**

La evapotranspiración de referencia se calculó mediante el método de Penman Monteith, para lo cual se utilizó el software CROPWAT para WINDOWS 8.0, desarrollado por la FAO. La información climática utilizada fueron los datos promedios mensuales multianuales de Temperatura máxima, Temperatura mínima, Velocidad del viento, Humedad relativa y Brillo solar de la estación San Marcos (periodo 1980 a 2009). Los resultados se presentan en la Tabla 7-18.

Tabla 7-18. Datos climáticos promedios y ETo mensual promedio

Variable	Unidad	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OC	NOV	DIC	Promedio
	Días	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
Temp Min	°C	2.7	3.2	3.7	6.4	8.2	8.6	8.0	7.7	7.8	7.1	5.0	4.0	6.00
Temp Max	°C	20.3	20.1	20.7	20.9	20.6	19.7	20.5	20.5	20.0	20.1	20.2	20.3	20.30
Humedad	%	84.0	81.0	82.0	83.0	89.0	88.0	87.0	87.0	89.0	88.0	86.0	85.0	86.00
Viento	km/día	114.0	127.0	119.0	85.0	83.0	79.0	99.0	104.0	93.0	92.0	105.0	112.0	101.00
Insolación	horas	10.3	10.2	10.6	9.7	8.7	8.1	9.0	9.1	8.4	8.6	9.4	9.7	9.30
Rad	MJ/m²/día	21.0	22.6	25.0	24.4	22.9	21.7	23.1	23.3	21.8	20.7	20.1	19.6	22.20
ETo	mm/día	3.1	3.4	3.9	4.0	3.8	3.6	3.8	3.8	3.5	3.3	3.0	2.9	3.51
	mm/mes	96.1	96.3	120.59	118.5	117.2	107.7	117.8	118.1	105.6	101.4	91.2	90.2	

Fuente: Elaboración propia con base información climática multianual Estación San Marcos 1980-2009, INSIVUMEH 2012.

Los resultados muestran que este parámetro es menos variable que la precipitación, lo cual indica que hacia los meses de bajas precipitaciones se presenta déficit de agua para agricultura.

– Requerimientos hídricos del cultivo

Para la definición del plan de cultivos, se consideró la situación agrícola actual de la zona de estudio descrita en el numeral 0 y los cultivos potenciales indicados en la Tabla 7-4.

Posteriormente se definieron los valores de coeficiente de cultivo para cada cultivo en cada una de sus etapas de desarrollo y se determinó el requerimiento hídrico de los cultivos. En la Tabla 7-19 se muestran los requerimientos hídricos de los cultivos propuestos.

Tabla 7-19. Plan de cultivos y cálculo requerimiento hídrico de cultivos

MESES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
VARIABLE	MAIZ (siembra en marzo)											
Eto	96.1	96.3	120.6	118.5	117.2	107.7	117.8	118.1	105.6	101.4	91.2	90.2
Kc	0.0	0.0	0.7	0.7	0.7	0.9	0.9	0.9	0.9	0.2	0.0	0
Etc	0.0	0.0	88.0	86.5	85.5	96.9	106.0	106.3	95.0	23.3	0.0	0.0
	AGUACATE (siembra en enero)											
Eto	96.1	96.3	120.6	118.5	117.2	107.7	117.8	118.1	105.6	101.4	91.2	90.2
Kc	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
Etc	81.69	81.87	102.50	100.73	99.60	91.55	100.13	100.39	89.76	86.16	77.52	76.68
	PAPA (siembra en noviembre)											
Eto	96.1	96.3	120.6	118.5	117.2	107.7	117.8	118.1	105.6	101.4	91.2	90.2
Kc	0.89	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.91	0.89
Etc	85.53	20.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	82.99	80.29

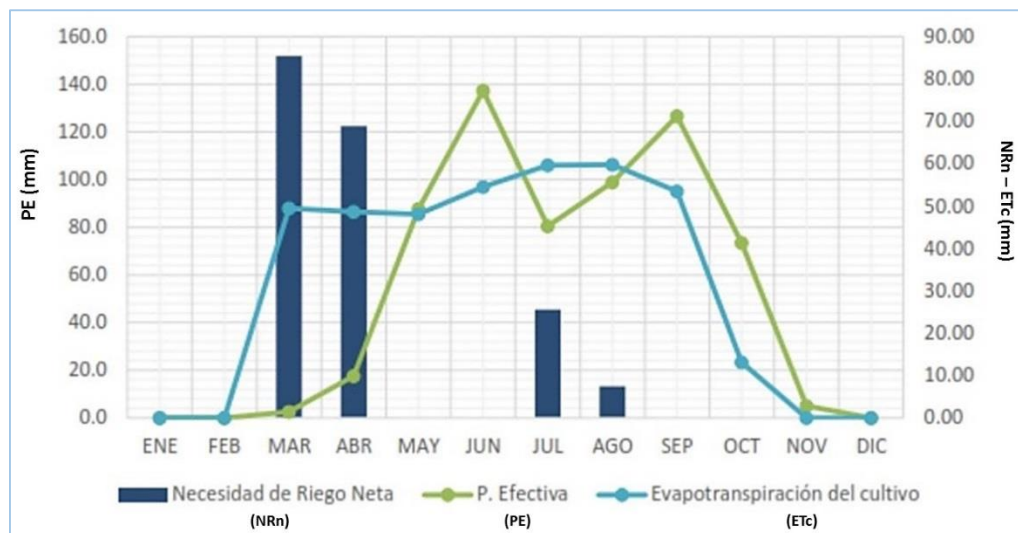
Fuente: Elaboración propia, 2013.

La tabla anterior muestra que se tiene requerimiento hídrico de cultivos durante todo el año, con mayores valores en los meses de enero, febrero, marzo, noviembre y diciembre.

– Necesidades de riego netas

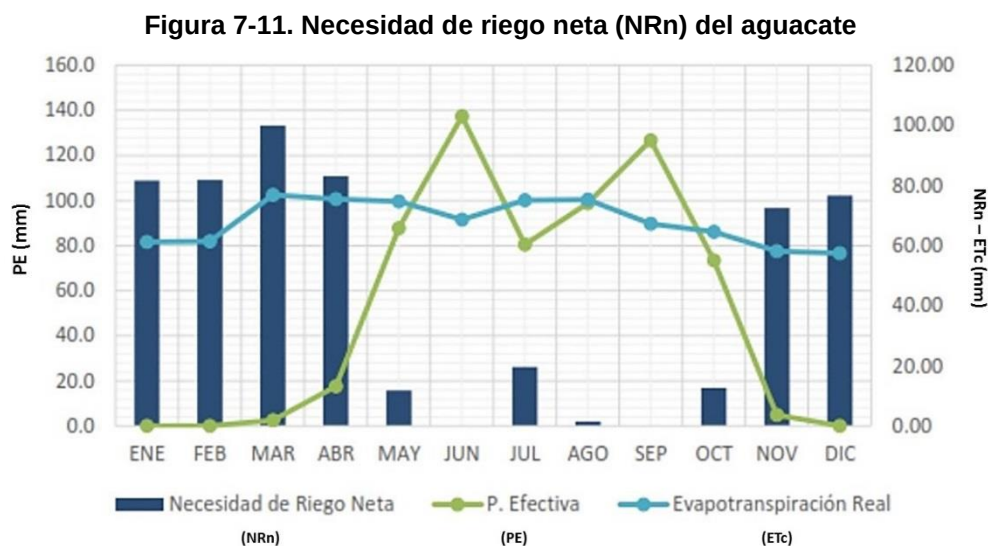
La necesidad neta de riego se calculó como la diferencia entre el requerimiento hídrico del cultivo (ETc) y la precipitación efectiva correspondiente a un 74.19% de probabilidad de excedencia (Pe). En las Figura 7-10 a Figura 7-12 se presentan los resultados obtenidos en relación al requerimiento hídrico neto de los cultivos.

Figura 7-10. Necesidad de riego neta (NRn) del maíz



Fuente: Con base en datos climáticos del periodo 1993-2009 del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (2009).

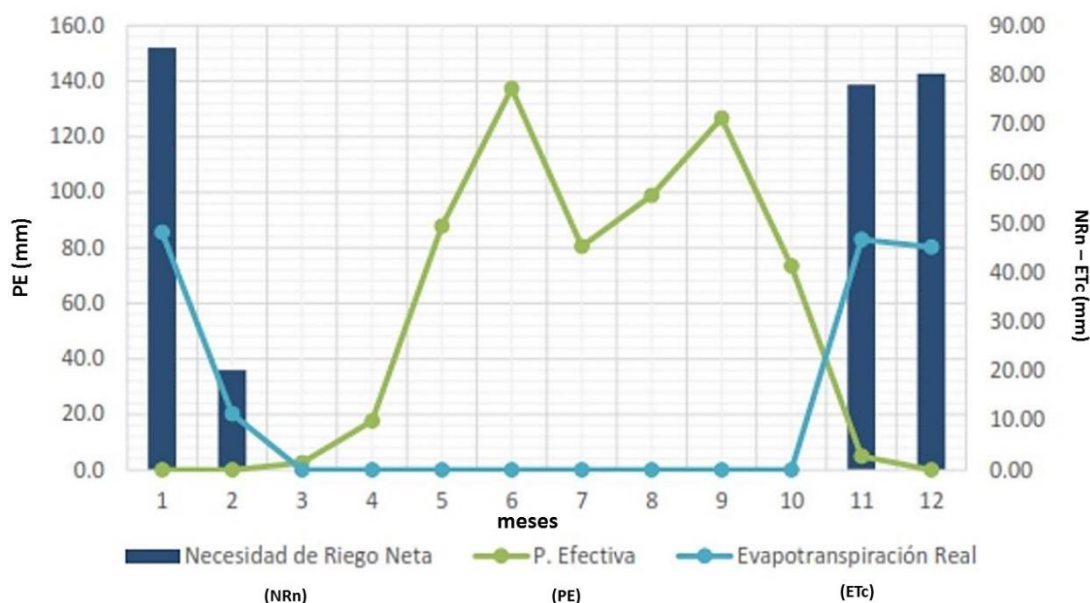
El cultivo de maíz tiene necesidades de riego en marzo, abril, julio y agosto; siendo marzo el mes de mayor demanda (85.44 mm/mes).



Fuente: Con base en datos climáticos del periodo 1993-2009 del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (2009).

El cultivo de aguacate tiene necesidades de riego en enero, febrero, marzo, abril, mayo julio, agosto, octubre, noviembre y diciembre; siendo marzo el mes de mayor demanda (99.91 mm/mes).

Figura 7-12. Necesidad de riego neta (NRn) de la papa



Fuente: Con base en datos climáticos del periodo 1993-2009 del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (2009).

El cultivo de papa tiene necesidades de riego en enero, febrero, noviembre y diciembre; siendo enero el mes de mayor demanda (85,53 mm/mes).

– ***Eficiencia del proyecto***

El proyecto plantea una red de conducción y distribución en ductos cerrados (PVC) y aplicación por el método de riego por aspersión. Las eficiencias asumidas para el proyecto son las siguientes:

Tabla 7-20. Eficiencias del proyecto

Eficiencia de Conducción (Ec)	0,97
Eficiencia de Distribución (Ed)	0,97
Eficiencia de Aplicación (aspersión)	0,6
Eficiencia del proyecto (Ec*Ed*Ea)	0,56

– ***Necesidades de riego total y caudal de flujo continuo***

Considerando el método de riego por aspersión con una eficiencia total de 0.56 (Tabla 7-20) el caudal flujo continuo (Qfc) máximo del proyecto es de 8.17 lt/seg. En la Tabla 7-21 se muestran los resultados de NRt y Qfc obtenidos de manera independiente para cada cultivo y el Qfc total del proyecto.

Tabla 7-21. Necesidades de riego total y caudal de flujo continuo

Variable	MESES											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
NRt maíz (mm/mes)	0.00	0.00	4.88	4.07	0.00	0.00	1.46	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00
Qfc maíz (lt/seg)	0.00	0.00	5.00	4.16	0.00	0.00	1.49	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00
NRt aguacate (mm/mes)	4.7	5.2	5.7	4.9	0.7	0.00	1.1	0.1	0.00	0.7	4.3	4.4
Qfc aguacate (lt/seg)	2.59	2.88	3.17	2.73	0.38	0.00	0.62	0.05	0.00	0.40	2.38	2.43
NRt papa (mm/mes)	4,9	1,3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Qfc papa (lt/seg)	5.00	1.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.71	4.69
Qfc TOTAL	7.59	4.19	8.17	6.89	0.38	0.00	2.12	0.48	0.00	0.40	7.09	7.13

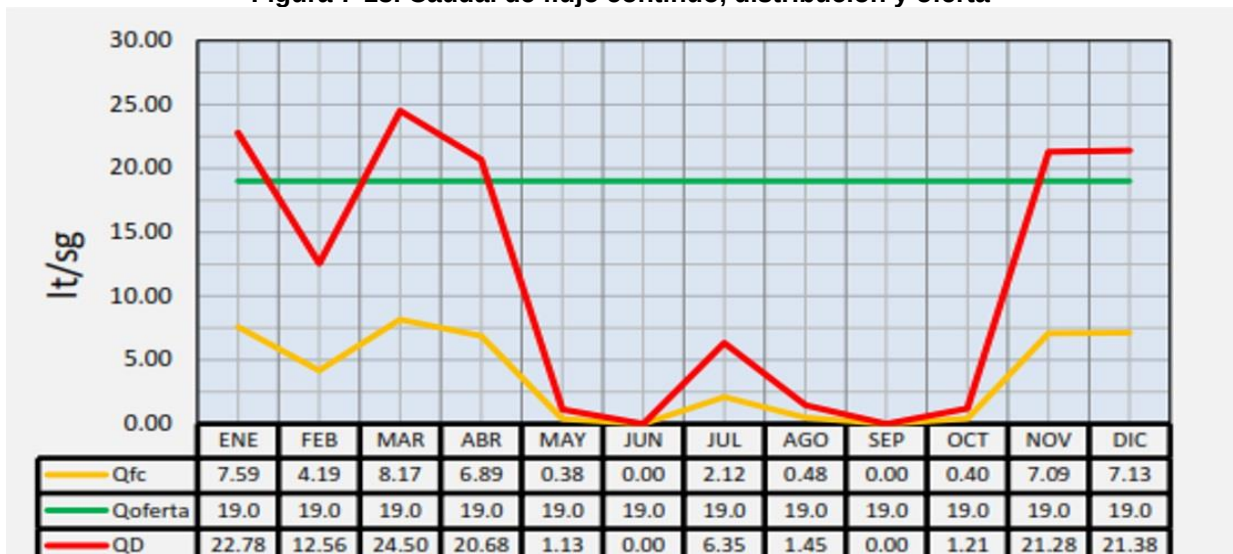
Fuente: Elaboración propia

– **Análisis oferta/demanda hídrica**

Definiendo la jornada de riego (JR), el cálculo del caudal de distribución (Qd) se determinó de la siguiente manera:

Una vez calculado el caudal demandado en flujo continuo (Qfc), definido la jornada de riego (JR) en 8 horas/día y calculado el caudal de distribución (Qd) se procedió a realizar la comparación temporal con el caudal de oferta (Qoferta) para concluir sobre la viabilidad del proyecto en este aspecto (Figura 7-13).

Figura 7-13. Caudal de flujo continuo, distribución y oferta



Fuente: Elaboración propia, 2013.

La Tabla 7-22 presenta los datos de Q_{fc}, JR, Q_d y Q_{oferta} y además el volumen demandado mes a mes (VD), el volumen suministrado por el Q_{oferta} en la JR (V_{JR}) y finalmente el volumen de almacenamiento neto requerido para un día (V_{ALM}).

Tabla 7-22. Caudal de distribución, volumen demandado y requerimiento de almacenamiento

Variable	UNIDAD	MESES											
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Q _{fc}	lt/sg	7.59	4.19	8.17	6.89	0.38	0.00	2.12	0.48	0.00	0.40	7.09	7.13
Q _{oferta}	lt/sg	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0
JR	h	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Q _d	lt/sg	22.78	12.56	24.50	20.68	1.13	0.00	6.35	1.45	0.00	1.21	21.28	21.38
VD	m ³ /mes	20,338	10,128	21,874	17,863	1,007	0	5,667	1,297	0	1,082	18,388	19,092
V _{JR}	m ³ /mes	16,963	15,322	16,963	16,416	16,963	16,416	16,963	16,963	16,416	16,963	16,416	16,963
V _{ALM}	m ³ /día	109	-185	158	48	-515	-547	-364	-505	-547	-512	66	69

Fuente: Elaboración propia, 2013.

En función de los valores estimados en la Tabla 7-22 y el análisis de la Figura 7-13 permitió concluir lo siguiente:

- El proyecto tiene tres periodos marcados de demanda de agua para riego: Enero-Abril, Julio, Noviembre-Diciembre
- El mes crítico de demanda es Marzo (Q_{fc}=8.17 lt/seg, Q_d=24.5 lt/seg)
- El caudal de oferta es constante en el tiempo: Q_{oferta}: 19 lt/seg
- El proyecto es viable ya que Q_{oferta}>Q_{fc} durante todo el año
- El proyecto debe contar con una infraestructura mínima de almacenamiento para una correcta operación ya que Q_{oferta}<Q_d en enero, marzo, abril, noviembre y diciembre
- El almacenamiento neto mínimo diario para el mes crítico (marzo) debe ser de 158 m³.
- La red de conducción y distribución debe ser simulada con el caudal de distribución crítico, es decir, 24.5 lt/seg.

7.4.1.2. Diseño predial tipo

El sistema agroforestal tendrá siempre dos cultivos de manera simultánea; aguacate y papa entre marzo y octubre y aguacate y papa entre noviembre y febrero. El caso crítico se presenta en el mes de marzo cuando se tiene maíz y aguacate.

Para realizar el diseño predial tipo, primero se realizó el diseño agronómico mediante los cálculos y después el diseño hidráulico, utilizando para los cálculos las ecuaciones indicadas en los numerales 0 y 0 de la metodología.

– **Diseño agronómico**

El diseño agronómico se realizó en función de los dos cultivos del caso crítico (maíz y aguacate), los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2-1 Tabla 7-23.

Los datos de entrada a la secuencia de cálculos fueron los siguientes:

- $E_{To} = 3.89$ mm/día
- K_c aguacate= 0.85
- K_c maíz= 0.7
- Factor de agotamiento (f): 50%
- $CC = 30.7\%$
- $PMP = 21.6\%$
- $D_a = 0.9$ gr/cm³
- Profundidad efectiva de raíces= 300 mm
- $E_a = 60\%$
- DEL máxima= $0.7 \times DH$ (diámetro húmedo de aspersor)
- DEA máxima= $0.6 \times DH$ (diámetro húmedo de aspersor)
- Aspersor: 4023 Boquilla 13 PAVCO
- Diámetro húmedo del aspersor (DH)= 30.2 m
- Caudal del aspersor (Q_{asp})= 0.4 lt/seg
- Presión de trabajo del aspersor (H_{asp})= 20.3 m.c.a.
- Jornada de riego (JR)= 8 horas
- Periodo de riego (PR)= Frecuencia de Riego (FR)
- Área cultivo (A_c)= 0.44 ha para maíz y 0.24 ha para aguacate

Tabla 7-23. Resultados diseño agronómico predial

PARÁMETRO			MAÍZ			AGUACATE		
1	Lámina de agua rápidamente aprovechable	LARA	12.29	mm		14.74	mm	
2	Frecuencia de riego	FR	4.51	días	4	4.46	días	4
3	Lámina de agua rápidamente aprovechable ajustada	LARA ajust	10.89	mm		13.23	mm	
	Eficiencia de aplicación	E_a	0.6			0.6		
4	Lámina bruta de riego	LB	18.15	mm		22.05	mm	
	Separación entre laterales de riego	DEL máxima	21.14	m	18	21.14	m	18
	Separación entre aspersores en la laterales	DEA máxima	18.12	m	15	18.12	m	15
5	Área de influencia de un aspersor	A asp	270	m ²		270	m ²	
6	Intensidad del aspersor	I_{asp}	5.33	mm/h		5.33	mm/h	
7	Tiempo de riego por posición	T_{pp}	3.40	h		4.13	h	
8	Turnos de riego por día.	T_d	2.35		2	1.93		2
9	Número total de turnos	N_{tt}	8			10		
10	Área regada en un turno	A_t	550	m ²		240	m ²	
11	Número de aspersores simultáneos	N_{asp}	2.03		2	0.88		1
12	Caudal de turno	Q_t	0.8	l/s		0.4	l/s	

Fuente: Elaboración propia, 2013.

En la Tabla 7-23 puede observarse que la frecuencia de riego en los dos casos es de 4 días, se distanciarán los aspersores a 18 x 15 m, se realizarán 2 turnos por día (8 turnos en el periodo de riego) y que se usarán dos aspersores de manera simultánea para el cultivo de maíz y uno para el cultivo de aguacate. El caudal total es de 1.2 lt/seg.

– **Diseño hidráulico predial**

Para el diseño predial se tuvo en cuenta el caso crítico, es decir el cultivo de maíz o papa (por ser de mayor área); de esta manera se asumieron los siguientes datos de entrada:

- Presión requerida por el aspersor (Hasp): 20.3 m.c.a.
- Caudal del aspersor: 0.4 lt/seg
- Aspersores simultáneos: 2
- Altura del elevador (Helev): 2 m (caso maíz)
- Método de cálculo de pérdidas por fricción: Hazen Williams
- Coeficiente de rugosidad de Hazen Williams: 145 (PVC)
- Longitud conducción Principal: 12 m
- Longitud Tubería secundaria (alimentada por un extremo): 66.5 m
- Longitud Tubería lateral: 66.5 m
- Perdidas permisibles en lateral: $0.2H_{asp}$
- Pérdidas permisibles en Secundaria y Principal: $0.15H_{asp}$
- Velocidad en tuberías: 0.5 a 1.5 m/s

De acuerdo a lo mostrado en la Tabla 7-24 la presión requerida a la entrada del predio para el caso crítico es CDT=25.6 m.c.a.

