



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

ADMINISTRACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LA ISLA  
CLARIÓN

**T E S I N A**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL**

P R E S E N T A :

**ING. DIANA AZUCENA MACÍAS MARTÍNEZ**

DIRECTOR DE TESINA: DRA. ANA ELISA SILVA MARTÍNEZ

MÉXICO, D.F.

ENERO 2016



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



## Agradecimientos

A mi mamá, abuelita y hermana por todos sus esfuerzos, pero en particular por su apoyo, comprensión, paciencia, motivación y cariño para concluir con mis estudios a pesar de todo.

A mis queridos amigos que me han acompañado y motivado en los momentos más críticos y que a pesar de todo siempre han estado de una u otra forma presentes, les agradezco cada momento, cada palabra y cada oportunidad de seguir compartiendo nuestra vida: Raúl Rodríguez e Ian Ibarra.

A los amigos que me han acompañado en las diferentes facetas de la carrera y que en su compañía han enriquecido esta experiencia: Alfredo Galicia, Daniel Santana, Karla Serralde, Sergio Marín, Samantha Cano, Cecilia Chávez, Pedro Sánchez, Edgar Chávez, Jess Rivera, Hugo Santillán, Jorge Castro, Sergio Villar, Sergio Zamorano, Veaney Díaz, Andrea Hernández y Juan Carlos Villaseñor.

A todo el cuerpo docente que tomó parte en mi formación académica, desde las primeras lecturas hasta los proyectos de la facultad, en especial al M.C. Fernando Terán y al M.I. Ricardo C. Díaz, mis principales mentores y guías.

A la Dra. María Nefthalí Rojas Valencia, por todas las enseñanzas y oportunidades que me otorgó en el Instituto de Ingeniería.

A mi asesora Dra. Ana Elisa Silva Martínez y a el almirante Alberto Castro Rosas por extenderme la confianza para realizar este proyecto y por toda la paciencia que tuvo en la guía de este trabajo.

A la Dirección de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Secretaría de Marina por toda la información proporcionada para realizar este trabajo.



## Índice de contenido

1	Introducción	1
	Justificación	2
	Objetivos	4
	1.1.1    Objetivos específicos	4
1.1	Alcances y limitaciones	4
1.1	2	5
1.2	Tecnologías para la desalinización de agua	5
	Destiladores solares	6
2.1	Destilador solar de Vega-Silva	8
2.2		
2.3 <sup>3</sup>	Antecedentes	13
	Marco físico, social y jurídico de la Isla Clarión	13
3.1	3.1.1    Hidrología y climatología	14
	3.1.2    Relieve, geología y pedología	14
	3.1.3    Actividades antropogénicas, infraestructura existente y descripción de los servicios	15
	3.1.4    Naturaleza jurídica de las Áreas Naturales Protegidas (ANP)	17
4.1 <sup>4</sup>	Sistema de abastecimiento de agua potable	21
4.2	Población de proyecto y demanda de agua potable	21
4.3	Demanda de los destiladores	24
4.4	Obra de captación	30
	Cálculos de cargas hidráulicas	36
	4.4.1    Pérdida de carga en la playa	36
	4.4.2    Pérdidas de carga estática	38
4.5	4.4.3    Pérdidas de carga por fricción en conductos a presión	39
4.6	4.4.4    Equipo de bombeo	41
4.7	Potabilización	45
4.8	4.5.1    Calidad del agua	45
	Destiladores modificados Vega-Silva	47
	Manejo de subproductos	51
	Almacenamiento	53

	Desinfección	56
5	Tratamiento de aguas residuales	58
	Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA)	59
	5.1.1 Dimensionamiento del reactor	62
4.9	Filtración	65
5.16	Evaluación económica	67
7	Conclusiones y recomendaciones	69
5.2	Conclusiones	69
	Recomendaciones	70
7.18	Referencias	71
7.29	Anexos	76

## Índice de anexos

Anexo 1.	Detalles del destilador Vega-Silva .....	76
Anexo 2.	Subzonas de amortiguamiento y aprovechamiento de los recursos naturales ....	77
Anexo 3.	Especificaciones técnicas del equipo bombeo .....	79
Anexo 4.	Tubería de impulsión .....	80
Anexo 5.	Tubería de succión.....	81
Anexo 6.	Curva del sistema .....	82
Anexo 7.	Presiones de vapor .....	83
Anexo 8.	Esquema del contenedor de agua salina.....	84
Anexo 9.	Cálculo de sombras en los solsticios .....	85
Anexo 10.	Especificaciones técnicas de purificador de agua por medio de luz UV .....	86
Anexo 11.	Costos .....	87
Anexo 11.	Costos (Continuación) .....	88

## Índice de ilustraciones

Ilustración 1.	Límites marítimos de los Estados Unidos Mexicanos.....	3
Ilustración 2.	Irradiación solar anual .....	6
Ilustración 3.	Destilador solar tipo caseta convencional.....	7
Ilustración 4.	Distribución espectral de la radiación solar .....	9
Ilustración 5.	Capilaridad en las plantas.....	10
Ilustración 6.	Bosquejo del destilador solar Vega-Silva.....	11
Ilustración 7.	Ubicación del área de estudio .....	13
Ilustración 8.	Paisaje de Isla Clarión .....	15

Ilustración 9. Relieve, rasgos hidrológicos y vías de comunicación de la Isla Clarión .....	16
Ilustración 10. Actividades antropogénicas en la Reserva de la Biósfera .....	17
Ilustración 11. Zonificación de la Isla Clarión .....	19
Ilustración 12. Modificaciones a las dimensiones destilador solar Vega-Silva .....	26
Ilustración 13. Concentrador solar parabólico .....	26
Ilustración 14. Elementos relevantes del relieve de la Isla Clarión .....	31
Ilustración 15. Muestreo en las playas B y C .....	33
Ilustración 16. Ruta de la tubería .....	36
Ilustración 17. Equilibrio hidrostático en las costas .....	39
Ilustración 18. Esquema de pozo .....	44
Ilustración 19. Relación entre el plano horizontal local y los rayos solares .....	50
Ilustración 20. Datos para calcular la distancia .....	50
Ilustración 21. Destiladores simples para salmuera .....	52
Ilustración 22. Formación de cristales .....	53
Ilustración 23. Perfil del sistema .....	55
Ilustración 24. Dimensiones de cisterna comercial .....	55
Ilustración 25. Espectro electromagnético .....	56
Ilustración 26. Desinfección con luz UV .....	57
Ilustración 27. Reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA) .....	61
Ilustración 28. Esquema de la campana de separación gas-líquido .....	65
Ilustración 29. RAFA y filtro .....	66
Ilustración 30. Comparativo de tarifas de agua .....	68

## Índice de tablas

Tabla 1. Concentración en el agua destilada y salmuera en los experimentos de Silva .....	11
Tabla 2. Requerimientos básicos de agua para las necesidades humanas .....	22
Tabla 3. Balance de masa de una caseta .....	29
Tabla 4. Composición porcentual del muestreo en la Playa B y C .....	33
Tabla 5. Intervalos de porosidad .....	34
Tabla 6. Conductividad hidráulica y permeabilidad de diferentes granulometrías .....	34
Tabla 7. Comparativo de las concentraciones .....	47
Tabla 8. Comparativo de agua disponible en diferentes escenarios .....	53
Tabla 9. Disposición de agua .....	59

## Índice de gráficos

Gráfico 1. Balance de masa de sales disueltas en una caseta .....	29
Gráfico 2. Balance de masa de agua de una caseta .....	29
Gráfico 3. Comparativo de curvas de rendimiento y curva de sistema .....	41