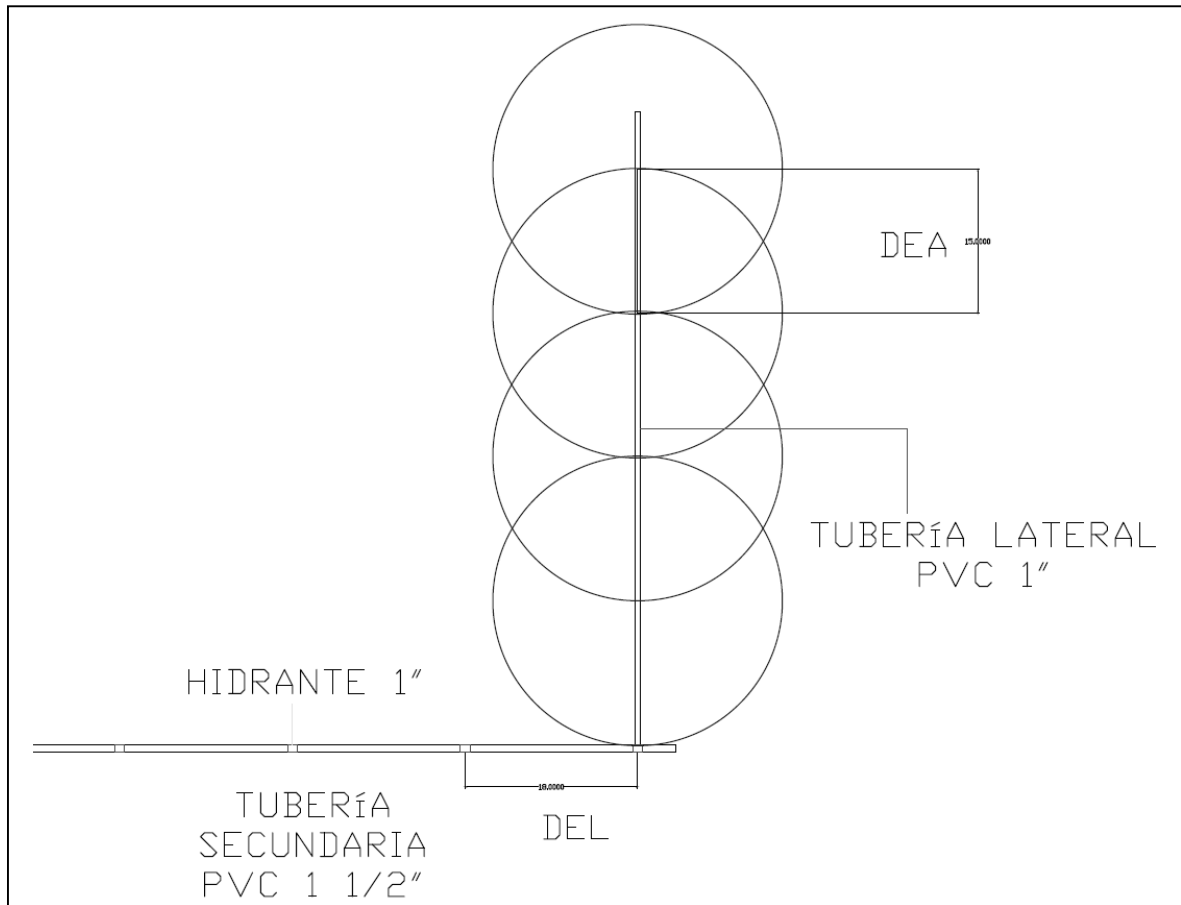
Tabla 7-24. Resultados diseño hidráulico predial

PARÁMETRO	UNIDAD	LATERAL	SECUNDARIA	PRINCIPAL
Longitud	m	66.5	66.5	12
Caudal	m ³ /seg	0.0008	0.0008	0.0008
Diámetro mínimo	mm	28.9	30.6	21.5
Diámetro comercial	mm	38.8	38.8	38.8
H _f	m.c.a.	0.96	0.96	0.17
Velocidad de flujo	m/seg	0.68	0.68	0.68

Fuente: Elaboración propia, 2013.

En la Figura 7-14 se visualiza el esquema de riego predial, los planos se presentan en el Anexo 8.

Figura 7-14. Esquema de riego predial



Fuente: Elaboración propia, 2013

7.4.1.3. Diseño hidráulico de la red de conducción y distribución

El cálculo de la red de conducción y distribución se realizó mediante la ayuda del software EPANET. A continuación se presentan los criterios de diseño, los datos de entrada y los datos de salida de la simulación.

Los criterios de diseño tenidos en cuenta fueron los siguientes:

- Presiones manométricas positivas (>0) en todos los nodos
- Velocidad de flujo en las tuberías entre 0.5 y 2 m/s
- Presión en nodos con demanda mayor a 15 m.c.a. (el requerimiento de presión es de 25.7 m.c.a, pero la pendiente promedio de los predios es de 16% lo que en una longitud de 67 m significa un desnivel a favor de 10.6 m)
- Método de distribución: Continua (todos los predios reciben el caudal de distribución de manera simultánea)

- RDE de tuberías: De acuerdo a la presión estática y a la siguiente Tabla:

Tabla 7-25. Presión de trabajo de tuberías según RDE

RDE	PRESIÓN DE TRABAJO	
	m.c.a.	psi
21	140.6	200
26	112	160
32.5	87.5	125
41	70.3	100
51	56.2	80

Los datos de entrada considerados fueron:

- Cotas nodos: levantamiento topográfico
- Longitudes de tramos: levantamiento topográfico
- Demanda predial: El caudal predial se asignó de acuerdo a las áreas de los predios, al balance hídrico, teniendo en cuenta la jornada de riego y el modelo de distribución seleccionado para la red. En Tabla 7-26 la se presentan los caudales asignados a los nodos con demanda.
- Coeficiente de rugosidad: 145 (PVC)
- Cota del nivel del agua en la fuente: 2339 m.s.n.m. (levantamiento topográfico)
- Diámetro de tuberías: a variar de acuerdo a criterios de diseño.

Tabla 7-26. Caudales prediales y caudal de la red

TIPO DE PREDIO	MAIZ O PAPA				AGUACATE				QD PREDIAL	CANTIDAD DE PREDIOS	Q tipo de predios
	AREA	MÓDULO	Qfc 1	QD 1	ARE A	MODULO	Qfc 1	QD 1			
	ha	l/seg-ha	l/seg	l/seg	ha	l/seg-ha	l/seg	l/seg			l/seg
P1	0.15	0.57	0.086	0.257	0.08	0.66	0.053	0.158	0.415	25	10.37
P2	0.29	0.57	0.165	0.496	0.16	0.66	0.106	0.317	0.813	13	10.57
P3	0.44	0.57	0.251	0.752	0.24	0.66	0.158	0.475	1.228	3	3.68
CAUDAL DE DISTRIBUCIÓN DE LA RED (l/seg)											24.62

Fuente: Elaboración propia, 2013.

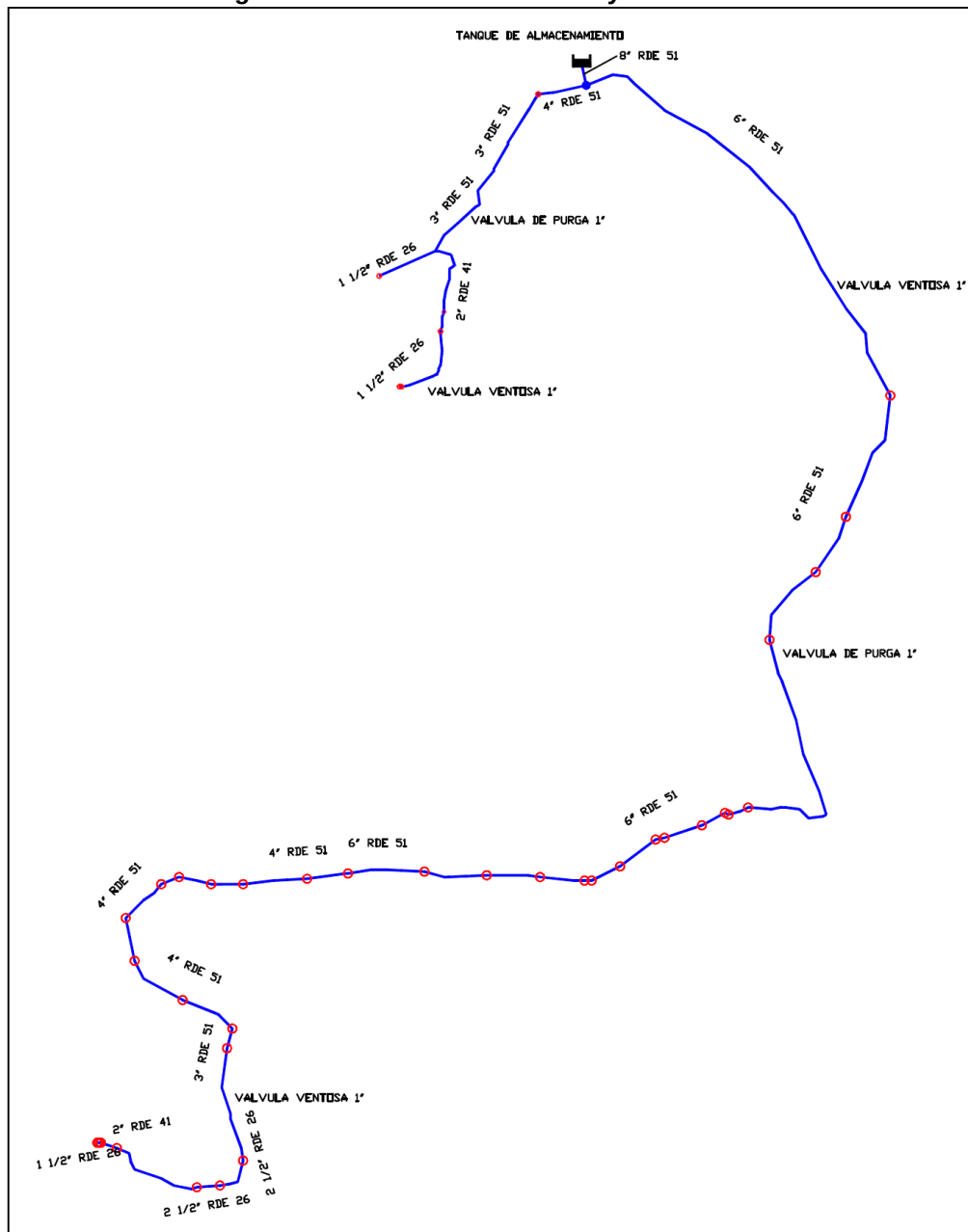
Una vez ingresados los datos y teniendo en cuenta los criterios de diseño, se realizaron iteraciones con distintos valores de diámetro interno, se encontraron las longitudes, diámetros, caudales y velocidades de tuberías (Tabla 11-1). En la Tabla 11-2 se muestran las cotas, caudales de demanda y presiones disponibles en los nodos.

De acuerdo a los resultados obtenidos (Tabla 11-1 y Tabla 11-2) se considera para el sistema de riego lo siguiente:

- El requerimiento de presión de trabajo se satisface con tuberías de RDE 51 porque todos los nodos tienen presiones estáticas menores a 56 m.c.a. Se usaron las siguientes tuberías: 8" RDE 51, 6" RDE 51, 4" RDE 51, 3" RDE 51, 2 1/2" RDE 26, 2" RDE 41 y 1 1/2" RDE 26.
- Todos los tramos de la conducción presentan velocidades en el rango admisible (0.5 - 2.0 m/s), específicamente en entre 0.52 y 1.43 m/s.
- La presión disponible (manométrica) en todos los nodos es positiva (>0), cumpliendo el criterio de diseño.
- 22 nodos con demanda (punto de entrega de predios) presentan valores de presión disponible (manométrica) superior a 25 m.c.a. Estos predios reciben la presión requerida desde el punto de entrega.
- 12 nodos con demanda (punto de entrega de predios) presentan valores de presión disponible (manométrica) entre 15 y 25 m.c.a. Estos predios reciben valores menores a 25 m.c.a, pero con el desnivel a favor en el predio (pendiente del 16% en 66 m de longitud) logran el valor requerido para el punto crítico.
- 7 nodos con demanda (punto de entrega de predios) presentan valores de presión disponible (manométrica) menor a 15 m.c.a. En estos predios se hace necesario el uso de micro aspersores, ya que en las condiciones de presión obtenidas no funcionarán de manera óptima.
- De los 22 predios que presentan presiones manométricas superiores a 25 m.c.a., 11 presentan presiones superiores a 30 m.c.a. Para estos predios se hace necesaria la instalación de una válvula de quiebre de presión en la acometida predial, con la intención de uniformizar la presión de entrega en los predios y mejorar el funcionamiento del sistema.
- Se requieren válvulas ventosas para expulsión de aire del sistema. Se recomienda instalar una ventosa cada 500 m, intentando ubicarlas en los puntos altos de la conducción.
- Se requieren válvulas de purga para expulsión de sedimentos. Se recomienda ubicarlas solo en los sitios bajos de la ruta de conducción.

En la Figura 7-15 se visualiza la red de conducción y distribución del sistema, los planos se presentan en el Anexo 8.

Figura 7-15. Red de conducción y distribución



Fuente: Elaboración propia, 2013.

7.4.2. Propuesta organizacional para la administración, operación y mantenimiento del sistema de integral

La gestión comunitaria del agua es un actividad de la comunidad que abarca la socio territorialidad, la relación en los ciclos de producción agrícola, la participación amplia de

los comunitarios, una estructura de equidad entre sus miembros y una gran flexibilidad en la aplicabilidad de reglas y normas relacionadas con la circunstancialidad de la gestión comunitaria (Gerbrandy y Hoogendam, 1998).

Para la gestión de los sistemas de riego es necesario una coordinación y organización de los usuarios o participantes (Gerbrandy y Hoogendam, 1998), mediante una autoridad constitutiva para lograr la sostenibilidad de los sistemas de riego y drenaje (Hunt, 1988).

En concordancia con lo expuesto por Apollin y Eberhart (1998) sobre la importancia de considerar el riego como una construcción social, la presente propuesta ha sido consensuada y validada por los actores implicados.

Para el caso del sistema integral, la administración del agua como recurso común, deberá guiar y delimitar las acciones colectivas e individuales para su uso y aprovechamiento. Para ello se propone un modelo asociativo cuyo ámbito territorial abarcará parte de la microcuenca del río Palatzá³, teniendo como fines el cumplimiento de acciones para la operación y mantenimiento del sistema.

7.4.2.1. Estructura de la organización

Considerando la cultura organizativa de los actores, número de integrantes, crecimiento organizacional y requerimiento de asesoría de especialistas se promoverá una **estructura organizacional lineal-asesoría** (Blank, L., 2002).

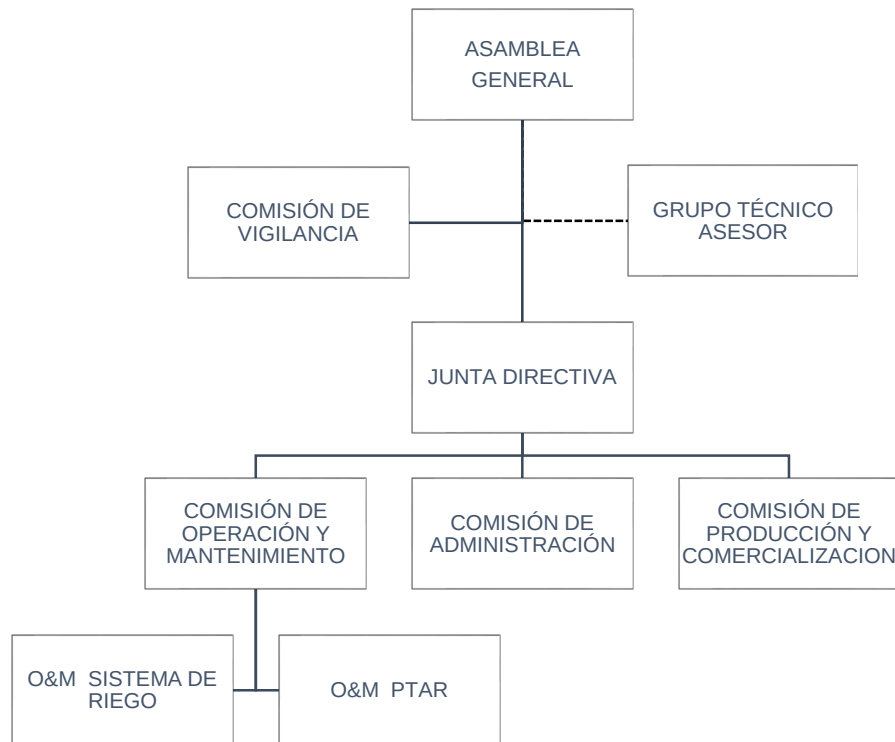
La estructura organizativa propuesta para la administración, operación y mantenimiento del sistema integral se basa en lo expuesto por Arango (1998), Urrutia (2009), Navarro (2010), Hunt (1988) y Gerbrandy y Hoogendam (1998)

Se establece el nivel de responsabilidad más alto a cargo de la Asamblea General, que es la autoridad máxima en la toma de decisiones, la cual rige a la Junta Directiva.

Para poder lograr la realización de actividades, se propone la organización de comisiones quienes están sujetas a las indicaciones de la junta directiva. También la existencia de una de vigilancia y un grupo técnico asesor, la representación gráfica de esta estructura organizativa se muestra en la Figura 7-16.

Figura 7-16. Estructura organizativa propuesta para la administración, operación y mantenimiento del sistema integral

³ El país está organizado a nivel administrativo-político por departamentos, municipios y aldeas; pero en el territorio de San Marcos, se está impulsando la planificación y ejecución de proyectos a nivel de cuenca y microcuenca. La microcuenca Palatzá se ubica en la cuenca del Río Naranjo.



Fuente: Elaboración propia con base en Blank (2002), Navarro (2010) y Urrutia (2009).

El grupo Técnico Asesor, se propone debido a la presencia institucional en el área del proyecto y el interés que evidencia en participar; estará compuesto por aquellas instituciones privadas y gubernamentales que tienen accionar en el territorio.

7.4.2.2. Funciones de la estructura organizativa propuesta

a. Asamblea General

Es la autoridad máxima de la administración del sistema integrado, la cual es dirigida por el Presidente de la Junta Directiva y está integrada por todos los usuarios con capacidad para emitir voto; correspondiéndole la toma de decisiones de mayor relevancia para el funcionamiento óptimo del sistema.

En la asamblea, los usuarios del sistema integral recibirán los informes de la Junta Directiva y de las comisiones de trabajo. Se utilizará el criterio de mitad más uno para su realización en sesiones programadas o sesiones extraordinarias según se presenten los casos.

b. Comisión de vigilancia

La comisión de vigilancia, tiene como fin auditar y controlar los procesos en el sistema integral, las funciones principales son:

- Fiscalizar y controlar mensualmente el manejo de los recursos económicos, para la producción.
- Controlar el estado de la infraestructura del sistema de integral (riego y PTAR).
- Controlar la distribución del agua de acuerdo a la planificación.
- Definir los mecanismos de negociación y resolución de conflictos.
- Vigilar la calidad de los productos generados.

c. Grupo Técnico Asesor

Es el encargado de asesorar y capacitar a los miembros de la junta directiva, comisiones y usuarios del sistema integrado. Siendo sus funciones las siguientes:

- Planificar el accionar estratégicamente a corto, mediano y largo plazo conjuntamente con la Junta Directiva.
- Promover el cumplimiento de la normatividad guatemalteca.
- Organizar capacitaciones para los usuarios del sistema de riego.
- Procurar que en el proyecto los productos mejoren en cantidad y calidad, prestando para el efecto toda la asesoría que fuere necesaria.

d. Junta Directiva

Será constituida en asamblea general en forma abierta resultando electas las personas que tengan mayoría de votos, la cual estará integrada por un presidente, un vicepresidente, un secretario, un tesorero y vocales; por un periodo de 2 años. La junta directiva tendrá reuniones a cada 60 días siendo sus funciones las siguientes:

- Representar a la administración del sistema integral en todo lo que concierne al desarrollo de la misma.
- Informar mensualmente a los usuarios del sistema integrado de las decisiones tomadas.
- Vigilar por el cuidado y buen uso de todos aquellos bienes que contribuyan a la administración del sistema de integrado
- Asistir a las capacitaciones programadas por el grupo técnico asesor.
- Hacer cumplir los reglamentos.