## Siglas, abreviaturas y acrónimos

<b>ANP</b>	Área Natural Protegida
<b>CCNNSA</b>	Comité Consultivo Nacional de Normalización
<b>CDB</b>	Convenio de Diversidad Biológica
<b>CONAGUA</b>	Comisión Nacional del Agua
<b>CONANP</b>	Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas
<b>CONVEMAR</b>	Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar
<b>DOF</b>	Diario Oficial de la Federación
<b>FAO</b>	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (Food and Agriculture Organization)
<b>IMTA</b>	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
<b>INEGI</b>	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
<b>LAN</b>	Ley de Aguas Nacionales
<b>LGEEPA</b>	Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
<b>NOM</b>	Norma Oficial Mexicana
<b>NT</b>	Norma Técnica
<b>OMS (WHO)</b>	Organización Mundial de la Salud (World Health Organization)
<b>OPS(PAHO)</b>	Organización Panamericana de la Salud (Pan American Health Organization)
<b>POA</b>	Programa Operativo Anual
<b>PROY-LGA</b>	Proyecto de Decreto que expide la Ley General De Aguas
<b>RAFA (UASB)</b>	Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (Upflow Anaerobic Sludge Blankett)
<b>RAMSAR</b>	Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas (Convenio RAMSAR)
<b>SEMAR</b>	Secretaría de Marina
<b>SEMARNAT</b>	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
<b>SENER</b>	Secretaría de Energía
<b>SIMEC</b>	Sistema de Información, Monitoreo y Evaluación para la Conservación
<b>SMN</b>	Servicio Meteorológico Nacional
<b>SRE</b>	Secretaría de Relaciones Exteriores
<b>TIM</b>	Territorio Insular Mexicano
<b>UNESCO</b>	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, Ciencia y Cultura(United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization)
<b>ZEE</b>	Zona Económica Exclusiva



## 1 Introducción

El agua es un recurso vulnerable y esencial en los procesos fundamentales conocidos para sostener la vida y el desarrollo humano en la dinámica del planeta, aunque es una sustancia que se encuentra en abundancia en la Tierra, la disponibilidad mundial promedio anual es de aproximadamente 1,386 billones de  $\text{hm}^3$ , de los cuales el 97.5% es agua salada, y del 2.5% correspondiente al agua dulce, sólo el 30% es accesible para consumo (CONAGUA, 2014), lo cual ha limitado las fuentes de abastecimiento. En los últimos años, la humanidad ha enfrentado una grave crisis de escasez del recurso, esto esencialmente debido a los cambios climáticos, la fuerte demanda para satisfacer las necesidades acordes al aumento de la población, su consumo y producción, y las prácticas inadecuadas que la han contaminado, reduciendo aún más el agua disponible.

Debido a su naturaleza vital, la administración de los recursos hídricos debe basarse en un planteamiento multidimensional e integral (UNESCO, 2003), con la participación de los responsables de las decisiones en todos los niveles: los usuarios, los responsables de los servicios y los servidores públicos, concientizados en un esquema de hábitos, prácticas y políticas de desarrollo que favorezcan una adecuada gestión del agua, la cual incluye la elección y protección de las fuentes, potabilización, distribución, uso, recolección, tratamiento de aguas residuales, disposición y saneamiento, con el fin de asegurar un suministro confiable, con calidad aceptable y que permita una continua expansión. La legislación actual mexicana contempla esta visión ya que establece que la eficiencia de la conservación, preservación, protección y restauración del agua en cantidad y calidad, es un asunto de seguridad nacional y por ende debe evitarse el aprovechamiento no sustentable y los efectos ecológicos adversos, promoviendo su reúso y recirculación (LAN, 1992).

La gestión del agua es un factor clave en la supervivencia y el desarrollo; especialmente en los casos donde el recurso es escaso o remoto, por lo que existe la necesidad de apoyarse en la incorporación de fuentes de abastecimiento y tecnologías alternativas que anteriormente no se consideraban por sus altos costos. Para los pequeños asentamientos aislados, con carencia de agua potable y energía eléctrica y con disponibilidad de agua salobre o salina, la destilación solar es un proceso aplicable (Silva, 2012).

En este trabajo se propone evaluar la viabilidad técnica, legal y económica de establecer un sistema para la administración del agua en instalaciones remotas, presentando como caso de estudio el Apostadero Naval de la Secretaría de Marina (SEMAR) en la Isla Clarión, con el fin de proporcionar agua de consumo y uso doméstico para el personal de la Armada y los visitantes, ya que esta carencia de agua restringe la autonomía operativa del personal en la isla (CONANP-SEMARNAT, 2004)