- Convocar a asamblea general anual ordinaria y extraordinaria.
- Nombrar a los miembros de las comisiones de operación y mantenimiento, administración, producción, comercialización, entre otras.
- Gestionar financiamiento para la ejecución de proyectos mensuales y anuales.
- Elaborar planes de trabajo e informes financieros de la administración del sistema integrado a la asamblea general para su discusión y aprobación.
- Supervisar mensualmente el trabajo de las diferentes comisiones de la administración del sistema integrado

Tabla 7-27. Funciones principales de los cargos en la Junta Directiva

Cargo	Funciones
Presidente(a)	– Convocar y presidir las reuniones de la asamblea general anual y de junta directiva quincenalmente. – Representar a la junta directiva y a los usuarios de la administración del sistema de integrado, ante cualquier institución para gestión, trámite o acto público. – Asistir a reuniones con instituciones y autoridades. – Realizar la agenda de trabajo con los demás miembros de la junta directiva acerca de los puntos a tratar en cada reunión. – Supervisar y coordinar las tareas encomendadas a los demás miembros de la junta directiva. – Firmar documentos legales que se redacten, junto con el secretario y tesorero. – Buscar conjuntamente con los miembros de la junta directiva la solución a los obstáculos que se presenten en el desarrollo de las actividades. – Hacer que se cumpla dentro de la administración del sistema de integrado el reglamento interno la normatividad y acuerdos de la junta directiva. – Resguardar conjuntamente con el secretario todos los documentos importantes de la administración de sistema de riego.
Vicepresidente(a)	– Colaborar con las funciones del presidente. – Apoyar con la agenda y desarrollo de las reuniones. – Facilitar en la discusión de temas y/o actividades. – Asumir las funciones del presidente en su ausencia. – Asesorar a las comisiones que se nombren o formen. – Facilitar los procesos de cómo, cuándo y dónde hacer las diferentes actividades.
Secretario(a)	– Preparar con el presidente la agenda a tratar en cada reunión. – Redactar actas, notas, solicitudes y demás documentos que se requieran en las distintas actividades. – Firmar documentos legales que se redacten, conjuntamente con el presidente. – Notificar sobre resoluciones de cada reunión de la junta directiva a los usuarios de la administración de sistema de riego. – Llevar un registro y control del padrón de usuarios. – Apoyar en la elaboración del plan de operación y mantenimiento.
Tesorero(a)	– Ser el encargado del control económico y financiero de la administración de sistema de integrado. – Recibir, manejar y custodiar los fondos y bienes de la administración de sistema de riego responsabilizándose solidariamente con el presidente y el secretario. – Velar por la adecuada utilización de los fondos, realizando compras cuando sea necesario. – Preparar el balance y presupuesto anual de la administración del sistema de riego para ser aprobados por la asamblea general. – Presidir la comisión de administración.
Vocales	– Sustituir a los miembros de la junta directiva en ausencia de uno de sus integrantes, de la siguiente manera: El vocal I al vicepresidente, el vocal II al secretario y vocal III al tesorero. – Tener voz y voto en la toma de decisiones de la junta directiva. – Realizar trabajos especiales como: Organizar, coordinar, dirigir a las comisiones de trabajo. – Asistir a todas las reuniones de la junta directiva.

Fuente: Compilación con base en Navarro (2010), Arango (1998) y Urrutia (2009)

Las principales funciones de los cargos en la Junta Directiva se describen en la Tabla 7-27, se toman en cuenta las condiciones sociales, económicas, formativas y participativas de la población objetivo.

e. Comisión de Operación y Mantenimiento

La comisión de operación y mantenimiento tendrá a su cargo velar por la correcta operación y mantenimiento del sistema de riego así como la operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales. Deberá monitorear la calidad microbiológica y fisicoquímica del agua conjuntamente con personal técnico del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.

Esta comisión contará con el encargado de operación y mantenimiento del sistema de riego y por el encargado de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. Se detalla Tabla 7-28 las funciones principales.

Tabla 7-28. Funciones de los encargados de operación y mantenimiento del sistema integral

Cargo	Funciones
Encargado de operación y mantenimiento del sistema de riego	– Velar por la conservación y rehabilitación de la microcuenca del río Palatzá. – Revisar todas las obras de la infraestructura de riego (captación, conducción, distribución e infraestructura predial). – Revisar los equipos de aplicación y la revisión del uso del riego a nivel predial. – Verificar el control de malezas, junto a las estructuras de concreto y accesorios del sistema. – Extracción de sedimentos en las bocatomas laterales, desarenadores y cámaras. – Reparación y remplazo de tuberías y accesorios. – Reparación de concretos de canales, tanques y otros componentes del sistema de riego que lo requieran. – Organizar y controlar la distribución de agua del sistema de riego. – Reportar daños ocasionados a la infraestructura y el mal uso por parte de los usuarios. – Asesorar a los usuarios en cuanto al mantenimiento del sistema de riego. – Realizar y actualizar periódicamente el plan de mantenimiento preventivo y correctivo del sistema.
Encargado de la operación y mantenimiento de la planta de aguas residuales	– Velar por el buen funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales. – Revisar todas las obras de infraestructura de la planta de tratamiento de aguas residuales (canal de rejas, desarenador, sedimentador, patio de secados de lodos y otros) – Mantenimiento de flujo constante (entrada y salida) y nivel del agua. – Manejo y cosecha de vegetación – Mantenimiento de diques y otras estructuras – Llevar el control de visitas y mantenimiento de las obras de infraestructura

Fuente: Compilación con base en Arango (1998); Urrutia (2009) y Apollin y Eberhart (1998)

f. Comisión de administración

La comisión de administración, tendrá como responsabilidad el buen funcionamiento y correcta administración del sistema de integrado, estará presidida por el tesorero de la Junta Directiva, las funciones de la comisión son:

- Recolectar y administrar los fondos obtenidos por las cuotas del
- Velar por la correcta inversión de fondos del sistema integrado

- Elaborar dictámenes mensuales para la aprobación del ingreso de nuevos usuarios.
- Elaborar informe sobre el desarrollo de sus funciones y de las actividades cumplidas dentro de la administración del sistema integrado.
- Vigilar que los usuarios del sistema cumplan con sus obligaciones y no violen los reglamentos.

g. Comisión de producción y comercialización

Es la encargada de establecer y examinar procedimientos para lograr la producción y comercialización de los productos generados en el sistema integrado, reuniéndose por lo menos una vez al mes. La comisión de comercialización tiene las funciones siguientes:

- Monitorear la calidad microbiológica de la producción agrícola conjuntamente con el responsable o delegado del Ministerio de Salud y Asistencia Social.
- Presentar los planes operativos anuales a la junta directiva para su aprobación.
- Controlar los recursos económicos que ingresan por producción, así como aprobar y controlar los gastos por insumos y otros.
- Administrar todos los recursos materiales y económicos, debiendo rendir informes mensuales a la junta directiva.
- Monitorear las necesidades de la administración de sistema de riego e impulsar la producción de nuevos productos
- Evaluar las formas de comercialización de los productos así como determinar precio, calidad, condiciones y fecha de venta.
- Presentar a la junta directiva la normativa para lograr la comercialización de los productos.
- Establecer conjuntamente con los clientes las normas de comercialización de los productos, promoviendo acuerdos y convenios para lograr canales de comercialización eficientes y continuos.
- Coordinar con la junta directiva y comisiones las actividades mensuales para incentivar y aumentar la producción.
- Coordinar mensualmente con la comisión de producción los volúmenes y convenios de comercialización de los productos.
- Impulsar nuevos mercados para la comercialización de los productos generados.

7.4.2.3. Institucionalidad de la organización

– Forma de Organización

La elección de la Junta Directiva se realizará de forma democrática prevaleciendo lo colectivo a lo individual. Se constituirá legalmente bajo la forma de **Junta Directiva de los Usuarios** mediante acta notarial y deberá ser legítimamente reconocido por la autoridad competente.

Los integrantes del comité elegirán a sus dirigentes quienes deberán ser usuarios legítimos en pleno uso de sus capacidades civiles.

– Documentación de la organización

La organización deberá contar con Acta constitutiva, Libro de actas (legalmente autorizado) cuya responsabilidad es del secretario/a, Libro de caja (legalmente autorizado) cuya responsabilidad es del tesorero/a y registro de usuarios

– Normatividad

La organización de regantes tendrá como marco normativo los siguientes documentos:

- a. **Estatutos de la organización:** Contienen la definición de los deberes y derechos de los usuarios y los procedimientos administrativos que deben seguirse para resolver todas las situaciones referentes a la Junta Directiva.
- b. **Reglamento Interno:** Constituye la guía de actuación del usuario en su relación con los demás usuarios, con los órganos de dirección de la Junta Directiva, en el uso y aprovechamiento del sistema integrado
- c. **Reglamento de mantenimiento:** Es el conjunto de reglas en las que se detallan los procedimientos para el mantenimiento del sistema. Además de contener los aspectos técnicos del mantenimiento, se definen las responsabilidades de los usuarios en cuanto al uso y cuidado de la infraestructura y las sanciones en caso de incumplimiento.
- d. **Régimen de cuotas:** La Junta Directiva en consenso aprobará el régimen de cuotas ordinarias y en determinados casos de cuotas extraordinarias, mismo que tendrá una vigencia de 2 años. De igual manera el comité definirá la forma y plazo de pago. Las cuotas deberán estar en concordancia con el presupuesto anual de operación y mantenimiento.

- **Herramientas administrativas**

La organización de regantes contemplará como herramientas administrativas los siguientes documentos:

- a. **Planos del área de cobertura del sistema:** Debe contar con la ubicación exacta de las áreas de riego para un mejor control de la operación.
- b. **Registro de usuarios:** Es el registro oficial de usuarios del sistema y así como el detalle de los fines específicos de uso de riego de cada uno. En él se incluyen los datos del usuario, la ubicación del terreno y el área de riego. Tiene una vigencia de 2 años. La actualización de datos es personal, y la asignación de derechos es intransferible.
- c. **Inventario de infraestructura y equipo:** Se utiliza para tener pleno conocimiento de las estructuras y equipamiento del sistema así como para un adecuado control de los mismos. Está a cargo del tesorero con la colaboración de los encargados de operación y mantenimiento.
- d. **Plan de operación:** En él se integran todas las actividades necesarias para el funcionamiento de la planta de tratamiento y del sistema de riego. Consiste en las labores para cada usuario, por períodos de tiempo, así como la asignación de insumos.
- e. **Bitácora de operaciones:** En la que se llevará un registro ordenado de cada una las actividades que permitan la sistematización del funcionamiento del sistema.
- f. **Programa anual de mantenimiento:** Como cualquier infraestructura física, el sistema de riego y planta de tratamiento de aguas residuales está expuesto al deterioro o a los daños provocados por diferentes situaciones, por lo tanto los usuarios deben estar dispuestos a participar en las tareas de mantenimiento preventivo, limpieza, vigilancia o reparación del sistema. Para ello se estructura un programa de mantenimiento en el que se detalla el cronograma de actividades de mantenimiento del sistema durante el año. Debe especificar el costo de cada actividad, los recursos necesarios y el responsable de su ejecución.
- g. **Presupuesto anual:** Consiste en la integración de los costos en los que se incurrirá para el funcionamiento de la planta de tratamiento y el sistema de riego, para ello la junta directiva deberá contar con asistencia técnica para la estimación de los costos.

- h. **Calendarización de reuniones y asambleas:** Cuya adecuada programación y comunicación permita a todos los integrantes del comité participar activa y efectivamente en todas las actividades.

7.4.3. Propuesta de operación, mantenimiento y administración del sistema

- Operación y Mantenimiento

La operación y mantenimiento del sistema integral estará a cargo de la Comisión de Operación y Mantenimiento bajo la coordinación estrecha de todas las comisiones y de acuerdo a las disposiciones de la Asamblea y Junta Directiva indicadas en el numeral 7.4.2.

Aunque la entidad municipal contará con personal para la operación y mantenimiento de la PTAR y de la unidad del tratamiento complementario, se propone considerar un encargado de apoyo para la operación y mantenimiento de dicha infraestructura, de tal manera que se asegure la calidad del tratamiento.

Para el sistema de riego se contará con un fontanero, el cual tendrá bajo su responsabilidad lo indicado en la Tabla 7-28. El fontanero estará en servicio durante la jornada de riego y en las acciones de mantenimiento preventivo y correctivo del sistema planificadas.

Considerando el contexto comunitario, se propone que las actividades de mantenimiento preventivo y correctivo sean realizadas por cuadrillas (5 ó 10 personas por mes) de los usuarios del riego organizadas mensualmente, lideradas en todo momento por el fontanero y la comisión de operación y mantenimiento.

- Administración del sistema

La administración de los recursos del sistema estará a cargo de la Comisión de administración bajo la coordinación estrecha de todas las comisiones y de acuerdo a las disposiciones de la Asamblea y Junta Directiva indicadas en el numeral 7.4.2.

Los fondos para sufragar los costos de recursos humanos, materiales y herramientas, derivados de la operación, mantenimiento y administración del sistema provendrán de una cuota o tarifa mensual por consumo de agua. Dicha tarifa se cancelará en función del área a cultivar, tomando como referencia la parcela tipo de 0.23 hectáreas.

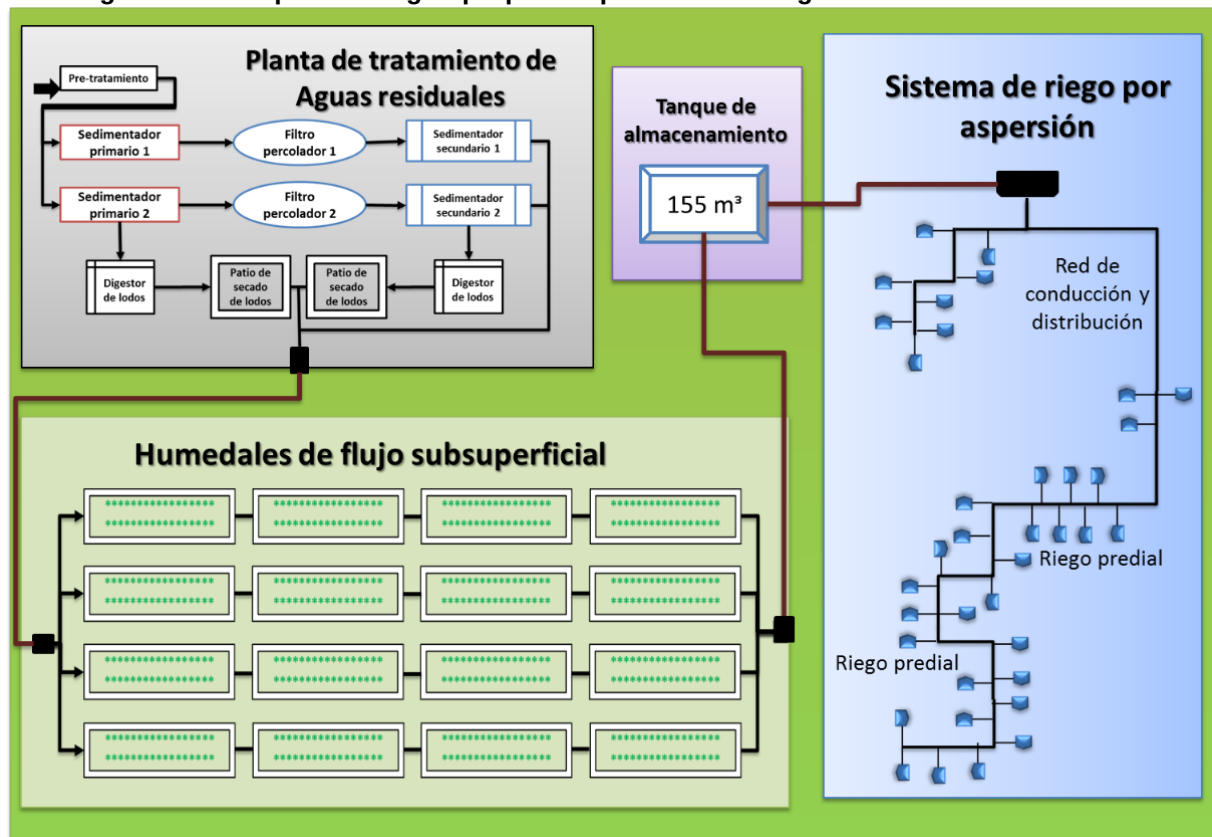
La tarifa mensual será calculada en función de los costos necesarios para el óptimo funcionamiento del sistema, los cuales deben actualizarse anualmente. Además debe

considerase del 1 al 5% anual⁴ para reposición o mejora de los componentes del sistema integral. En el apartado 7.5.5 se estiman los costos y tarifa a pagar por los usuarios.

7.5. Esquema integral de tratamiento y reuso del agua residual en zonas de ladera del municipio de San Marcos

La propuesta tiene como objetivo principal la implementación de un sistema agroforestal mediante el uso de agua residual tratada, en la zona periurbana del municipio de San Marcos, Guatemala. En la Figura 7-17 se presenta el esquema integral propuesto para reuso de agua residual en la zona peri-urbana de San Marcos.

Figura 7-17. Esquema integral propuesto para reuso de agua residual en San Marcos



Fuente: Elaboración propia, 2014.

Se propone la construcción de humedales de flujo subsuperficial (Anexo 2 al Anexo 5) para el tratamiento complementario del agua residual proveniente de la planta de

⁴ En ausencia de un normativo para sistemas de riego en Guatemala, se utilizó como referencia lo dispuesto por el Instituto de Fomento Municipal (INFOM-UNEPAR) para proyectos de agua potable.

tratamiento de aguas residuales del área urbana de San Marcos. Se construirán cuatro series en paralelo haciendo un total de 16 celdas en un área de 0.77 hectáreas.

Posteriormente, el efluente se conducirá un tanque de almacenamiento del agua residual con un volumen de 155 metros cúbicos (Anexo 9 y Anexo 10). A partir A partir del tanque se conducirá mediante Tubería PVC 8" RDE 51 para dos ramales de la red de distribución. El sistema de riego predial será mediante tubería PVC de 1 ½" RDE 26 (Anexo 8) para la irrigación de 13.5 hectáreas.

7.5.1. *Componente de gestión e implementación de la propuesta*

La gestión del proyecto propuesto contemplará cuatro fases fundamentales. La primera consiste en la construcción de la infraestructura de tratamiento complementario, la cual debe iniciarse posteriormente a la construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales propuesto por MANCUERNA (2008), considerando la estabilidad en la depuración de las aguas residuales y un monitoreo de la calidad fisicoquímica y microbiológica de al menos 6 meses. Esto permitirá hacer ajustes en el diseño o componentes adicionales para lograr la calidad esperada.

La segunda fase es la construcción de la infraestructura de riego, se propone realizar a los 8 meses posteriores al funcionamiento del humedal, efectuando un monitoreo de la calidad fisicoquímica y microbiológica en este periodo. Esto permitirá conocer la calidad del efluente y tomar las consideraciones pertinentes para el reuso, cultivos potenciales y riesgos a la salud. A partir de esta fase, se implementará el componente de fortalecimiento organizativo y fortalecimiento a las capacidades técnicas a los 41 agricultores para garantizar la sostenibilidad del proyecto.

La tercera fase lo constituye la implementación de los sistemas productivos (sistemas agroforestales) por parte de productores. Se buscará la gestión de recursos como proyecto ambiental, en el marco del financiamiento nacional e internacional para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico, donde se proveerá de insumos como capital semilla. En esta fase se tendrá contemplado y asegurado el mercado para los productos agrícolas.

La cuarta fase lo constituye la administración, operación y mantenimiento del sistema integral. Para ello, se requerirá la gestión de la Junta Directiva y Comisiones, según funciones propuestas en el apartado 7.4.2 y 7.4.3. En el Anexo 11 se detalla la planificación del tiempo para la implementación de la propuesta integral.

7.5.2. Componente productivo-agrícola

Se establecerá un sistema agroforestal de aproximadamente de 13.5 a 13.64 hectáreas, mediante la asociación de aguacate de variedad Hass y cultivo anual de maíz de marzo a noviembre y en los meses de noviembre a marzo (del siguiente año) cultivo de papa variedad Loman.

Se producirán 8.84 hectáreas de cultivo de maíz o papa (dependiendo del ciclo), y 4.80 hectáreas de aguacate distribuida en predios de 41 productores, de estos, 25 son propietarios de predios “Tipo 1” con un área de 0.23 hectáreas, 13 de predios “Tipo 2” con un área de 0.45 hectáreas y 3 productores poseen predios “Tipo 3” con un área de 0.68 hectáreas, como se muestra en la Tabla 7-29.

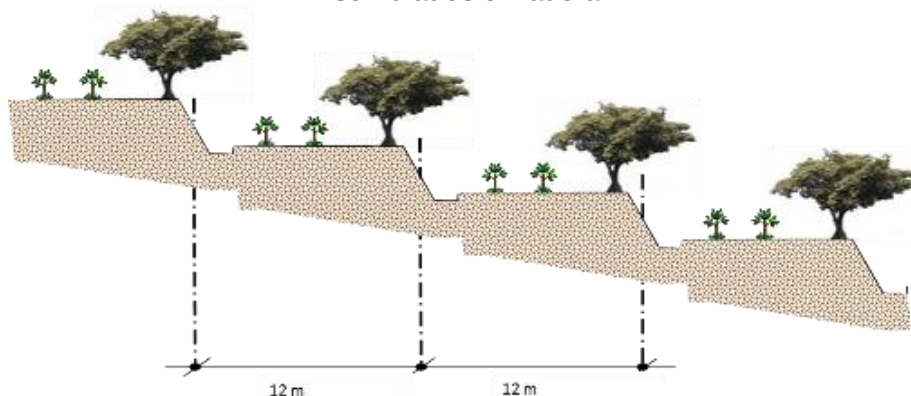
Tabla 7-29. Área por predio y total por cultivo a implementar en el sistema agroforestal

Definición predios tipo	Cantidad	Área por predio (hectáreas)			Área total por cultivo (hectáreas)	
		Maíz/Papa	Aguacate	Total	Maíz/Papa	Aguacate
Tipo 1	25	0.15	0.08	0.23	3.75	2.00
Tipo 2	13	0.29	0.16	0.45	3.77	2.08
Tipo 3	3	0.44	0.24	0.68	1.32	0.72
TOTAL					8.84	4.80

Fuente: Elaboración propia con base a información de campo (2013).