## Justificación

El Territorio Insular Mexicano (TIM) es un conjunto de más de 2,500 elementos insulares entre las diferentes islas, cayos y arrecifes que abarcan una superficie terrestre de 5,127 km<sup>2</sup> en la zona costera y marina de los Estados Unidos Mexicanos (INEGI, 2015), **1.1** permitiendo que el país ejerza su soberanía territorial más allá de la superficie continental de acuerdo con la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (CONVEMAR, 1982) y su incorporación en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en los artículos 27o y 42o en el que se indica que el Estado ribereño posee plena soberanía sobre la franja del mar hasta el límite de 12 millas náuticas<sup>1</sup> contiguas, denominada mar territorial, incluyendo el espacio aéreo, lecho y subsuelo, y más allá de éste se reconoce un segundo espacio marino conocido como Zona Económica Exclusiva (ZEE), un área que se extiende hasta 200 millas náuticas mar adentro<sup>2</sup>, en la que el Estado tiene derechos soberanos relacionados con la exploración y explotación, conservación y administración de los recursos naturales, tales como la riqueza petrolera y de minerales, la producción de energía derivada del agua, de las corrientes y de los vientos, además del ejercicio de jurisdicción con respecto al establecimiento y utilización de islas artificiales, instalaciones y estructuras, a la investigación científica marina, y a la protección y preservación del medio marino.

La ubicación de las islas más alejadas al continente permiten que los Estados Unidos Mexicanos gocen de una de las ZEE de mayor extensión en el mundo, con una superficie de 3,188,031 km<sup>2</sup>, superficie mayor que el propio territorio continental mexicano de 1,964,375 km<sup>2</sup>; ya que tan sólo las islas oceánicas Guadalupe, Socorro y Clarión, en el Océano Pacífico, contribuyen con más de 800,000 km<sup>2</sup>, el 27% de la superficie total de la ZEE (Comité Asesor Nacional sobre el Territorio Insular Mexicano, 2012).

El TIM es además un irremplazable capital natural en términos de biodiversidad, pues debido a su aislamiento geográfico natural, alberga una gran cantidad de especies de flora y fauna endémicas, únicas en el mundo, que conforman comunidades biológicas exclusivas de las islas (SEMARNAT, 2012), además, las islas son también hogar para 269,236 habitantes distribuidos en 150 islas, incluyendo comunidades pesqueras y urbanas, y personal de la Secretaría de Marina – Armada de México (INEGI, 2011).

El Estado mexicano, al igual que otras naciones con sus propios territorios, ha implementado ciertas estrategias con la finalidad de resguardar y proteger las riquezas concentradas en el TIM, tales como:

---

<sup>1</sup> 1 milla náutica equivale a 1.852 km, por lo que el límite del mar territorial es de 22.224km contiguo a la línea de costa.

<sup>2</sup> La ZEE tiene una extensión de 370.4 km mar adentro.



## **Objetivos**

Desarrollar un plan de manejo de agua con base en abastecimiento de agua de mar y su desalinización por medio de la destilación solar con el sistema Vega-Silva, considerando las circunstancias de la Isla Clarión, perteneciente al Archipiélago de Revillagigedo,

**1.1** considerando desde la captación en la fuente hasta el tratamiento de aguas residuales.

### **1.1.1 Objetivos específicos**

- Determinar el potencial de la destilación solar del método Vega-Silva como tecnología en la desalinización de agua como solución para el abastecimiento de agua de la Isla Clarión y la recuperación de sal.
- Desarrollar un marco físico, social y legal sobre la situación actual de la Isla Clarión, con el fin de determinar los datos de diseño, mediante información pública y la proporcionada por la SEMAR.
- Proponer el diseño conceptual del sistema de abastecimiento y del tratamiento de aguas residuales.
- Determinar el costo del proyecto.

## **1.2**

### **Alcances y limitaciones**

- El sistema que se presenta en este trabajo incluye a los elementos desde la fuente hasta el almacenamiento, tales como la fuente de abastecimiento, obras de captación, líneas de conducción, potabilización, desinfección y almacenamiento previo al consumo, por lo que no están consideradas las redes de distribución ni las instalaciones domésticas.
- Toda la información utilizada es la publicada por diferentes fuentes, no hay datos obtenidos en el campo que nos permitan una mejor adaptación de las tecnologías.
- El desarrollo de este trabajo se desarrolló en un marco estrictamente teórico, con base en diferentes modelos.
- La determinación de los costos es simplificada y sólo se refiere a los valores encontrados en sistemas de mercado de la Ciudad de México, no incluye el transporte a la isla.

## 2 Marco teórico

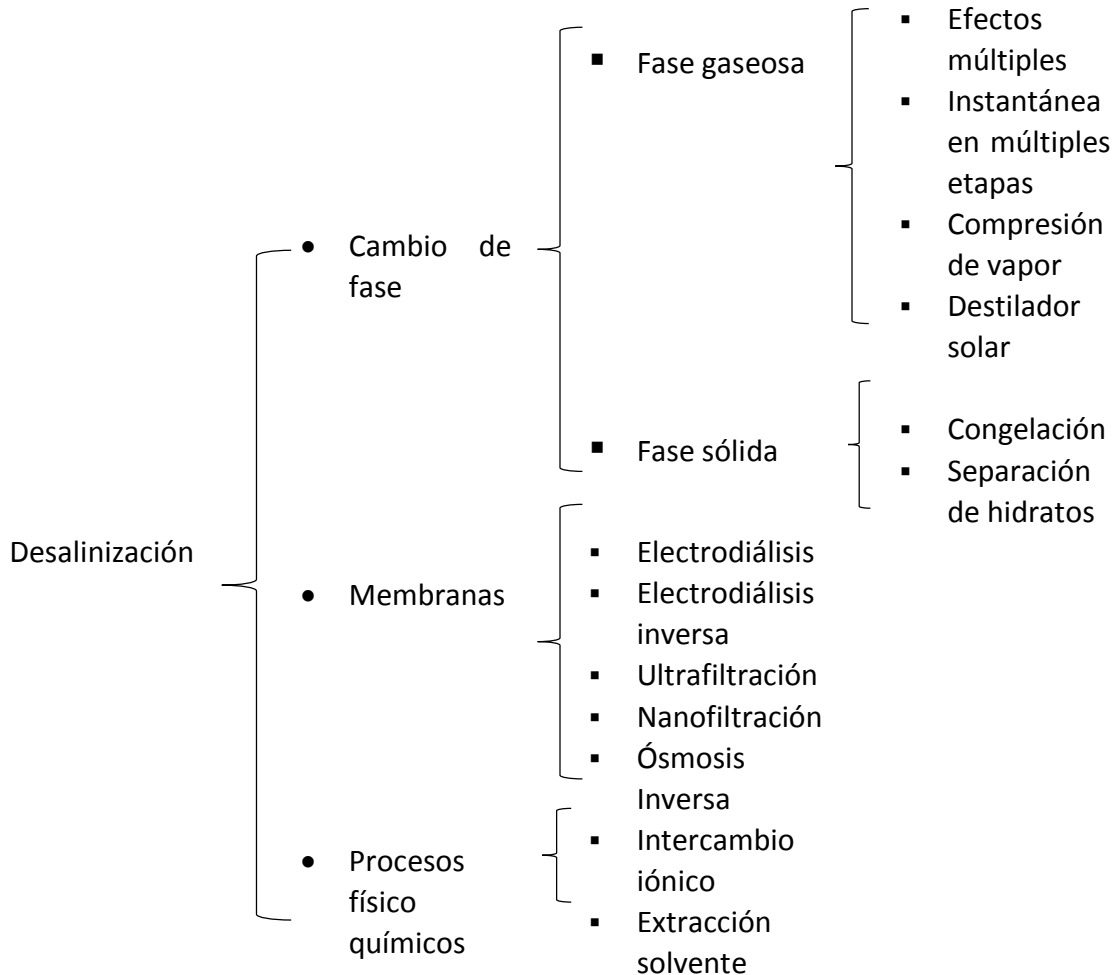
### Tecnologías para la desalinización de agua

Debido a la alta cantidad de sales minerales, el agua de mar no es adecuada para el consumo humano y su ingestión en grandes cantidades puede llegar a provocar serios daños a la salud e inclusive la muerte (OMS, 2007).

#### 2.1

Desde épocas remotas se utilizó la destilación para obtener agua de consumo a partir del agua marina, sin embargo, la gran demanda del recurso ha motivado la necesidad de desarrollar tecnologías cuya producción sea mayor, sobre todo en zonas áridas donde el recurso hídrico superficial o subterráneo es escaso y de mala calidad, como en la Península Ibérica y Medio Oriente, por lo que resulta más redituable hacer uso de recursos energéticos que permitan satisfacer las necesidades de la población.