El sistema agroforestal consiste en la asociación de árboles intercalados en franjas con cultivos anuales, es denominado cultivo en callejones (Figura 7-18). Este tipo de sistemas tiene alto potencial en zonas de ladera, debido a que la siembra de árboles en hileras perpendiculares a la pendiente, contribuyen a disminuir la erosión (SAGARPA, 2000).

Figura 7-18. Corte transversal-longitudinal del perfil del terreno, del cultivo en callejones sembrados en ladera



Fuente: Elaboración propia, 2013.

En la Figura 7-19 se observa una parcela tipo para la implementación de sistema agroforestal, la cual cuenta con curvas a nivel y barras vivas con pasto. Este tipo de parcelas son las que se promoverán para la producción agrícola.

Figura 7-19. Fotografía de parcela tipo para implementación de sistemas agroforestales



Fuente: investigación de campo 2013.

Para el caso del cultivo de aguacate (*Persea americana*), la variedad HASS, presenta un gran potencial (Tabla 7-30), debido a que este árbol tiene características idóneas a la región; es resistente al frío, su época de floración normal está entre diciembre y marzo y su cosecha de noviembre a abril y de julio a septiembre, no necesita de variedades polinizadoras. En cuanto a la fertilización se recomienda 250 gr de un fertilizante rico en fosforo y 1000 g de un fertilizante rico en nitrógeno.

Tabla 7-30. Características principales del cultivo de aguacate variedad Hass

Periodo de flor a fruto		8 a 10 meses											
Altura de la copa		5 a 8 meses											
Distanciamiento		12 x 12 metros											
Densidad de siembra		138.9 plantas /Ha											
No.	Actividad	Año 1											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1	Preparación del terreno												
2	Trazo y estaquillado												
3	Elaboración de agujeros												
4	Establecimiento de plantación												
5	Mantenimiento de plantación												
6	Riego												
7	Fertilización	Se realiza cada año											
8	Podas	Dos podas a partir del segundo año											
9	Cosecha	A partir de los 3 años de la siembra											

Fuente: ANACAFE (2014).

Las plantaciones de aguacate inician su producción al tercer año de siembra y se estabiliza la misma a partir del séptimo a octavo año con rendimientos de 800 frutos en promedio por árbol o 20 toneladas métricas por hectárea (ANACAFÉ, 2004).

La selección de maíz (*Zea mays* L.), es debido a que constituye la dieta alimenticia básica de los habitantes de la zona y del país. Además tiene un alto valor cultural (Fuentes López et al., 2005). Se considera la variedad ICTA San Marceño Mejorado, esta, es recomendada para la zona de estudio por el Instituto de Ciencia y Tecnologías Agrícolas (ICTA, 2002), por su amplia adaptación agroecológica para las condiciones del Altiplano de Guatemala, además presenta excelente arquitectura de planta y porte bajo, buen potencial de rendimiento y características agronómicas deseables, tales como tolerancia al acame de tallo y de raíz que posibilita ser menos afectada por la incidencia de fuertes vientos, tolerancia a enfermedades foliares y de mazorca de buen tamaño. El distanciamiento será de un metro (1) entre surco y 0.80 metros por postura, colocando 4 granos por postura.

El maíz tiene exigencia de nutrientes como el nitrógeno, fosforo, potasio, magnesio y azufre. Se recomienda la aplicación de fertilizante 20-20-0 aplicando 250 a 300 Kg/hectárea al momento de la primer limpia. En la segunda limpia aplicar de 100 a 150 Kg/hectárea de Urea al 46%.

La cosecha se estima a los 237 días después de la siembra, con un rendimiento aproximado de 5.25 toneladas por hectárea. En la Tabla 7-31 se describen las principales características del cultivo de maíz.

Tabla 7-31. Características principales del cultivo de maíz

Días a floración	115
Días a cosecha (literatura)	210
Días a cosecha (campo)	237
Altura de planta	233 cm
Altura de mazorca	103 cm
Densidad de siembra	55,715 plantas /Ha
Área de cultivo	8.81 hectáreas

No.	Actividad	Meses											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1	Preparación del suelo												
2	Siembra												
3	Primera fertilización												
4	Primer aporque (limpia)												
5	Segunda fertilización												
6	Segundo aporque (jul)												
7	Eliminación de hojas bajas												
8	Despunte												
9	Cosecha												
10	Eliminación de rastrojo												

Fuente: ICTA (2003).

Otro de los cultivos potenciales considerados, es la papa (*Solanum tuberosum*), pues el departamento de San Marcos es el segundo principal productor de acuerdo con el IV Censo Nacional Agropecuario 2003. Se propone el cultivo de la variedad Loman, pues es la variedad que tiene mayor demanda en el mercado.

Es una planta de una altura de 0.6 a 0.7 metros, con tubérculo alargado y ovoide, con un distanciamiento de siembra recomendada de 0.75 a 1 metro entre surco y 0.25 a 0.30 metros entre planta. Tiene un ciclo de cultivo de 70 a 90 días, con un rendimiento de 15 a 20 toneladas métricas por hectárea. En la Tabla 7-32 se describen las principales características del cultivo de papa.

Tabla 7-32. Características principales del cultivo de papa

Color de la piel y pulpa	Crema
Peso específico	1.07 g/cc
Siembra	Noviembre
Área de cultivo	8.81 hectáreas

No.	Actividad	Año 1				Año 2	
		Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
1	Siembra y primera fertilización						
2	Remoción del suelo en las calles						
3	Segunda Fertilización						
4	Aporque o calza						
5	Defoliación o despunte						
6	Cosecha						

Fuente: MAGA-ICTA (1999).

7.5.3. Componente de fortalecimiento organizativo y a los productores

El componente de fortalecimiento organizativo y a los productores tiene como fin garantizar el fortalecimiento a las capacidades técnicas y la sostenibilidad del proyecto. Dicho componente estará a cargo del grupo Técnico Asesor conformado por las instituciones de apoyo.

Inicialmente deberá desarrollarse un plan de capacitación y acompañamiento a los 41 agricultores, a la Junta Directiva y a las Comisiones de trabajo. Los procesos de capacitación y acompañamiento propuestos como mínimo son:

- ✓ Legislación ambiental y de salud vigente en la república de Guatemala.
- ✓ Estructuras de conservación de suelos.
- ✓ Buenas prácticas agronómicas considerando el reuso del agua residual tratada.
- ✓ Manejo agronómico de los cultivos potenciales.
- ✓ Organización comunitaria.
- ✓ Visión asociativa y empresarial.
- ✓ Comercialización y mercadeo de productos agrícolas.

En el fortalecimiento organizativo, se buscará la apropiación por parte de los implicados de la correcta operación, mantenimiento y administración del sistema integrado. Además de establecer las coordinaciones con instituciones vinculadas con el sistema propuesto para establecer la cogestión del sistema durante los primeros años, para asegurar de esta forma la sostenibilidad del proyecto.

7.5.4. Costos de implementación de la propuesta

Los costos de la implementación de la propuesta son de USD 570,748.36, el humedal de flujo subsuperficial tendrá un costo de USD 355,924.39 y la infraestructura de riego USD 179,306.56. En Anexo 12 se presenta el desglose de inversión.

Tabla 7-33. Estimación de costos de inversión de la propuesta integral de reuso de agua residual en el área periurbana de San Marcos

No.	ELEMENTO	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO (USD)	TOTAL (USD)
1	Humedales de flujo subsuperficial				
1.1	Materiales para construcción de celdas	16	Celda	14,042.09	24,673.41
1.2	Mano de obra para la construcción de celdas	16	Celda	4,236.23	67,779.62
1.3	Terreno para la construcción	7,740.41	m ²	8.20	63,471.36
SUB-TOTAL HUMEDALES					355,924.39
2	Sistema de Riego				
	Materiales				
2.1	Tanque de almacenamiento	1	Global	21,913.15	21,913.15
2.2	Red de conducción y distribución	1	Global	87,612.41	87,612.41
2.3	Sistema predial	41	Predios	1,315.55	53,937.72
Sub-total					163,463.28
	Mano de obra				
2.4	Tanque de almacenamiento	1	Global	5,266.02	5,266.02
2.5	Red de conducción y distribución	1	Global	4,750.70	4,750.70
2.6	Sistema predial	1	Global	5,826.18	5,826.18
Sub-total					15,842.89
SUB-TOTAL SISTEMA DE RIEGO					179,306.17
3	Fortalecimiento organizativo y a los productores				
2.1	Fortalecimiento organizativo	1	Global	13,375.80	13,375.80
2.2	Fortalecimiento a las capacidades de los productores	1	Global	22,142.00	22,142.00
SUB-TOTAL COMPONENTE ORGANIZATIVO Y PRODUCTIVO					35,517.80
TOTAL					570,748.36

Fuente: Elaboración propia, 2013.

7.5.5. Costos de operación, mantenimiento y administración del sistema integral

Los costos⁵ de operación, mantenimiento y administración del sistema se estiman en función de las características del proyecto de riego y las actividades realizadas en los humedales. Tomando las siguientes consideraciones:

- 60 predios (tomando como unidad de referencia predios “Tipo 1”)
- Línea de conducción y distribución de aproximadamente 5 kilómetros
- Inversión inicial de USD 570,748.36
- Salario mínimo de USD 9.37 por día según Acuerdo Gubernativo No. 537-2013
- Viáticos de USD 12.50 según estimación para el área de intervención.

Los costos mensuales estimados para la operación, mantenimiento y administración del sistema son de USD 2,696.68. En la Tabla 7-34 se visualiza la estimación de los mismos.

Tabla 7-34. Costos de operación, mantenimiento y administración del sistema

No.	Descripción	Unidad	Cantidad	Total (USD)	Observación
<u>Operación</u>					
01	Salario del Operador	Días	16	149.92	Se considera el operador para el sistema de tratamiento complementario (6 días) y fontanero del sistema de riego (10 días). Los días de trabajo se estiman en función de las tomas prediales, longitud de la red de conducción y distribución
Sub-total				149.92	
<u>Mantenimiento</u>					
02	Mantenimiento del sistema		0.002	95.12	(20 por millar del costo del proyecto/12 meses).
03	Reserva por reposición y mejoramiento del sistema		0.05	2,378.12	05% anual con recuperación en 20 años
Sub-total				2,473.24	
<u>Administración</u>					
	Papelería	Unidad	1	7.50	(0.125 USD/conexión) estimado
	Administrador	Unidad	1	53.52	10% de USD 8.92 por servicio según información de campo
	Viáticos	Unidad	1	12.50	Estimado según información de campo
Sub-total				73.52	
TOTAL COSTOS				2,696.68	

Fuente: Elaboración propia, 2013.

⁵ La estimación de los costos de proyecto integral se realizó a partir de la adecuación de la metodología propuesta por el INFOM-UNEPAR, debido a la ausencia de metodologías para sistemas de riego en el país.

Lo estimado para reserva por reposición y mejoramiento del sistema elevan considerablemente el costo, aunque el 5% anual se considera lo óptimo para contar con recurso necesario para este fin.

De acuerdo al costo estimado para la operación, mantenimiento y administración del sistema, y el número predios, se calcula una tarifa mensual de USD 44.94 por usuario.

En función del valor económico del agua y las características socioeconómicas de la región, establecer una tarifa del valor estimado sería difícil implementarlo. Por tanto, lo recomendable es ajustar en 1% anual la reserva por reposición y mejoramiento del sistema para proponer una tarifa de USD 13.24, aunque esto suponga el riesgo de contar con la inversión necesaria para dicho fin. Aun realizando los ajustes, la implementación de la tarifa sería dificultosa, pues en la región las tarifas son inferiores a USD 5.00.

Por tanto entre algunas estrategias para reducir los costos mensuales y la tarifa por uso del agua residual están:

- Valoración económica de los jornales empleados para actividades de mantenimiento por parte de los usuarios del sistema.
- Consensuar con las autoridades municipales para que el operador municipal se haga cargo de la operación y mantenimiento del humedal construido.
- Propiciar mercados de calidad del producto para asegurar los mejores precios y por tanto mejores ganancias.

8. CONCLUSIONES

- En el contexto del municipio de San Marcos, se identificaron ocho (8) criterios relevantes a considerar para la selección de tecnología en plantas de tratamiento con métodos naturales. Si bien es cierto, existen metodologías y factores considerados en otros contextos, es valioso conocer la percepción y valoración de los actores gubernamentales, técnicos y usuarios, por las particularidades educativas y formativas en el municipio. Los criterios de mayor relevancia fueron la producción de olores, el sitio de ubicación de la planta, la participación de todos los actores en la toma de decisiones, el potencial de generación de vectores, los costos del terreno, costos de inversión, topografía y las amenazas por fenómenos hidroclimáticos. Se evidenció durante la realización del estudio que los actores tienen poco o nulo conocimiento sobre los métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales. Un factor importante a considerar es la participación de los actores en la toma de decisiones, pues San Marcos y la región occidental del país, se ha caracterizado por manifestaciones de ciertos grupos sociales, debido a la ausencia de mecanismos de consulta y de toma de decisiones.
- El 71% de los entrevistados percibieron como positivo el reuso de agua residual tratada para actividades productivas, dentro de los argumentos más frecuentes, es porque sería una solución de abastecimiento de agua para riego debido a la ausencia de fuentes de agua limpia. La percepción sobre la disposición de consumo de productos agrícolas que provengan de campos irrigados con aguas residuales es buena, pues el 69% estaría dispuesto a consumirlos, esta situación, es debido a que perciben que habría mayor control sobre la calidad del agua para riego, pues según el Perfil Ambiental de Guatemala (IARNA, 2012) se irrigan cultivos agrícolas para consumo con agua residual sin tratamiento.
- La disposición de consumir productos provenientes de áreas irrigadas con agua residual y la aceptación por los productores (96%) de utilizar agua residual tratada para la irrigación de sus cultivos potencializan la viabilidad de la propuesta de reuso para el caso de San Marcos.
- Las condiciones topográficas (pendientes mayores a 5%) son una gran limitante para la utilización de métodos naturales en el área de San Marcos, sin embargo, pueden adecuarse las estructuras pero implica un aumento de recursos económicos. Por otro lado, debido al poco o nulo conocimiento de este tipo de tecnología, se menosprecian y no son consideradas frecuentemente como alternativas para tratamiento de aguas residuales. Sin embargo ante las limitantes topográficas y considerando experiencias en otras regiones, se seleccionó como unidad de tratamiento complementario la construcción de un Humedal de Flujo Subsuperficial, pues esta tecnología permitía el acondicionamiento en el área de

terreno propuesto. El dimensionamiento del humedal de flujo subsuperficial se realizó a partir de los resultados estimados de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales propuesta por MANCUERNA (2008), por tanto los resultados de eficiencia y remoción de coliformes fecales son una predicción aceptable. Siendo necesario el ajuste del diseño cuando se tengan los resultados reales de eficiencias y remociones, a fin de lograr la calidad esperada del agua residual.

- La selección del método de riego depende grandemente de la disponibilidad de capital, pues los demás factores pueden ser resueltos siempre que se cuente con recursos económicos. El riego por goteo, es un método que reduce considerablemente la exposición de los agricultores a aguas residuales durante la aplicación, sin embargo su adopción depende de la disponibilidad de capital (la inversión es alta), cultura de riego y el nivel formativo y académico de los usuarios del riego para su operación y mantenimiento. Estos factores, condicionaron para que la selección del método de riego fuera aspersión.
- La propuesta de infraestructura hidráulica se realizó en función de la disposición de los productores a participar en el proyecto, en total fueron 41, los cuales disponían de diferentes áreas de cultivo, para fines de cálculo y del presente estudio se establecieron tres tipos de predio, el T1 que son predios con un área de 0.23 hectáreas, T2 de 0.45 hectáreas y T3 de 0.68 hectáreas. Se evidenció que la mayoría de productores son pequeños poseedores de tierra, pues 25 productores poseen predios Tipo 1, 13 Tipo 2 y únicamente 3 con tipo 3.
- La implementación de la propuesta integral depende del involucramiento de la Junta Directiva de los regantes y la cogestión con instituciones dentro del área de influencia hasta lograr la sostenibilidad del sistema. Es importante que se tomen en cuenta los periodos de tiempo propuestos de la implementación total de la propuesta, para asegurar la calidad del agua residual para irrigación y hacer mejoras oportunas.
- Se estimó una tarifa mensual de USD 44.94 por usuario (para irrigación de un área de 0.23 hectáreas) para funcionamiento óptimo y recuperación de la inversión del sistema integral, sin embargo, en función del valor económico del agua y las características socioeconómicas de la región, establecer una tarifa con este valor sería difícil implementarlo. Por tanto, los ajustes y estrategias de reducción de la tarifa son necesarias a fin de lograr una tarifa entre USD 5.00 a 13.24.

9. RECOMENDACIONES

- Los criterios y factores identificados en el contexto de San Marcos, deben considerarse como referencia cuando se requiera la promoción o ejecución de obras ambientales, pues la participación activa y toma de decisiones conjunta permiten la facilidad de abordaje y ejecución efectiva.
- A partir del primer acercamiento que se mantuvo con los productores del área peri-urbana de San Marcos, es recomendable desarrollar un plan de sensibilización sobre la reducción de la generación de aguas residuales, la contaminación de cuerpos hídricos por aguas residuales y usos potenciales de agua residual tratada.
- Esta propuesta reúne el análisis de aspectos teóricos, pero es necesario realizar investigación sobre el comportamiento y eficiencias de los métodos naturales como tecnologías de tratamiento en la zona de occidente de San Marcos para contar con elementos fiables para diseño de estas estructuras. Se recomienda que a partir de la construcción del humedal de flujo subsuperficial se tenga un monitoreo permanente de calidad fisicoquímica y microbiológica.
- Para la implementación de la propuesta de reuso de agua residual, debe tenerse los resultados de la calidad físico-química y microbiológica del agua residual de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales propuesta por MANCUERNA (2008), pues aunque los cálculos de diseño se ajustan a modelos y ecuaciones confiables, no dejan de ser una predicción. Al contar con estos datos, se podrá diseñar con mayor precisión y confiabilidad la estructura de tratamiento complementario. Además es necesario contar con los resultados fisicoquímicos que permitan establecer las calidades y riesgos de aplicación del agua al suelo.
- Para la construcción del sistema de riego y posterior reuso, se debe esperar al menos 8 meses de operación del humedal de flujo subsuperficial, de esa manera se tendrán elementos decisivos en función de la calidad microbiológica y fisicoquímica del efluente. A partir de estos resultados se podrá rediseñar la propuesta. Además, debe promoverse por parte de las instituciones involucradas en el proyecto pruebas en campo que permitan conocer la calidad del producto agrícola a producir.
- Debe promoverse la cogestión del proyecto integral, siendo importante la organización del Comité Técnico para reducir los riesgos asociados con la puesta en marcha de la propuesta.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Abbassi, B., y Baz, I. A. (2008). Integrated Wastewater Management: A Review. En: Efficient Management of Wastewater, 29-40.
- Abdel-Halim, W., y Rosenwinkel, K. H. (2005). Domestic Wastewater Treatment and sustainable Re-use. Closing the Loop. En: EMPOWERS Regional Symposium: End-User Ownership and Involvement in IWRM, Cairo, Egypt.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., y Smith, M. (2006). Evapotranspiracion Del Cultivo: Guías Para Determinacion Los Requerimientos De Agua De Los Cultivos, Food & Agriculture Organization -FAO-.
- ANACAFÉ (2004) Cultivo de Aguacate. EN: PROGRAMA DE DIVERSIFICACIÓN DE INGRESOS EN LA EMPRESA CAFETALERA (Ed.). Guatemala, Asociación Nacional del Café -ANACAFÉ-.
- Anderson, Sweeney y Williams, (1998). Métodos cuantitativos para negocios. Ed Thompson Editores. Séptima Edición. México.
- Apollin, F., y Eberhart, C. (1998). Metodologías de análisis y diagnóstico de sistemas de riego campesino. Riego Andino.
- Arango, J. (1998). Manual de operación y mantenimiento para los sistemas de riego en Ladera. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Medellín, Colombia, 27.
- Atria, R., Siles, M., Arriagada, I., Robison, L., y Whiteford, S. (2003). Capital social y reducción de la pobreza en América Latina y el Caribe: en busca de un nuevo paradigma, Comisión Económica Para América Latina y el Caribe.
- Ayaz, S., y Akca, L. (2001). Treatment of wastewater by natural systems. Environment international, 26(3), 189-195.
- Bahena, G., y Tornero, M. (2009). Diagnóstico de las unidades de producción familiar en pequeña irrigación en la subcuenca del río Yautepec, Morelos. Economía, sociedad y territorio, 9(29), 165.
- Bernal, D. P., Cardona, D. A., Galvis, A., y Peña, M. R. (2003a). Guía de selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales domésticas por métodos

- naturales. Universidad del Valle; CINARA; International Water Association. Memorias del evento: Agua 2003. Cartagena de Indias, IWA, 2003, p. 1-9
- Bernal, D. P., Cardona, D. A., Galvis, A., y Peña, M. R. (2003b). Guía de selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales domésticas por métodos naturales. Universidad del Valle; CINARA; International Water Association. Memorias del evento: Agua 2003. Cartagena de Indias, IWA, 2003, p. 1-9 Ilus..
- Blank, L. (2002). La Administración de Organizaciones. Un enfoque estratégico, 3a Ed., Centro Editorial Universidad del Valle, Cali, Colombia.
- Bose, S. (2008). Adaptive and Integrated Management of Wastewater and Storm Water Drainage in Kolkata — Case Study of a Mega City. En: Adaptive and Integrated Water Management, 341-355.
- Carvajal, Y. (2011). Estudio de tendencias de la precipitación mensual en la cuenca alta-media del río Cauca, Colombia. Dyna, vol. 78, núm. 169, 2011, pp. 112-120, Universidad Nacional de Colombia.
- CEPIS. (1994). Uso de aguas residuales. <<http://www.cepis.org.pe/eswww/proyecto/repidisc/publica/hdt/hdt059.html#trata> mi> (17 julio, 2009).
- CEPIS. (2001). Estudio General de caso: Sololá, Guatemala. Sistemas integrados de tratamiento y uso de aguas residuales en América Latina: Realidad Y Potencial. E. Sánchez, ed., Organización Panamericana de la Salud -OPS-, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente -CEPIS-, Guatemala.
- CEPIS. (2002). Guía para la Formulación de Proyectos de Sistemas Integrados de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales Domésticas. J. Moscoso, L. Egocheaga, R. Ugas, y E. Tréllez, eds., Organización Panamericana de la Salud -OPS-, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente -CEPIS-, Lima, Perú.
- CEPIS. (2004). Guía para el diseño y construcción de captación de manantiales. Organización Panamericana de la Salud -OPS-, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente -CEPIS-, Lima, Perú, 25.
- CINARA, IDEAM, y UTP. (2005). Modelo Conceptual de Selección de Tecnologías para el Control de la Contaminación por aguas residuales domésticas para poblaciones entre 500 y 30000 habitantes. En: Proyecto de Selección de Tecnologías para el

Control de Contaminación por Aguas Residuales Domésticas para poblaciones entre 500 y 30000 habitantes, Cali, Colombia.