Los procesos de desalinización pueden clasificarse en:



**Cuadro 1. Principales tecnologías de desalinización de agua**

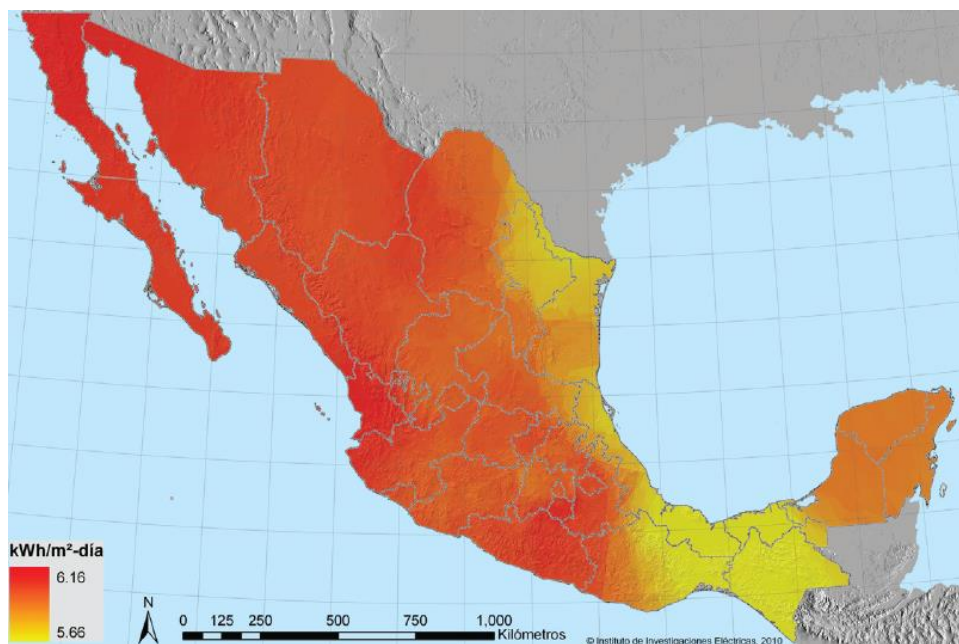
Fuente: Elaboración propia con base en los trabajos de Silva, 2013 y Dwayne, 2014



Hasta el momento los Estados Unidos Mexicanos no han incursionado mucho con este tipo de tecnologías, en el 2007 el IMTA contaba con un inventario nacional de 435 plantas desalinizadoras distribuidas en México, siendo la entidad federativa con mayor número de plantas desalinizadoras el estado de Quintana Roo seguido por Baja California Sur.

### Destiladores solares

2.2 En las zonas áridas con radiaciones solares medias anuales entre 4 a 6 kW/m<sup>2</sup>, generalmente hay problemas de escasez o salinidad en el agua, esto hace que el uso de sistemas de desalinización solares sea una alternativa para un proceso de producción de agua potable práctico y sostenible (Chaibi, 2013).