Colom, E. (2005). Estudio de los cambios legales en el marco de la privatización del agua en Guatemala. Brot fuer die Welt,, Guatemala.

Crites, R., y Tchobanoglous, G. (2000). Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones, Bogotá-Colombia.

Daft, R. L. (2005). Teoría y diseño organizacional, 8 Ed., International Thomson.

Delgadillo, O. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Nelson Antequera.

DIAPRYD. (2008). Proyectos ejecutados y en ejecución a diciembre de 2008. Programa de Desarrollo Integral en Áreas Con Potencial de Riego y Drenaje -DIAPRYD-. Plan de Acción para la Modernización y Fomento de la Agricultura Bajo Riego - PLAMAR-. Ministerio de Agricultura, Ganaderia y Alimentación -MAGA-, Guatemala.

DIAPRYD. (2009). Proyectos ejecutados y en ejecución a febrero de 2009. Programa de Desarrollo Integral en Áreas Con Potencial de Riego y Drenaje -DIAPRYD-. Plan de Acción para la Modernización y Fomento de la Agricultura Bajo Riego - PLAMAR-. Ministerio de Agricultura, Ganaderia y Alimentación -MAGA-, Guatemala.

Díaz, J. E. (2006). Riego por gravedad, Universidad del Valle, Colombia.

EPA. (2000). Humedales de flujo subsuperficial. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Environmental Protection Agency -EPA-, Washington, D.C. Estados Unidos.

FAO. (1993). Prevención de la Contaminación del Agua por la Agricultura y Actividades Afines. Anales de la Consulta de Expertos organizada por la FAO. Food and Agriculture Organization, Santiago, Chile, 385.

FAO. (2000). Sistema de Información sobre el Uso del Agua en la Agricultura y el Medio Rural de la FAO: Guatemala. <<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries/guatemala/indexesp.stm>> (10 julio, 2009).

- FAO. (2002). Agua y Cultivos. Logrando el uso óptimo del agua en la agricultura. Food and Agriculture Organization, Roma, Italia, 28.
- FAO (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guía para determinar los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y drenaje No 56. Roma, Italia. 298 p. ISBN 92-5-304219-2
- FAO. (2008). Transferencia de la gestión del riego. Food and Agriculture Organization, Roma, Italia.
- FAO. (2010). Agua en la Agricultura. <[ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/factsheet_wwf_spa.pdf](http://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/factsheet_wwf_spa.pdf)> (22 de noviembre, 2010).
- FAO. (2011). Informe para el programa de uso seguro de aguas residuales para La agricultura. FAO Guatemala.
- Francia. Cano, A. L. (2003). Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: La EDAR de los Gallardos (Almería). In Ecología, manejo y conservación de los humedales (pp. 99-112). Instituto de Estudios Almerienses.
- Fuentes, M. R., van Etten, J., Aparicio, A. O., y Pol, J. L. V. (2005). Maíz para Guatemala: Propuesta para la Reactivación de la Cadena Agroalimentaria de Maíz Blanco y Amarillo. FAO Guatemala, Guatemala, C.A.
- Fundación Solar. (2006). Diagnóstico Ambiental del municipio de San Marcos. MANCUERNA, ed., Guatemala.
- Galvis, A., Cardona, D. A., y Bernal, D. P. (2007). Modelo conceptual de selección de tecnología para el control de contaminación por aguas residuales domesticas en localidades colombianas menores de 30.000 habitantes, SELTAR. En: Avances en investigación y desarrollo en agua y saneamiento para el cumplimiento de las metas del milenio, Universidad del Valle, Colombia, 181.
- García, E. (2008). Manual de Pequeñas Irrigaciones, Fondo Perú-Alemania -FPA-, Lima, Perú.
- García García, M., Cabezas, Á., & Comín, F. A. (2009). Utilización de humedales contruidos de flujo superficial en el tratamiento de aguas residuales de origen urbano-industrial. Tecnología del agua, 29(306), 32-40.
- García, I. (1997). Sistemas de riego por aspersión y goteo, Editorial Trillas, S. A. de C. V., México.

- Garza, V. (2000). Reuso agrícola de las aguas residuales de Cd. Juárez, (Chih., México). En el valle de Juárez y su impacto en la salud pública. Salud Pública y Nutrición, 1.
- Gerbrandy, G., y Hoogendam, P. (1998). Aguas y acequias: los derechos al agua y la gestión campesina de riego en los Andes bolivianos, Plural Editores, Cochabamba, Bolivia.
- Guerrero, J. (2003). Modelo de selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas localidades. Universidad del Valle; CINARA; International Water Association. Memorias del evento: Agua 2003. Cartagena de Indias, IWA, 2003, p. 1-9 Ilus.
- Guevara, J. (2003). Métodos de estimación y ajuste de datos climáticos. Imprenta Universidad Central de Venezuela, Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales, Dirección de Hidrología y Meteorología, Mérida.
- Hunt, R. (1988). Size and the structure of authority in canal irrigation systems. Anthropological Research, 44, 335-355.
- IICA (2004) Estudio de cadenas de producción y comercialización de frutas (papayas, limones, naranjas y aguacates). Nicaragua, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura -IICA-.
- ICTA (2002). El Cultivo de maíz en Guatemala. Una guía para su manejo agronómico. Instituto de Ciencia y Tecnologías Agrícolas –ICTA-. Guatemala.
- Instituto de Agricultura Recursos Naturales y Ambiente. (2009). Perfil Ambiental de Guatemala 2008-2009: las señales ambientales críticas y su relación con el desarrollo, Universidad Rafael Landívar (URL), Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA), Guatemala.
- Instituto de Agricultura Recursos Naturales y Ambiente, y Asociación Instituto de Incidencia Ambiental. (2005). Situación del Recurso Hídrico en Guatemala. Documento Técnico del Perfil Ambiental de Guatemala, Universidad Rafael Landívar (URL), Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA) y Asociación Instituto de Incidencia Ambiental (IIA), Guatemala.
- Instituto Geográfico Nacional. (2004). Diccionario Geográfico Nacional. Guatemala.
- Instituto Nacional de Estadística. (2002). Lugares Poblados de Guatemala, XI Censo Nacional de Población y VI de Habitación. INE, Guatemala.

- Instituto Nacional de Estadística. (2003). Censo Nacional Agropecuario INE, Guatemala.
- Instituto Nacional de Sismología Vulcanología Meteorología e Hidrología. (1993). Atlas Hidrológico. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología –INSIVUMEH- Guatemala.
- Instituto Nacional de Sismología Vulcanología Meteorología e Hidrología. (2009). Climatología: datos climáticos periodo 1993-2009. Estación San Marcos, ubicada en la Escuela de Formación Agrícola (EFA). Guatemala.
- Kretschmer, N., Ribbe, L., y Gaese, H. (2003). Wastewater reuse for agriculture. Institute for technologies in the tropics, 2, 37-64.
- Jiménez, H., (1986). Hidrología Básica 1. Segunda edición, Publicaciones Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, 1986.
- Loaiza, J. (2003). Sistematización del proceso metodológico para diseño de proyectos de pequeña irrigación (PPI) y su implementación en una aplicación de computador, Universidad del Valle-Universidad Nacional de Colombia, Cali, Colombia.
- Madera, C. A., Peña, M. R., y Van Ginneken, M. (2003). Humedales de Flujo Subsuperficial: Una Alternativa Natural para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Zonas Tropicales. Ingeniería y competitividad, Revista de Divulgación del Desarrollo Científico y Tecnológico. Facultad de Ingeniería Universidad del Valle.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (2006) Ficha Técnica. Aguacate (Persea americana Mill.). Guatemala, Proyecto Desarrollo de la Fruticultura y Agroindustria -PROFRUTA-, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación -MAGA-. Guatemala.
- MANCUERNA (2008). Planificación de línea de conducción y planta de tratamiento de aguas residuales, río Chivisgüe, Municipio de San Marcos, departamento de San Marcos. Mancomunidad de Municipios de la Cuenca del Río Naranjo -MANCUERNA-, Guatemala.
- MANCUERNA (2009). Estudio técnico en cumplimiento del reglamento de aguas residuales, en cabecera municipal de San Marcos. Mancomunidad de Municipios de la Cuenca del Río Naranjo -MANCUERNA-, Guatemala.
- Manga, J., Logreira, N., y Serralt, J. (2001). Reuso de aguas residuales: Un recurso hídrico disponible. Ingeniería y desarrollo, Universidad del Norte, 09, 12-21.

- Mara, D. (2003). Domestic wastewater treatment in developing countries, Earthscan, Londres, Inglaterra.
- Materón, H. (1997). Obras hidráulicas rurales, Editorial Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia.
- Metcalf & Eddy. (1995a). Ingeniería de aguas residuales, 3 Ed., Editorial McGraw Hill, España.
- Metcalf & Eddy. (1995b). Ingeniería de aguas residuales, 3 Ed., Editorial McGraw Hill, España.
- Metcalf & Eddy. (2003). Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, 4 Ed., McGraw-Hill Nueva York.
- Ministerio de ambiente y Recursos Naturales. (2006). Acuerdo Gubernativo No. 236-2006. Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos. Diario de Centro América, Número 26, Guatemala.
- Moscoso, J., y Egocheaga, L. (2002). Sistemas integrados de tratamiento y uso de aguas residuales en América Latina: realidad y potencial en America Latina: Realidad y Potencial. En: XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, AIDIS, Cancún México.
- Mujeriego, R. (2006). La reutilización planificada del agua para regadío. Aspectos conceptuales, técnicos, reglamentarios y de gestión. En: XI Congreso Nacional de Comunidades de Regantes de España Federación Nacional de Comunidades Regantes de España -FENACORE-, Palma de Mallorca, España.
- Municipalidad de San Marcos. (2002). Diagnóstico Ambiental del Municipio de San Marcos. Agencia Española de Cooperación Internacional -AECI-, San Marcos, Guatemala, 7-13.
- Navarro B. (2010). Plan para la administración de los recursos de las organizaciones comunitarias de San Antonio Sacatepéquez San Marcos. En: Manual de funciones y atribuciones de junta directiva y comisiones para organizaciones comunitarias de San Antonio Sacatepéquez San Marcos. Tesis de grado. Universidad Rural de Guatemala. Guatemala.
- Noriega, R., Fletes, I., Castillo, J., Magaña, A., y Miguez, S. (2008). La sustentabilidad de los sistemas agrícolas con pequeña irrigación. El caso de San Pablo Actipan. Ra Ximhai, 4(2), 139-163.

- Oakley, S. (1998). Waste-Stabilization Ponds for the Treatment of Sewage: The experiences of Honduras, Nicaragua, El Salvador y Guatemala. Anthony P. Brand editor, Tegucigalpa, Honduras.
- Oakley, S. (2005). Lagunas de Estabilizacion en Honduras. Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento, Monitoreo y sostenibilidad. FHIS/USAID/RRAS, Honduras.
- OMS. (1989). Medidas de protección sanitaria en el aprovechamiento de aguas residuales.
<<http://www.cepis.org.pe/eswww/fulltext/repind53/dis/dis.html#discap72>> (20 julio, 2009).
- OPS. (2005). Guía para el diseño de tanques sépticos, tanques Imhoff y lagunas de estabilización Organización Panamericana de la Salud -OPS-, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente –CEPIS-, Lima, Perú.
- Peña, M. R., y Mara, D. (2004). Waste Stabilisation Ponds. ICR International Water and Sanitation Centre. The Netherlands.
- Pereira, L.S. & Trout, T.J. (1999). Irrigation Methods. Irrigation and Drainage. En: Handbook of Agricultural Engineering. Ed. CIGR-The International Commission of Agricultural Engineering. ASCE, 297-379.
- Platzer, M., Cáceres, V., y Fong, N. (Sin Año). Investigaciones y experiencias con biofiltros en Nicaragua, Centro América. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cancún, México.
- PNUD. (2004). Informe Nacional de Desarrollo Humano. Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, Guatemala.
- Polprasert, C. (2007). Organic waste recycling: technology and management, 3, ilustrada Ed., IWA Publishing, Londres.
- Quipuzco, L. E. (2004). Valoración de las aguas residuales en Israel como un recurso agrícola: consideraciones a tomar en cuenta para la gestión del agua en el Perú. Revista del Instituto de Investigación FIGMMG, 7(13), 64-72.
- Rabadán, J. M., y Luffiego, M. (2000). La evolución del concepto de sostenibilidad y su introducción en la enseñanza. Enseñanza de las ciencias, 18(3), 473.

- Ramió, C. (1999). Teoría de la organización y administración pública. En: Teoría de la Organización, INAP, ed., Tecnos-UPF, Madrid, España, 30.
- Restrepo, I. (Year). Concepto de sostenibilidad. CINARA, Universidad del Valle.
- Robbins, S. (2004). Comportamiento organizacional, Pearson Educación, México.
- Rojas, R. (2002). Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales. En: CURSO INTERNACIONAL "GESTIÓN INTEGRAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES"(2002: Brasil). Curso Internacional. Brasil: Cepis, 19.
- Romero, J. (2004). Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principio de diseño, Tercera Ed., Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, Colombia.
- Rodríguez-González, M. R., Molina-Burgos, J., Jácome-Burgos, A., & Suárez-López, J. (2013). Humedal de flujo vertical para tratamiento terciario del efluente físico-químico de una estación depuradora de aguas residuales domésticas. Ingeniería, investigación y tecnología, 14(2), 223-235.
- Salinas, A. (2010). Manual de especificaciones técnicas básicas para la elaboración de estructuras de captación de agua de lluvia (SCALL) en el sector agropecuario de Costa Rica y recomendaciones para su utilización, Universidad Nacional, CEMEDE, Costa Rica.
- Secretaria de Planificación y Programación de la Presidencia. (2006). Estrategia para la Gestión Integrada de Los Recursos Hídricos de Guatemala: Diagnóstico. Banco Interamericano de Desarrollo, ed.
- SAGARPA (2000) Sistemas agroforestales. México, Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural Pesca y Alimentación -SAGARPA-.
- Silva, J., Torres, P., y Madera, C. (2008). Domestic wastewater reuse in agriculture. A review. Scielo, 26, No 2, p 347-359.
- Simmons, C. S., Taráno, J. M., y Pinto, J. H. (1959). Clasificación de reconocimiento de los suelos de la República de Guatemala, Ministerio de Agricultura, Servicio Cooperativo Interamericano de Agricultura (SCIDA), Instituto Agropecuario Nacional (IAN), Departamento de Suelos, Guatemala.
- Stottmeister, U., Wießner, A., Kusch, P., Kappelmeyer, U., Kästner, M., Bederski, O., Müller, R., y Moormann, H. (2003). Effects of plants and microorganisms in

constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances*, 22(1-2), 93-117.

UNEP-IETC (2005). *Design Manual on Waste Stabilization Ponds and Constructed Wetlands*. Danish International Development Agency (Danida).

Urrutia, N. (2008). *Experiencias de la Pequeña Irrigación en Colombia*:PPI. Lima, Perú.

Urrutia, N. (2009). *Curso Internacional: Sistemas de riego en zonas de ladera, una concepción integral*. Quetzaltenango Guatemala.

Urrutia, N., y Dossman, C. (2007). *Una visión moderna para el manejo del Distrito de Riego RUT*. Cuba.

US Army Corps of Engineers. (2000). *Water resources assessment of Guatemala*. US Army Corps of Engineers, Mobile District & Topographic Engineering Center, Guatemala.

Veliz, E., LLanes, J. G., Fernández, L. A., y Bataller, M. (2009). *Reúso de aguas residuales domésticas para riego agrícola. Valoración crítica*. *CENIC Ciencias Biológicas*, 40(1), 35-44.

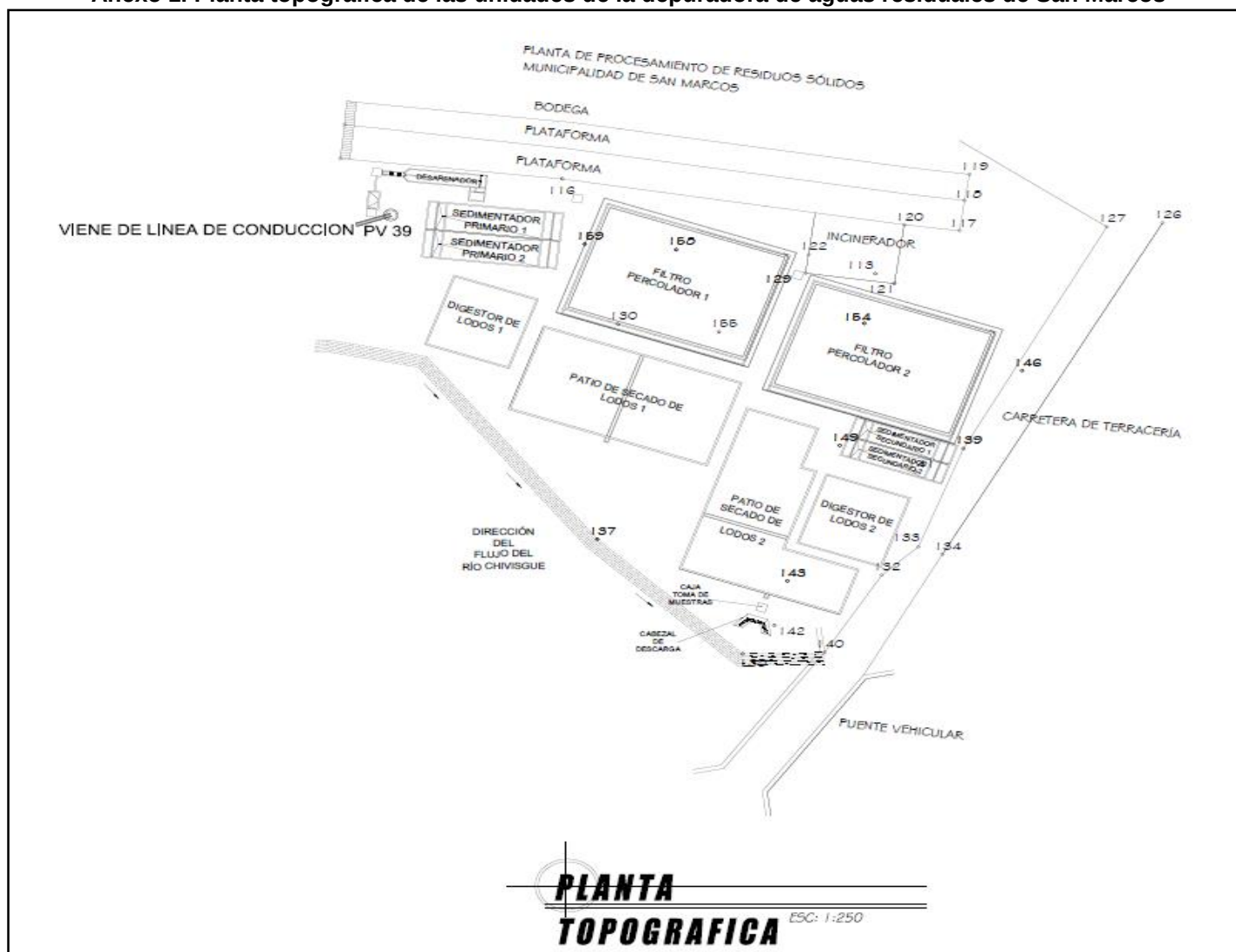
Ven Te Chow; Maidment, D; Mays, L. (2000). *Hidrología Aplicada*. Bogotá. Editorial McGraw Hill Interamericana. 584 p. ISBNB 958-600-171-7.

Villasante, A. L. (2009). *El Riego: Fundamentos Hidráulicos*, 4ª Ed., Mundi-Prensa Libros, S.A., España.

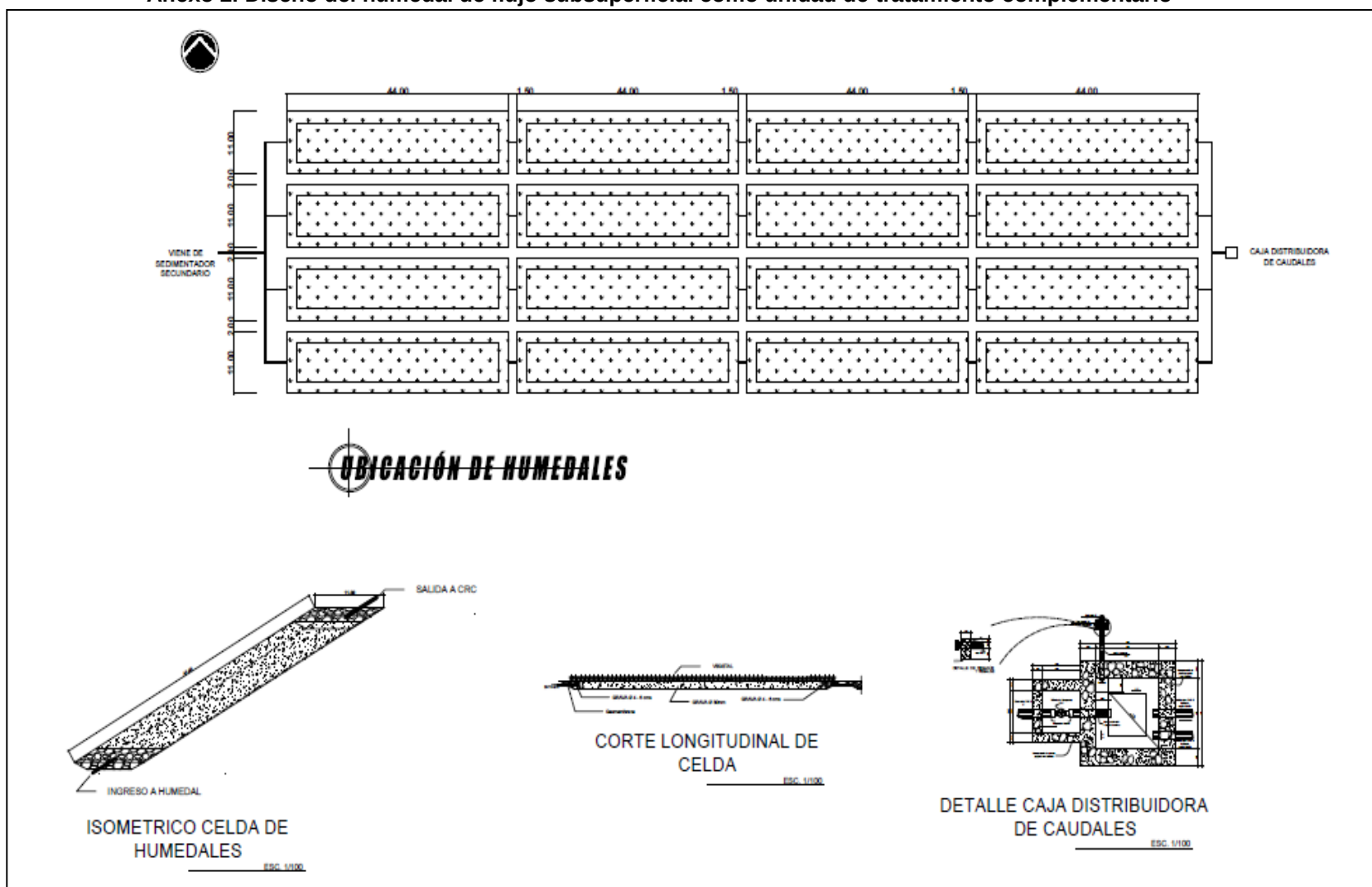
WHO. (2006). *Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater in Agriculture. Volume 2. Wastewater Use in Agriculture*, World Health Organization.

11. ANEXOS

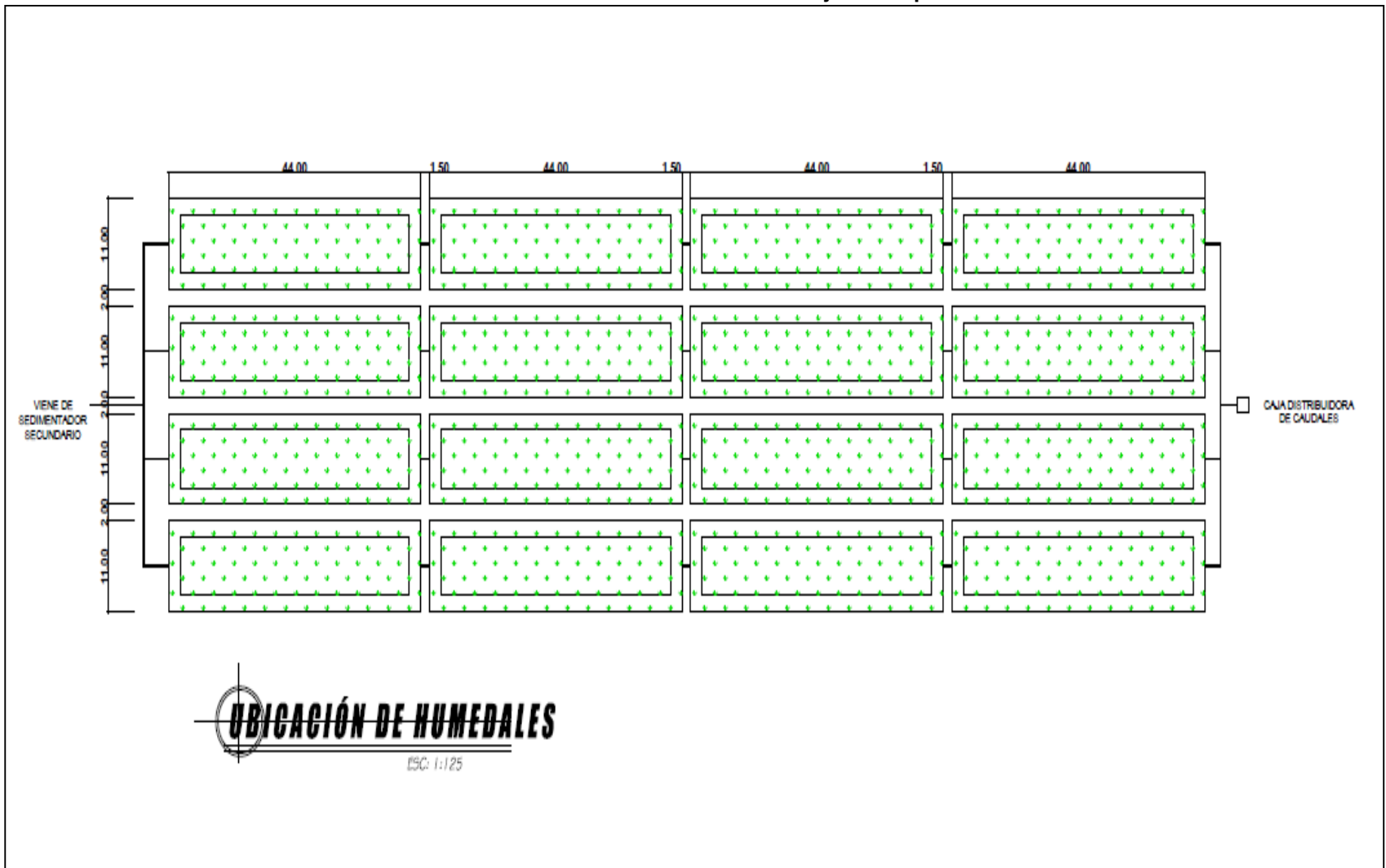
Anexo 1. Planta topográfica de las unidades de la depuradora de aguas residuales de San Marcos



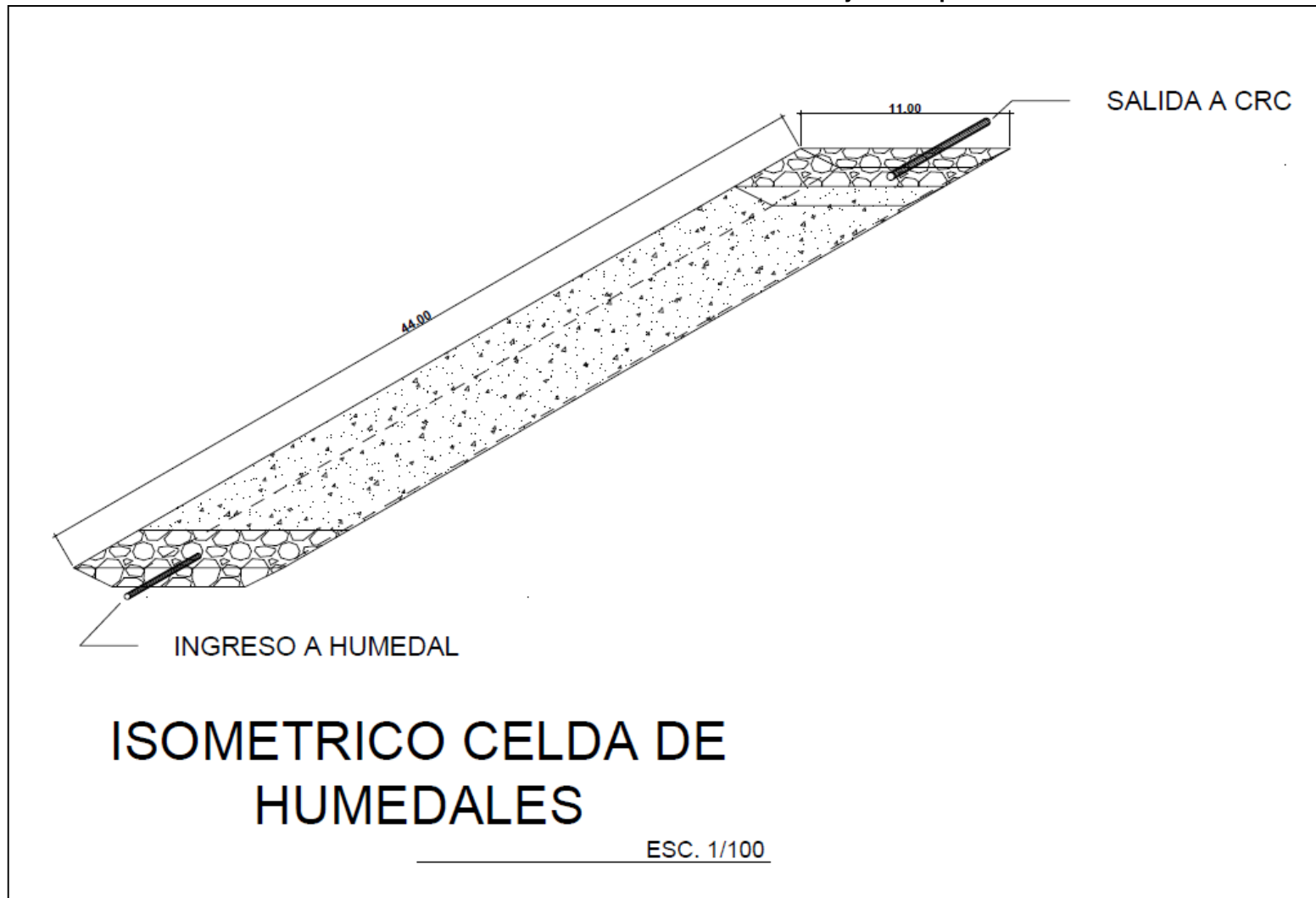
Anexo 2. Diseño del humedal de flujo subsuperficial como unidad de tratamiento complementario



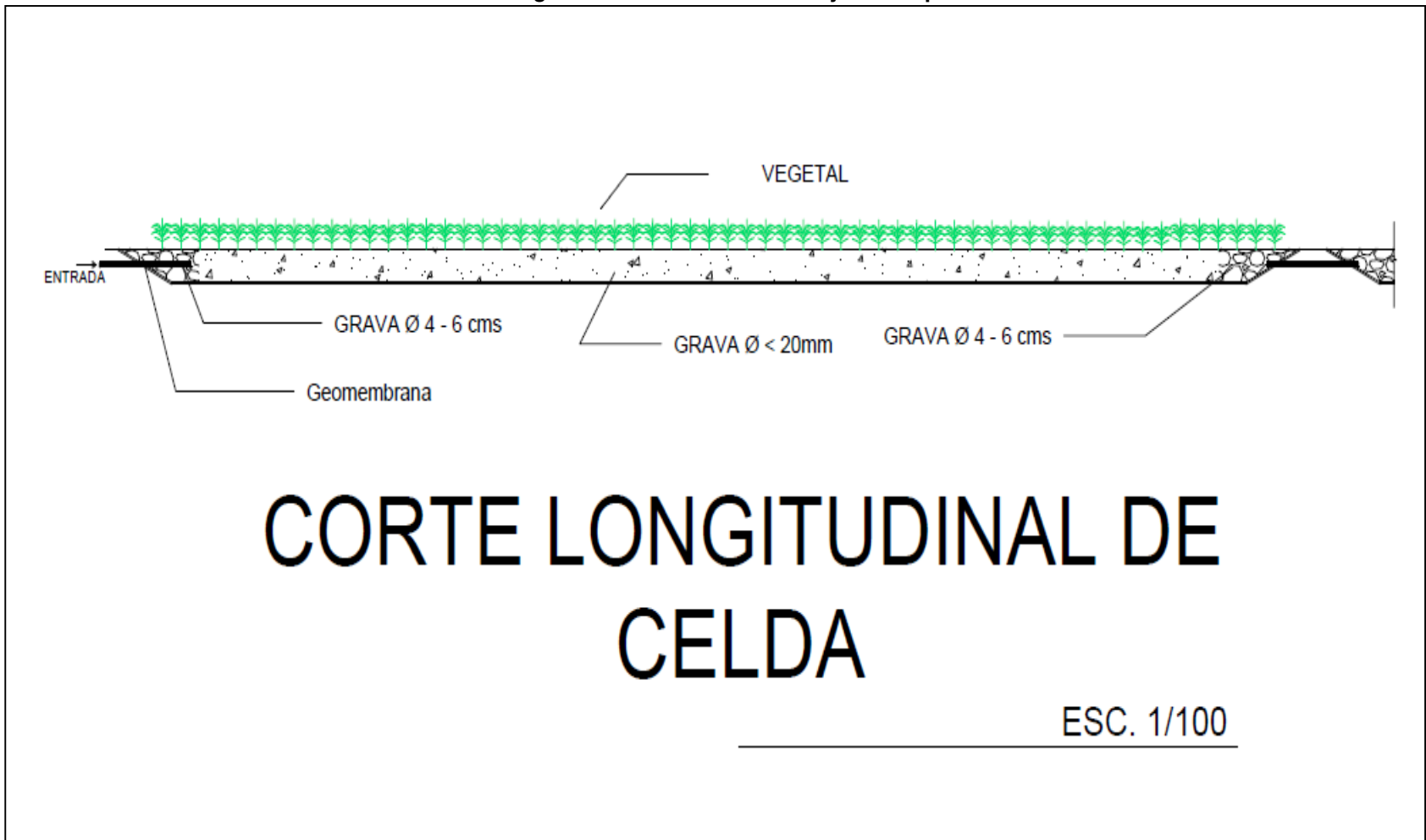
Anexo 3. Distribución de celdas del humedal de flujo subsuperficial



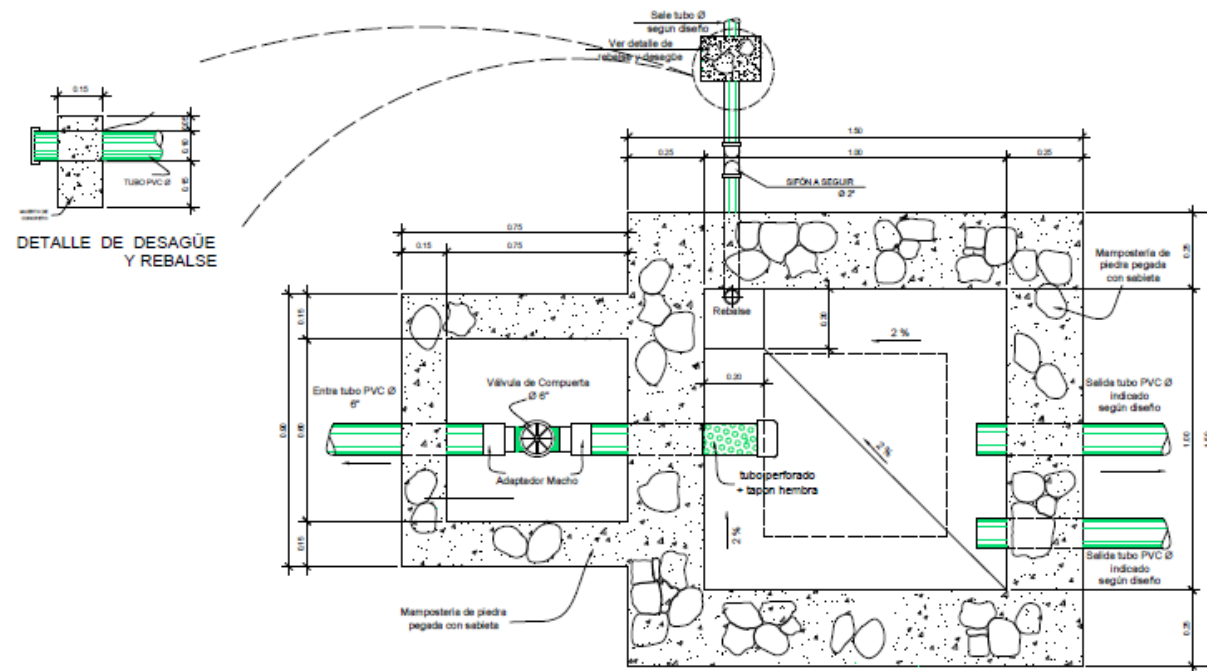
Anexo 4. Isométrico de la celda del humedal de flujo subsuperficial



Anexo 5. Corte longitudinal del humedal de flujo subsuperficial



Anexo 6. Detalle de caja distribuidora de caudales



DETALLE CAJA DISTRIBUIDORA DE CAUDALES

ESC. 1/100

Anexo 7. Diseño hidráulico de la red de conducción y distribución

Tabla 11-1. Longitudes, diámetros, caudales y velocidades de tuberías

ID	L	D	Q	V	ID	L	D	Q	V	ID	L	D	Q	V
	m	mm	lt/seg	m/s		m	mm	lt/seg	m/s		m	mm	lt/seg	m/s
Tubería p1	16.16	161.7	19.31	0.94	Tubería p47	4	161.7	12.74	0.62	Tubería p93	1	30.4	0.41	0.57
Tubería p2	8.062	161.7	19.31	0.94	Tubería p48	6	161.7	12.32	0.6	Tubería p95	18.44	109.8	5.31	0.56
Tubería p3	5.657	161.7	19.31	0.94	Tubería p49	19.1	161.7	12.33	0.6	Tubería p96	1	109.8	5.31	0.56
Tubería p4	22.67	161.7	19.31	0.94	Tubería p50	7.071	161.7	11.91	0.58	Tubería p97	8.062	109.8	5.31	0.56
Tubería p5	27.29	161.7	19.31	0.94	Tubería p51	23	161.7	11.91	0.58	Tubería p98	3.606	85.42	4.9	0.85
Tubería p6	30.61	161.7	19.31	0.94	Tubería p52	24.02	161.7	11.1	0.54	Tubería p99	5.831	85.42	4.9	0.85
Tubería p7	19.1	161.7	19.31	0.94	Tubería p53	11.4	161.7	11.1	0.54	Tubería p100	22.47	85.42	4.9	0.85
Tubería p8	8.485	161.7	19.31	0.94	Tubería p54	21.02	161.7	10.68	0.52	Tubería p101	1	85.42	4.9	0.85
Tubería p9	7.81	161.7	19.31	0.94	Tubería p55	9	161.7	10.68	0.52	Tubería p102	16.12	85.42	4.9	0.85
Tubería p10	1.414	161.7	19.31	0.94	Tubería p56	13.15	161.7	10.68	0.52	Tubería p103	1	85.42	4.9	0.85
Tubería p11	33.54	161.7	19.31	0.94	Tubería p57	1	109.8	9.87	1.04	Tubería p104	14.21	85.42	4.9	0.85
Tubería p12	26.08	161.7	19.31	0.94	Tubería p58	22.2	109.8	9.87	1.04	Tubería p105	8.062	85.42	4.9	0.85
Tubería p13	17.8	161.7	19.31	0.94	Tubería p59	19.03	109.8	9.45	1	Tubería p106	2.236	85.42	4.9	0.85
Tubería p14	11.05	161.7	19.31	0.94	Tubería p60	17.12	109.8	9.45	1	Tubería p107	14.87	85.42	4.9	0.85
Tubería p15	27.29	161.7	19.31	0.94	Tubería p61	18	109.8	9.04	0.95	Tubería p108	9.22	85.42	4.9	0.85
Tubería p16	25.18	161.7	18.5	0.9	Tubería p62	8.246	109.8	8.62	0.91	Tubería p109	10.3	85.42	4.9	0.85
Tubería p17	9.899	161.7	18.5	0.9	Tubería p63	10.2	109.8	8.62	0.91	Tubería p110	2	57.19	3.67	1.43
Tubería p18	17.09	161.7	18.5	0.9	Tubería p64	10.77	109.8	8.21	0.87	Tubería p111	7.28	57.19	3.67	1.43
Tubería p19	21.93	161.7	18.5	0.9	Tubería p65	6.403	109.8	7.79	0.82	Tubería p112	3.162	57.19	3.67	1.43
Tubería p20	12.65	161.7	18.08	0.88	Tubería p66	7.211	109.8	7.79	0.82	Tubería p113	3.162	57.19	3.67	1.43
Tubería p21	23.02	161.7	18.08	0.88	Tubería p67	1.414	109.8	7.79	0.82	Tubería p114	3.606	57.19	3.67	1.43
Tubería p22	16.4	161.7	17.27	0.84	Tubería p68	12.73	109.8	7.79	0.82	Tubería p115	6	57.19	3.67	1.43
Tubería p23	18.44	161.7	17.27	0.84	Tubería p69	24.52	109.8	6.98	0.74	Tubería p116	6.325	57.19	3.67	1.43
Tubería p24	14.04	161.7	17.27	0.84	Tubería p70	11.18	109.8	6.17	0.65	Tubería p117	6.083	57.19	3.67	1.43
Tubería p25	19.65	161.7	16.46	0.8	Tubería p71	25.06	109.8	6.17	0.65	Tubería p118	5	57.19	3.67	1.43
Tubería p26	4.472	161.7	16.46	0.8	Tubería p72	21.54	109.8	4.95	0.52	Tubería p119	1	57.19	3.67	1.43
Tubería p27	23.41	161.7	16.46	0.8	Tubería p73	11.31	85.42	4.95	0.86	Tubería p120	3.162	57.19	2.85	1.11
Tubería p28	19.42	161.7	16.46	0.8	Tubería p74	11.4	85.42	4.14	0.72	Tubería p121	5	57.19	2.85	1.11
Tubería p29	22.85	161.7	16.46	0.8	Tubería p75	22.2	85.42	3.72	0.65	Tubería p122	3.162	57.19	2.85	1.11
Tubería p30	13.6	161.7	16.46	0.8	Tubería p76	15.81	85.42	3.72	0.65	Tubería p123	1	44.46	2.04	1.32
Tubería p31	2.236	161.7	16.46	0.8	Tubería p77	3	67.45	3.72	1.04	Tubería p124	1	44.46	2.04	1.32
Tubería p32	8.062	161.7	16.46	0.8	Tubería p78	17.09	67.45	3.72	1.04	Tubería p125	9.055	44.46	2.04	1.32
Tubería p33	7.071	161.7	16.46	0.8	Tubería p79	7.071	67.45	3.72	1.04	Tubería p126	8.062	44.46	2.04	1.32
Tubería p34	8.062	161.7	16.46	0.8	Tubería p80	12.37	67.45	3.31	0.92	Tubería p127	2.236	44.46	2.04	1.32
Tubería p35	3	161.7	16.46	0.8	Tubería p81	4.123	67.45	3.31	0.92	Tubería p128	1	44.46	2.04	1.32
Tubería p36	5.099	161.7	16.46	0.8	Tubería p82	6.083	67.45	3.31	0.92	Tubería p129	2.236	44.46	2.04	1.32
Tubería p37	12.04	161.7	16.46	0.8	Tubería p83	13.04	67.45	2.89	0.81	Tubería p130	2.236	44.46	2.04	1.32
Tubería p38	1	161.7	16.46	0.8	Tubería p84	3.162	67.45	2.47	0.69	Tubería p131	13.93	44.46	2.04	1.32
Tubería p39	4.472	161.7	16.04	0.78	Tubería p85	10.2	67.45	2.47	0.69	Tubería p132	4.123	44.46	2.04	1.32
Tubería p40	7.28	161.7	16.04	0.78	Tubería p86	8.062	67.45	2.47	0.69	Tubería p133	1	44.46	2.04	1.32
Tubería p41	2.236	161.7	15.63	0.76	Tubería p87	15.81	67.45	2.47	0.69	Tubería p134	1	44.46	1.23	0.79
Tubería p42	14.76	161.7	15.21	0.74	Tubería p88	4.472	67.45	2.47	0.69	Tubería p135	34.33	44.46	1.23	0.79
Tubería p43	22.14	161.7	14.8	0.72	Tubería p89	5.099	67.45	2.47	0.69	Tubería 1	12	210.4	24.62	0.71
Tubería p44	5.099	161.7	14.38	0.7	Tubería p90	7.616	67.45	2.47	0.69					
Tubería p45	25	161.7	13.57	0.66	Tubería p91	9.487	57.19	2.06	0.8					
Tubería p46	17.89	161.7	13.15	0.64	Tubería p92	1	44.46	0.83	0.53					