**Ilustración 2. Irradiación solar anual**  
**Fuente: SENER, Instituto de Investigaciones Eléctricas, 2010**

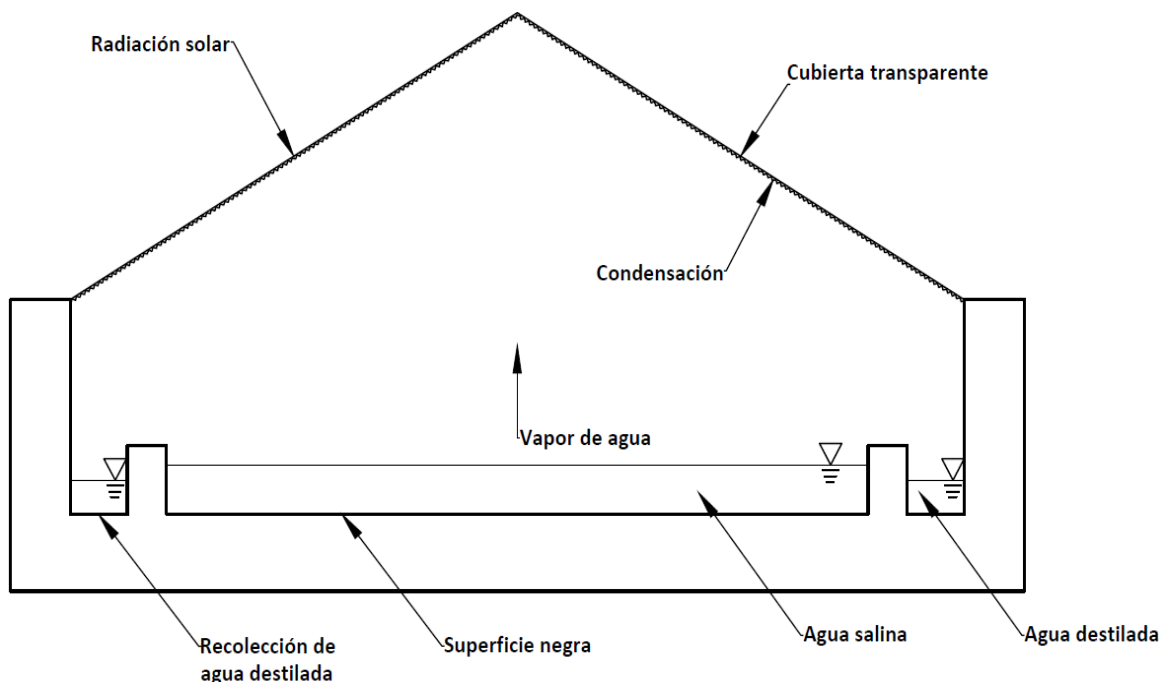
Los Estados Unidos Mexicanos reciben una irradiación<sup>3</sup> solar del orden de 5.66 a 6.16kW/m<sup>2</sup>, lo que hace al territorio nacional un excelente candidato para adoptar soluciones energéticas basadas en la energía solar, tales como paneles fotovoltaicos, calentadores y destiladores solares.

El proceso más simple para desalinizar agua es la destilación (Silva, 2012), la cual aprovecha los diferentes puntos de evaporación de los componentes de una mezcla homogénea para separarlos, este proceso de potabilización de agua aprovecha en pequeña escala las etapas de evaporación, condensación y precipitación del ciclo

<sup>3</sup> La irradiación es la energía radiante por unidad de tiempo que incide sobre una superficie.

hidrológico, donde la radiación solar que recibe el planeta y que no es absorbida por la atmósfera, es suficiente energía para que se dé la transferencia del agua desde la superficie de la Tierra hacia la atmósfera en forma de vapor por medio de los procesos evaporación y transpiración de las plantas (este fenómeno también es conocido como evapotranspiración). El vapor de agua es transportado por la circulación atmosférica y se condensa, dando lugar a la formación de nieblas y nubes y, posteriormente, se precipite en forma de lluvia, granizo o nieve (Fattorrelli, 2011).

La destilación solar en casetas convencionales es un proceso que aplica el efecto invernadero en un espacio parcialmente confinado, el cual consiste en un contenedor con fondo de color negro en donde se vierte el agua salada que se va a destilar. El contenedor se cubre con una superficie transparente que retiene la humedad pero permite pasar la radiación solar. La energía restante a la que haya sido absorbida o reflejada por la materia en el medio eleva la temperatura del recipiente, del agua contenida y del aire en el interior del destilador, creando una atmósfera muy cálida y saturada de humedad. El vapor de agua se condensa al entrar en contacto con la cara interior de la cubierta que tiene menor temperatura y se forman pequeñas gotas de agua destilada que se deslizan siguiendo la pendiente de la cubierta, para ser colectadas en los depósitos de almacenamiento de agua.



**Ilustración 3. Destilador solar tipo caseta convencional**  
Fuente: Modificado <http://www.cubasolar.cu/>

## Destilador solar de Vega-Silva

2.3

La destilación solar es un proceso atractivo para comunidades remotas que no cuentan o están muy limitadas en el suministro de energéticos, sin embargo, esta tecnología requiere una gran área superficial, ya que el rendimiento relativo a la cantidad de agua tratada en un intervalo de tiempo específico es mucho menor a los sistemas de desalinización con uso de membranas.

El diseño Vega-Silva es una variación del destilador solar tradicional, en el cual el propósito fundamental es incrementar el potencial de la destilación solar, aplicando el principio de evapotranspiración de las plantas, extrapolándolo en materiales porosos con el fin de evitar la toxicidad del agua salina a las plantas (Silva, 2012).