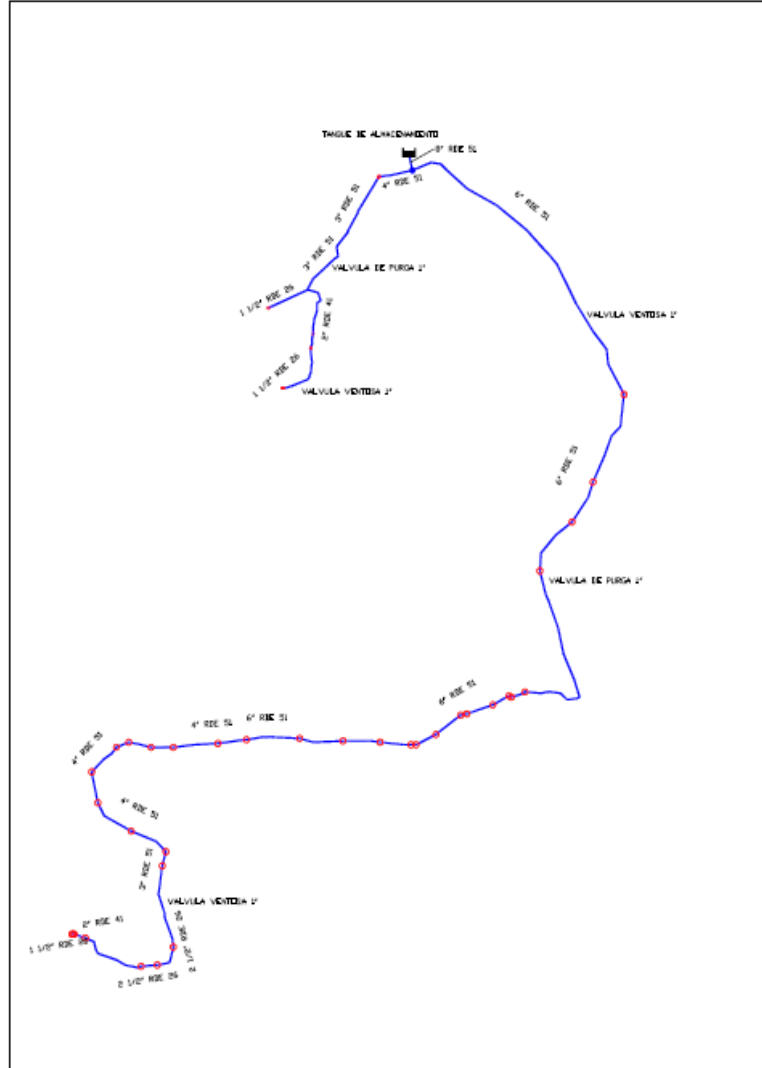
Fuente: Elaboración propia, 2013.

Tabla 11-2. Cotas, caudales de demanda y presión disponible en nodos

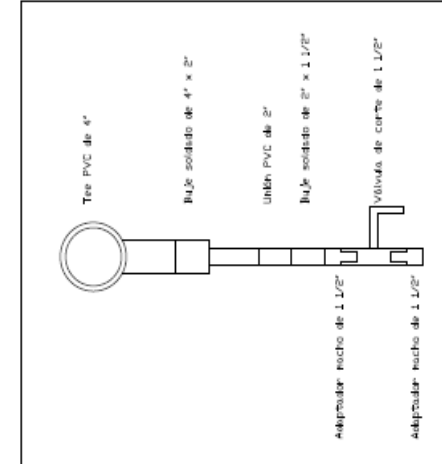
ID	cota msnm	Q lt/seg	H m.c.a.	ID	cota msnm	Q lt/seg	H m.c.a.	ID	cota msnm	Q lt/seg	H m.c.a.
Nudo nd9	2330	0	8.97	Nudo 121	2307	0.41	29.07	Nudo 166	2315	0.41	17.55
Nudo nd64	2313	0	25.89	Nudo 122	2306	0.41	30.06	Nudo 168	2315	0.41	17.54
Nudo nd65	2313	0	25.85	Nudo 123	2306	0	30.05	Nudo nd10	2329	0	9.92
Nudo nd66	2312	0	26.82	Nudo 124	2307	0.41	29.01	Nudo nd11	2329	0	9.91
Nudo nd67	2315	0	23.71	Nudo 125	2304	0	31.99	Nudo nd62	2303	0.41	35.89
Nudo nd68	2314	0	24.57	Nudo 126	2305	0.81	30.95	Nudo nd61	2304	0	34.86
Nudo nd69	2310	0	28.41	Nudo 127	2307	0	28.9	Nudo nd12	2326	0	12.81
Nudo nd70	2312	0	26.32	Nudo 128	2305	0.41	30.88	Nudo nd60	2300	0	38.6
Nudo nd73	2313	0	25.27	Nudo 129	2306	0	29.85	Nudo nd13	2318	0	20.6
Nudo nd78	2313	0	25.23	Nudo 130	2306	0	29.83	Nudo nd14	2312	0	26.45
Nudo nd79	2313	0	25.23	Nudo 131	2304	0.81	31.81	Nudo nd59	2299	0	39.44
Nudo nd80	2316	0	22.06	Nudo 132	2304	0	31.8	Nudo nd58	2301	0	37.32
Nudo nd81	2314	0	23.92	Nudo 133	2305	0.41	30.58	Nudo nd15	2302	0	36.24
Nudo nd82	2309	0	28.83	Nudo 134	2312	0	23.42	Nudo nd16	2301	0	37.22
Nudo nd83	2306	0	31.78	Nudo 135	2315	0.41	20.26	Nudo nd17	2300	0	38.09
Nudo nd84	2306	0.81	31.64	Nudo 136	2315	0.41	20.12	Nudo nd57	2306	0	32.01
Nudo nd86	2307	0	30.52	Nudo 137	2315	0	20.05	Nudo nd18	2300	0	37.92
Nudo nd87	2297	0	40.48	Nudo 138	2319	0.41	15.98	Nudo nd22	2300	0	37.84
Nudo nd88	2295	0	42.4	Nudo 139	2319	0.41	15.9	Nudo nd56	2310	0	27.57
Nudo nd89	2295	0.41	42.29	Nudo 140	2319	0	15.86	Nudo nd55	2311	0	26.46
Nudo nd90	2296	0	41.24	Nudo 141	2319	0	15.82	Nudo nd24	2302	0	35.34
Nudo nd91	2295	0.81	42.13	Nudo 142	2319	0	15.81	Nudo nd54	2312	0	25.21
Nudo nd92	2293	0	44.06	Nudo 143	2318	0.81	16.73	Nudo nd52	2313	0	23.99
Nudo nd93	2290	0	46.99	Nudo 144	2319	0.81	15.61	Nudo nd26	2308	0	28.75
Nudo nd94	2286	0.81	50.93	Nudo 145	2321	0	13.56	Nudo nd27	2310	0	26.53
Nudo nd95	2290	0	46.86	Nudo 146	2322	1.22	12.46	Nudo nd51	2315	0	21.34
Nudo nd96	2291	0	45.84	Nudo 147	2324	0	10.4	Nudo nd28	2310	0.81	26.31
Nudo nd97	2294	0	42.75	Nudo 148	2326	0.81	8.3	Nudo nd29	2310	0	26.23
Nudo nd98	2295	0	41.68	Nudo 149	2325	0.41	9.23	Nudo nd32	2311	0	25.12
Nudo nd99	2297	0	39.59	Nudo 150	2330	0	4.11	Nudo nd35	2311	0.81	25.04
Nudo nd100	2297	0	39.54	Nudo 151	2326	0	8.02	Nudo nd31	2313	0	23
Nudo 102	2296	0	40.53	Nudo 152	2325	0	8.97	Nudo nd30	2313	0	22.96
Nudo 103	2295	0	41.5	Nudo 153	2324	0	9.68	Nudo nd50	2318	0	17.57
Nudo 111	2291	0	45.48	Nudo 154	2321	0.41	12.56	Nudo nd36	2314	0	21.23
Nudo 113	2290	0	46.44	Nudo 155	2319	0	14.39	Nudo nd39	2316	0	19.13
Nudo 114	2290	0	46.43	Nudo 156	2318	0	15.34	Nudo nd49	2319	0	16.09
Nudo 105	2293	0	43.41	Nudo 157	2318	0.41	15.25	Nudo nd48	2319	0	16
Nudo 115	2295	0	41.37	Nudo 158	2318	0.41	15.11	Nudo nd41	2318	0	16.9
Nudo 106	2293	0.41	43.37	Nudo 159	2318	0	15.09	Nudo nd42	2320	0	14.31
Nudo 107	2293	0	43.35	Nudo 160	2315	0	18.01	Nudo nd47	2322	0	12.13
Nudo 109	2294	0.41	42.32	Nudo 161	2315	0	17.94	Nudo nd43	2321	0.81	13.09
Nudo 116	2296	0.41	40.32	Nudo 162	2315	0	17.82	Nudo nd44	2323	1.23	11.07
Nudo 117	2299	0.41	37.27	Nudo 163	2314	0	18.78	Nudo nd17a	2302	1.23	35.34
Nudo 118	2302	0.41	34.2	Nudo 164	2313	0	19.74	Embalse 1	2339	-24.62	0
Nudo 119	2303	0.81	33.18	Nudo 165	2317	0.41	15.68				
Nudo 120	2305	0.41	31.12	Nudo 172	2310	1.23	22.56				

Fuente: Elaboración propia, 2013.

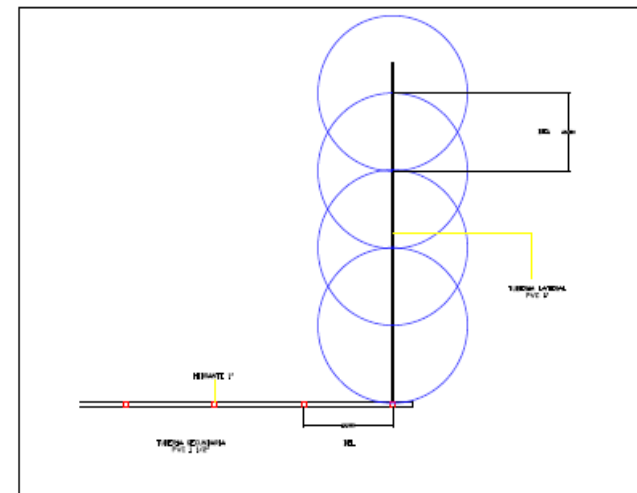
Anexo 8. Detalle de la red de conducción, distribución, riego predial y acometida predial



RED DE CONDUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN
(ESC:1:4000)

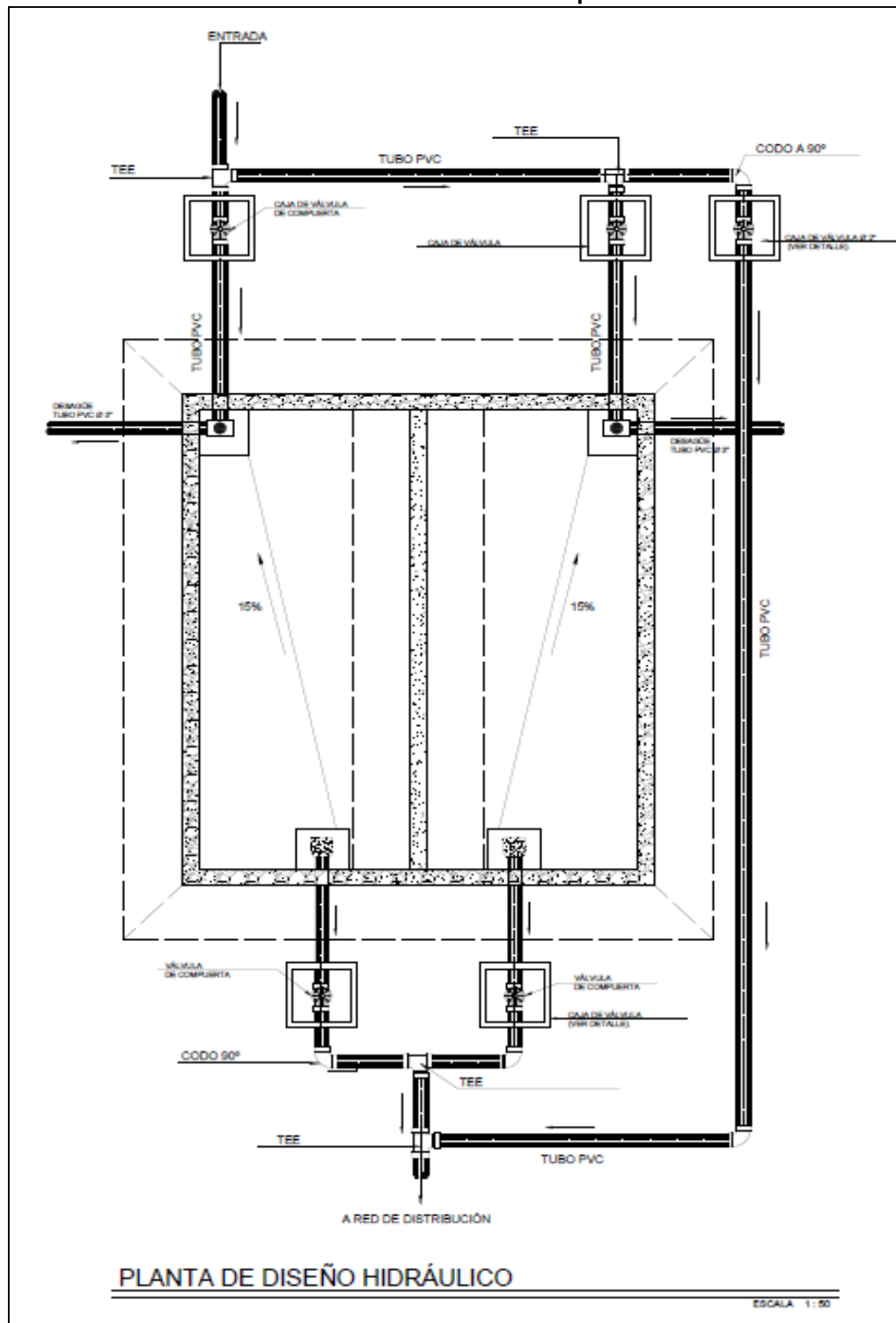


ACOMETIDA PREDIAL (CASO 4")

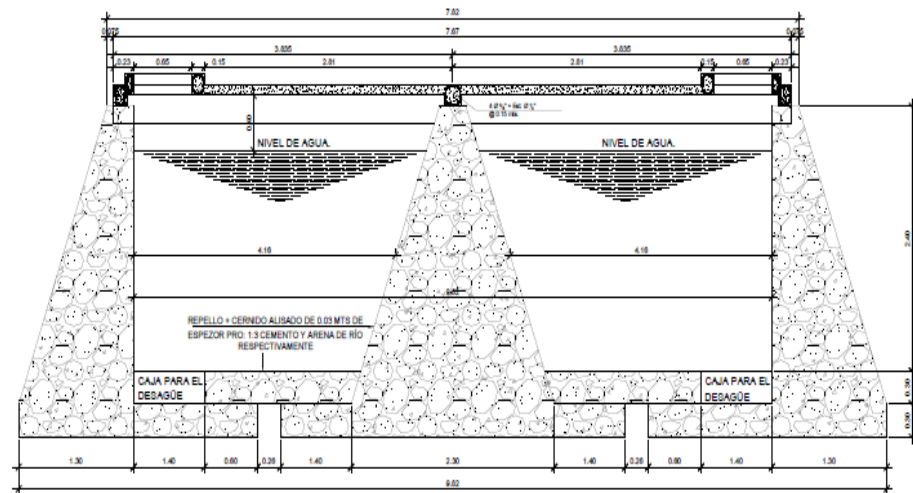
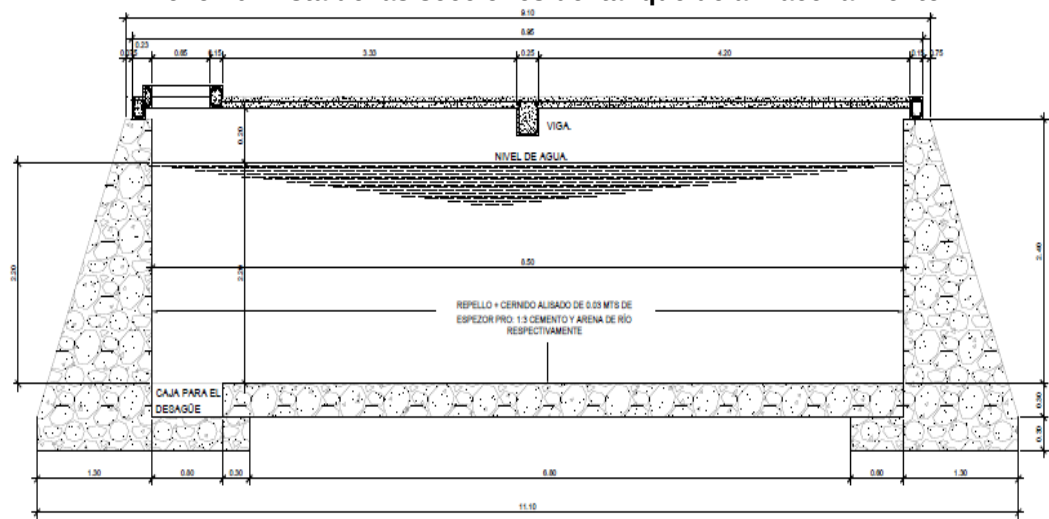


ESQUEMA SISTEMA DE RIEGO PREDIAL

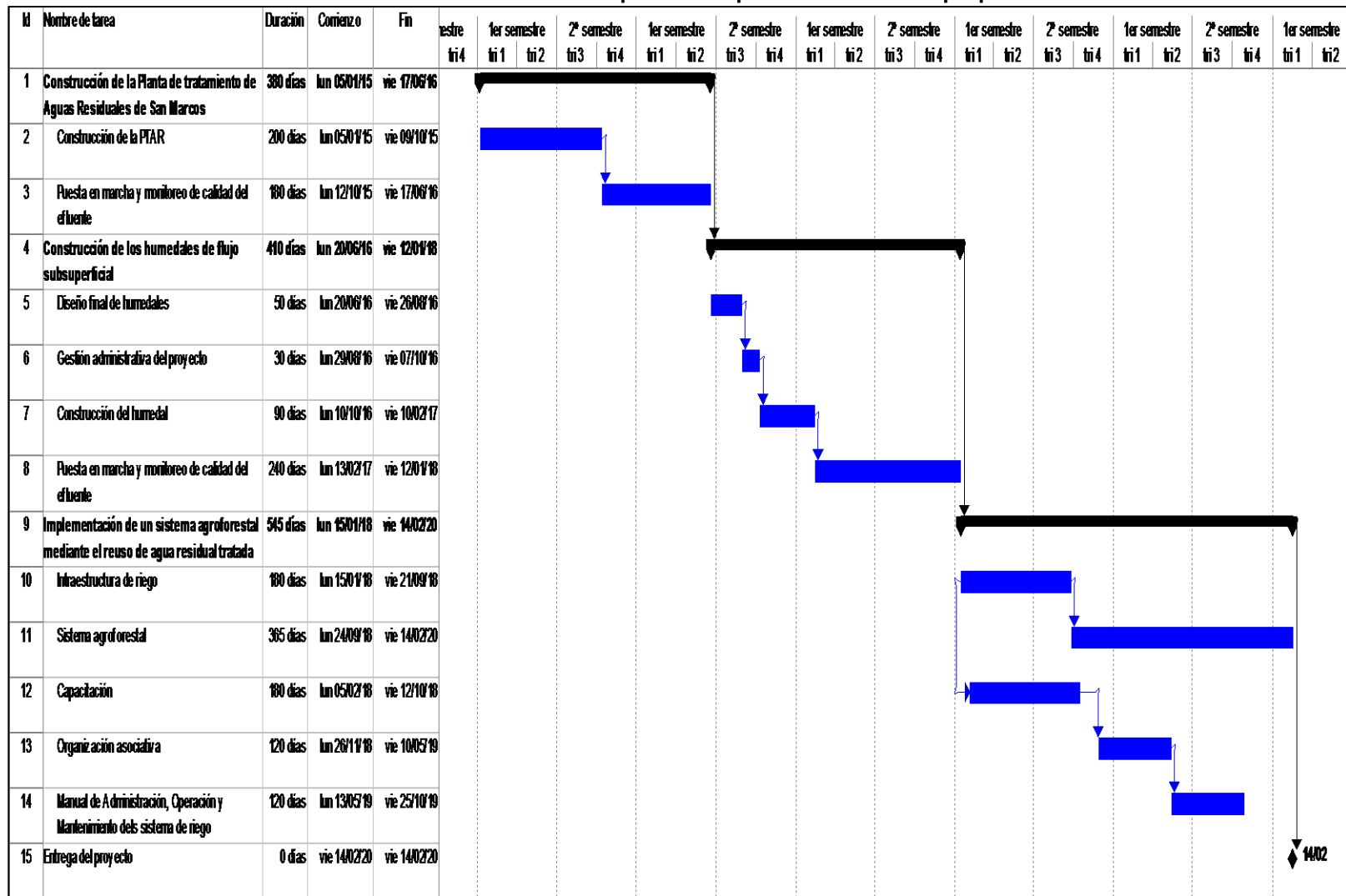
Anexo 9. Planta de diseño hidráulico del tanque de almacenamiento



Anexo 10. Vista de las secciones del tanque de almacenamiento



Anexo 11. Planificación del tiempo de la implementación de la propuesta



Anexo 12. Costos desglosados de la propuesta

Tabla 11-3. Costos desglosados de la construcción del humedal de flujo subsuperficial, valores presentados en Dólares americanos (USD)

MATERIAL	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNTARIO (USD)	TOTAL (USD)
Materiales				
Piedra bola de Ø 4 - 6 cms	640	m ³	31.85	20,382.17
Arena triturada de Ø 30mm	6400	m ³	24.84	158,980.89
Tubo PVC norma ASTM D3034 Ø 6"	26	Tubo	79.62	2,070.06
Codo 90° PVC norma ASTM D3034 Ø 6"	4	Unidad	38.22	152.87
Tee PVC norma ASTM D3034 Ø 6"	6	Unidad	50.96	305.73
Pegamento PVC	0.25	galón	54.14	13.54
Geomembrana	10830	m ²	3.95	42,768.15
Total materiales				224,673.41
Mano de obra				
Limpieza + trazo de celdas	9025	m ²	0.76	6,898.09
Corte para celdas	8518	m ³	3.82	32,552.87
Compactación de celdas	9025	m ²	1.27	11,496.82
Colocación de geomembrana	10830	m ²	0.89	9,657.32
Colocación de grava	7040	m ³	1.02	7,174.52
Total mano de obra				67,779.62

Fuente: Elaboración propia, 2013

Tabla 11-4. Costos desglosados de la construcción del tanque de almacenamiento y distribución, valores presentados en Dólares americanos (USD)

MATERIAL	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNTARIO (USD)	TOTAL (USD)
Arena de río	70.88	m ³	21.02	1,489.81
Piedrín triturado 3/4"	6.89	m ³	38.54	265.68
Piedrín triturado de baja resistencia	0.45	m ³	21.02	9.46
Piedra	221.23	m ³	35.03	7,750.18
TABLA 1" x 10" x 9', PINO	19.00	Docena	56.05	1,064.97
TABLA 1" x 10" x 8', PINO	10.00	Docena	44.59	445.86
PARAL 3" x 3" x 9', PINO	13.00	Docena	28.66	372.61
TABLA 1"x6"x9', PINO	1.00	Docena	25.48	25.48
TABLA 1"x8"x9', PINO	1.04	Docena	31.85	33.17
Cemento UGC 4000 psi	921.11	Saco	9.43	8,683.10
Hierro no. 4 (1/2"), legítimo, grado 40	0.81	qq	59.87	48.30
Hierro no. 3 (3/8"), legítimo, grado 40	16.31	qq	59.87	976.63
Hierro no. 2 (1/4"), comercial	1.23	qq	59.87	73.91
Alambre de amarre	0.71	qq	50.57	35.76
Clavo 3"	0.51	qq	89.17	45.24
Clavo 4"	0.21	qq	89.17	18.81
NIPLE 3" x 0.30m HG	4.00	Unidad	12.10	48.41
NIPLE 3" x 0.10m HG	4.00	Unidad	9.55	38.22

CODO 3" x 90°, HG	8.00	Unidad	12.74	101.91
Malla galvanizada calibre 16	0.50	Rollo	103.18	51.59
Abrazadera plastica	2.00	Unidad	0.16	0.32
CANDADO 50 mm WHALE	3.00	Unidad	7.01	21.02
Accesorios de entrada				
CODO 2" x 90° PVC, J.C.	2.00	Unidad	0.77	1.54
Adaptador macho 2" PVC, C.R.	2.00	Unidad	0.53	1.06
Válvula de compuerta 6" br, nibco americana t-113	1.00	Unidad	171.97	171.97
Accesorios de salida				
Adaptador hembra 2 1/2" PVC, C.R.	3.00	Unidad	2.55	7.64
Tapón macho 2 1/2" PVC, C.R.	2.00	Unidad	3.69	7.39
Tubería 2 1/2" PVC, 160 psi j.c.	0.25	Tubo	12.23	3.06
Tapón hembra 2 1/2" PVC, j.c.	1.00	Unidad	3.64	3.64
Válvula de compuerta 2 1/2" br,	1.00	Unidad	89.97	89.97
Rebalse y desagüe				
Tubería 2" PVC, 160 psi j.c.	1.00	Tubo	8.47	8.47
CODO 3" x 90° PVC, J.C., D.P.D.	3.00	Unidad	0.77	2.31
Válvula de pila 2" br.	1.00	Unidad	6.88	6.88
Tee 2" PVC, j.c., d.p.d.	1.00	Unidad	1.03	1.03
Sifón a seguir 2" PVC, j.c., d.p.d.	1.00	Unidad	7.77	7.77
Total de materiales de tanque de almacenamiento y distribucion				21,913.15
Mano de obra				
ELEMENTO	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNTARIO (USD)	TOTAL (USD)
Trazo	1.00	Global	7.64	7.64
Nivelación y compactación del terreno	180.00	m ²	1.91	343.95
Fundición de cimiento de muro y piso	12.55	m ³	8.92	111.88
Encofrado de muro	225.00	m ²	1.91	429.94
Fundición de muro	145.00	m ³	11.46	1,662.42
Desencofrado de muro	250.00	m ²	0.96	238.85
FORMALETA DE LOSA (Incluye solera perimetral y solera de tapadera)	120.00	m ²	2.55	305.73
ARMADO LOSA (Incluye soleras)	75.00	m ²	1.91	143.31
Colocación concreto simple	10.00	m ³	8.92	89.17
Desencofrado de losa	70.00	m ²	0.96	66.88
Ensabetado interior y exterior	350.00	m ²	1.91	668.79
Alisado interior del tanque	350.00	m ²	1.91	668.79
Armado y colocación respiradero	4.00	Unidad	6.37	25.48
Hechura de tapadera	2.00	Unidad	6.37	12.74
Elaboración de cajas de válvulas	10.00	Unidad	47.77	477.71
Elaboración gradas acceso	1.00	Lote	6.37	6.37
Colocación accesorios	1.00	Lote	6.37	6.37
Total mano de obra calificada de tanque de almacenamiento y distribución				5,266.02

Fuente: Elaboración propia, 2013.

Tabla 11-5. Costos desglosados de la construcción de la red de conducción y distribución valores presentados en Dólares americanos (USD)

MATERIAL	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNTARIO (USD)	TOTAL (USD)
TUBERÍAS				
Tubería PVC 8" RDE 51	12	m	125.99	1,511.85
Tubería PVC 6" RDE 41	810	m	74.65	60,466.24
Tubería PVC 4" RDE 51	246	m	34.52	8,492.48
Tubería PVC 3" RDE 51	174	m	20.89	3,635.16
Tubería PVC 2 1/2" RDE 26	120	m	21.78	2,614.01
Tubería PVC 2" RDE 41	66	m	9.55	630.57
Tubería PVC 1 1/2" RDE 26	84	m	10.83	909.55
VALVULAS VENOTSAS, DE PURGA Y ACCESORIOS DE CONEXIÓN				
Válvula ventosa de 1"	3	und	133.76	401.27
Tee PVC 1 1/2"	1	und	1.73	1.73
Unión PVC 1 1/2"	1	und	1.53	1.53
Buje roscado PVC de 1 1/2" x 1"	1	und	2.55	2.55
Tee reducida 6"x 3"	1	und	17.20	17.20
Buje soldado PVC de 3" x 2"	1	und	7.15	7.15
Unión PVC 2"	1	und	1.99	1.99
Buje roscado PVC de 2" x 1"	1	und	1.96	1.96
TeePVC 3"	1	und	8.10	8.10
Buje soldado PVC de 3" x 2"	1	und	7.15	7.15
Unión PVC 2"	1	und	1.99	1.99
Buje roscado PVC de 2" x 1"	1	und	1.96	1.96
Válvula de purga (de compuerta) de 1"	2	und	46.62	93.25
Tee reducida 6"x 3"	1	und	17.20	17.20
Buje soldado PVC de 3" x 2"	1	und	7.15	7.15
Unión PVC 2"	1	und	1.99	1.99
Buje roscado PVC de 2" x 1"	1	und	1.96	1.96
Adaptador macho PVC 1"	1	und	0.50	0.50
TeePVC 3"	1	und	8.10	8.10
Buje soldado PVC de 3" x 2"	1	und	7.15	7.15
Unión PVC 2"	1	und	1.99	1.99
Buje roscado PVC de 2" x 1"	1	und	1.96	1.96
Adaptador macho PVC 1"	1	und	0.50	0.50
ACOMETIDAS PREDIALES			-	-
Tubo PVC 2" RDE 26	12	m	14.78	177.32
Tubo PVC 1 1/2" RDE 26	48	m	10.83	519.75
válvula de quiebre de presión 1" 30 m.c.a.	11	und	113.38	1,247.13
Adaptador macho de 1"	22	und	0.50	10.93
Buje roscado de 1 1/2" X 1"	22	und	2.55	56.05
Unión PVC de 1 1/2"	22	und	1.53	33.63
Tee reducida 6"x 3"	17	und	17.20	292.36
Buje soldado PVC de 3" x 2"	17	und	7.15	121.49
Unión PVC 2"	17	und	1.99	33.78
Buje soldado PVC de 2" x 1 1/2"	17	und	3.06	51.97
Valvula de corte 1 1/2"	17	und	138.60	2,356.18
Adaptador macho PVC 1 1/2"	34	und	0.68	22.96
Tee PVC 4"	10	und	13.48	134.78
Buje soldado PVC de 4" x 2"	10	und	12.55	125.48
Unión PVC 2"	10	und	1.99	19.87
Buje soldado PVC de 2" x 1 1/2"	10	und	3.06	30.57
Valvula de corte 1 1/2"	10	und	138.60	1,385.99

Adaptador macho PVC 1 1/2"	20	und	0.68	13.50
Tee PVC 3"	2	und	8.10	16.20
Buje soldado PVC de 3" x 2"	2	und	7.15	14.29
Unión PVC 2"	2	und	1.99	3.97
Buje soldado PVC de 2" x 1 1/2"	2	und	3.06	6.11
Valvula de corte 1 1/2"	2	und	138.60	277.20
Adaptador macho PVC 1 1/2"	4	und	0.68	2.70
Tee PVC 2 1/2"	4	und	6.37	25.48
Buje soldado PVC de 2 1/2" x 1 1/2"	4	und	6.37	25.48
Valvula de corte 1 1/2"	4	und	138.60	554.39
Adaptador macho PVC 1 1/2"	8	und	0.68	5.40
Tee PVC 2"	3	und	17.95	53.85
Buje soldado PVC de 2" x 1 1/2"	3	und	3.06	9.17
Valvula de corte 1 1/2"	3	und	138.60	415.80
Adaptador macho PVC 1 1/2"	6	und	0.68	4.05
Tee PVC 1 1/2"	5	und	1.73	8.66
Válvula de corte 1 1/2"	5	und	138.60	692.99
Adaptador macho PVC 1 1/2"	10	und	0.68	6.75
TOTAL MATERIALES				87,612.41
MANO DE OBRA				
ELEMENTO	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNTARIO (USD)	TOTAL (USD)
Excavación manual de zanja (0.2 m x 0.6 m x 1512 m)	181.4	m ³	3.82	693.25
Instalación tubería PVC de 8" RDE 51 y 6" RDE 51	822	m	1.91	1,570.70
Instalación de tubería PVC de 4" RDE 51 y 3" RDE 51	420	m	1.91	802.55
Instalación de tubería PVC de 2 1/2" RDE 26, 2" RDE 41 y 1 1/2" RDE 26	270	m	1.91	515.92
Instalación válvulas ventosas y de purga (incluye accesorios)	5	und	7.64	38.22
Relleno y compactación de zanja	181.4	m ³	1.91	346.62
Instalación de acometidas prediales	41	und	19.11	783.44
TOTAL MANO DE OBRA				4,750.70

Fuente: Elaboración propia, 2013.

Tabla 11-6. Costos desglosados de la construcción del sistema predial, valores presentados en Dólares americanos (USD)

MATERIAL	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO (USD)	TOTAL (USD)
Materiales				
Tubería PVC 1 1/2" RDE 26	3444	m	10.83	37,291.72
Tee presión PVC de 1 1/2"	164	und	1.73	284.13
Buje soldado de 1 1/2" x 1"	164	und	6.37	1,044.59
Tubo PVC de 1"	123	m	5.99	736.43
Adaptador hembra de 1"	164	und	0.41	66.85
Hidrante plástico de 1	164	und	4.46	731.21
Bayoneta plástica de 1"	82	und	2.93	240.25
Manguera de 1"	5412	m	1.91	10,341.40
Adaptador macho PVC de 1 1/2"	41	und	0.68	27.68
Tapón roscado PVC de 1 1/2"	41	und	2.88	118.04
Adaptador hembra polietileno 1"	82	und	6.69	548.41
Aspersor 4023-1-3/4" PAVCO	82	und	30.57	2,507.01
TOTAL MATERIALES				53,937.72
ELEMENTO	CANTIDAD	UNIDAD		
Mano de obra				
Excavación manual de zanja (0.2 m x 0.6 m x 66 m)	323.9	m ³	3.82	1,237.83
Instalación de tubería PVC de 1 1/2" RDE 26	2706	m	1.27	3,447.13
Instalación hidrantes (incluye accesorios)	164	und	3.18	522.29
Relleno y compactación de zanja	323.9	m ³	1.91	618.92
TOTAL MANO DE OBRA				5,826.18

Fuente: Elaboración propia, 2013.

Anexo 13. Modelo de encuesta de recolección de información de campo

PROPUESTA INTEGRAL DE PEQUEÑA IRRIGACIÓN EN ZONAS DE LADERA MEDIANTE EL REUSO DE AGUA RESIDUAL DOMESTICA TRATADA CON METODOS NATURALES, PARA EL MUNICIPIO DE SAN MARCOS, GUATEMALA

Instrucciones

☒

= si

☐

= no

Para indicar que la pregunta es invalida, no aplica, no se sabe, no se quiere contestar, etc. Por favor tachar el número de la pregunta.

IDENTIFICACION DE LA BOLETA

1. Número de la boleta: _____
2. Fecha de la entrevista: _____
3. Municipio: _____
4. Sector: _____
5. Nombre de la persona entrevistada _____

DATOS DEL ENTREVISTADO (A)

6. Sexo: M ☐ F ☐

7. Edad: _____ años

8. Ocupación: _____

9. Papel del entrevistado:

Jefe/a de familia ☐

miembro de familia ☐

SERVICIO DE AGUA

10. ¿Tiene actualmente servicio de agua entubada? SI ☐ NO ☐

11. ¿Cuáles son los usos principales que le da al agua?

☐

bebida y comida

☐

higiene personal

☐

comercio

☐

limpieza

☐

agricultura

☐

Industria

12. Actividades agrícolas de generación de *ingresos anuales* de la familia

2.1.1. Datos agrícolas y ganaderos de generación de ingresos y autoconsumo de la familia							
Personas encargadas (padre, madre, hijo, hija, etc.)	Tipo de cultivo	Área Cuerdas	Cultivos		Venta en quetzales	Precio por unidad	Autoconsumo (solo marque)
			cantidad de cosecha				
			Unidad	cantidad			

13. Sistema de cultivo

Monocultivo ☐

Policultivo ☐

Asocio de cultivos ☐

14. ¿En dónde distribuye o comercializa sus productos agrícolas?: _____

CARACTERISTICAS DEL RIEGO

15. ¿Utiliza riego para el suministro de agua al cultivo?

SI ☐

NO ☐

(Respuesta: No, pase al apartado siguiente)

16. ¿De qué fuente obtiene el agua?: _____

17. ¿Qué tipo de sistema de riego se cuenta? Goteo ☐ Aspersión ☐ otro _____
18. ¿Conoce la calidad de agua utilizada para riego? SI ☐ NO ☐
19. ¿Es importante conocer la calidad del agua para riego? SI ☐ NO ☐ Cual: _____
20. ¿Conoce la cantidad de agua utilizada para el riego? SI ☐ NO ☐

¿Cuál es el consumo de agua por campaña?: _____

21. ¿En qué época del año aplican el riego? (meses): _____

22. ¿Con qué frecuencia riegan?: _____

23. ¿Cuánto dura la aplicación del riego?: _____

CARACTERISTICAS ORGANIZATIVAS

24. ¿Si existiera un proyecto de riego, estaría usted dispuesto a organizarse? SI ☐ NO ☐

25. ¿Es necesaria e importante la organización comunitaria para usted? SI ☐ NO ☐

Por que _____

26. ¿Cuál sería su visión acerca de la organización para el riego?

27. ¿Estaría de acuerdo en implementar un reglamento para el manejo y operación del proyecto? SI ☐ NO ☐

28. ¿Es para usted importante conocer las funciones y responsabilidades cuadros directivos? SI ☐ NO ☐

29. ¿Es para usted importante conocer los derechos y obligaciones de los usuarios? SI ☐ NO ☐

30. ¿Es necesario e importante para usted establecer sanciones por incumplimiento, irresponsabilidad y mal manejo de agua? SI ☐ NO ☐

PARTICIPACIÓN Y PERCEPCION SOBRE EL PROYECTO DE REUSO DE AGUA RESIDUAL

31. ¿Considera que al existir agua para riego se podría diversificar la producción agrícola? SI ☐ NO ☐

32. ¿Que otros cultivos implementaría usted? _____

33. ¿Utilizaría usted el agua residual para irrigación de cultivos agrícolas? SI ☐ NO ☐

34. ¿Estaría dispuesto a participar en un proyecto de irrigación con agua residual tratada? SI ☐ NO ☐

35. ¿Estaría dispuesto a aportar para el proyecto? SI ☐ NO ☐

36. ¿De qué forma aportaría? Mano de obra ☐ dinero ☐ materiales ☐

37. ¿Pagaría por el servicio de agua? SI ☐ NO ☐

38. ¿Podría pagar una cuota para la operación y el mantenimiento del sistema de riego? SI ☐ NO ☐

39. ¿Cuánto podría pagar? Q. _____

40. ¿Estaría dispuesto a consumir productos que provengan de campos irrigados con aguas residuales? SI ☐ NO ☐

Observaciones / comentarios