La evapotranspiración es la combinación de dos procesos separados por los que el agua se separa de la superficie del suelo, la evaporación y la transpiración, el primero es el cambio de fase del agua líquida a vapor a temperatura ambiente, retirándose de la superficie evaporante, y el segundo es la conducción de agua por los conductos capilares hasta las hojas para su remoción a la atmósfera (Allen, 2006).

La fuerza impulsora para retirar el vapor de agua de una superficie proviene de la diferencia entre la presión del vapor de agua en la superficie y la presión de vapor de agua de la atmósfera circundante, la radiación solar directa y la temperatura ambiente del aire como lo muestra la ecuación de Dunkle.

$$h_{cv} = 0.884 \left[ T_s - T_g + \frac{(P_{vs} - P_{vg})(T_w + 273)}{268.9 * 10^3 - P_{vs}} \right]^{1/3} \quad (1)$$

**Ec. Dunkle**

Donde:

$h_{cv}$ , es el coeficiente de transferencia de calor convectivo, en  $[W/m^2K]$

$T_s$ , es la temperatura absoluta del agua  $[K]$

$T_g$ , es la temperatura absoluta del techo  $[K]$

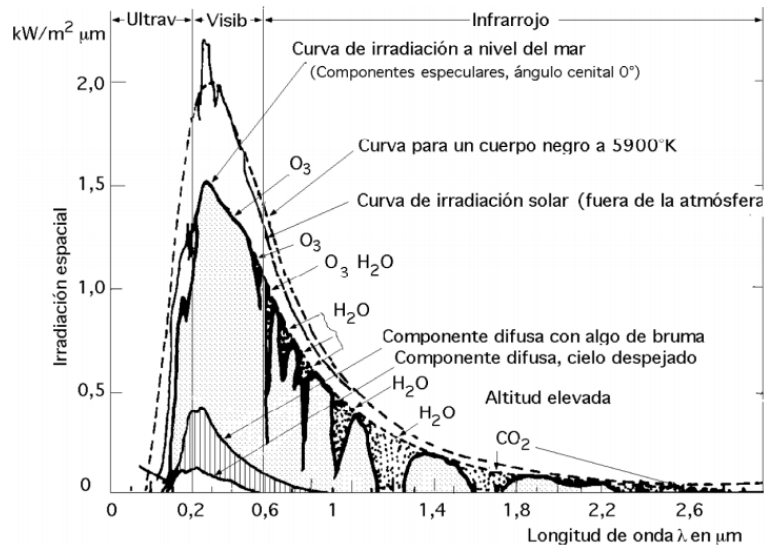
$P_{vs}$ , es la presión de vapor del agua  $[Pa]$

$P_{vg}$ , es la presión de vapor de agua en el techo  $[Pa]$

$T_w$ , es la temperatura absoluta del destilado  $[K]$

Para modelar el el incremento de temperatura de un objeto mediante radiación proveniente del Sol, se le debe considerar una fuente puntual de calor, y con base en el hecho de que casi 1350 J de energía proveniente de él llegan a la atmósfera de la Tierra

por segundo por metro cuadrado de área, sin embargo mucha de ésta energía es absorbida por la atmósfera antes de llegar al suelo terrestre, como se ve en la ilustración 4.



**Ilustración 4. Distribución espectral de la radiación solar**  
**Fuente: <http://es.pfernandezdiez.es>**

La emisividad  $e$ , es un valor característico del material de la superficie radiada, su valor depende de la relación entre la radiación recibida y la emitida.

La temperatura potencial de las paredes  $T_g$  de la caseta se puede despejar de la ecuación que calcula la tasa de flujo neto de radiación de calor como se muestra a continuación:

$$T_g = \left[ \frac{\Delta_{atm} * C_s * e * A * \cos \psi}{\sigma} + T_{amb}^4 \right]^{1/4} \quad (2)$$

$\Delta_{atm}$ , es el porcentaje de absorción de la energía radiante por la atmósfera, 70%

$C_s$ , es la constante solar,

considera que 1350 J/sm<sup>2</sup> provienen del Sol llegan a la atmósfera

$e$ , es la emisividad de la superficie,  $0 < e < 1$

$A$ , es el área radiada

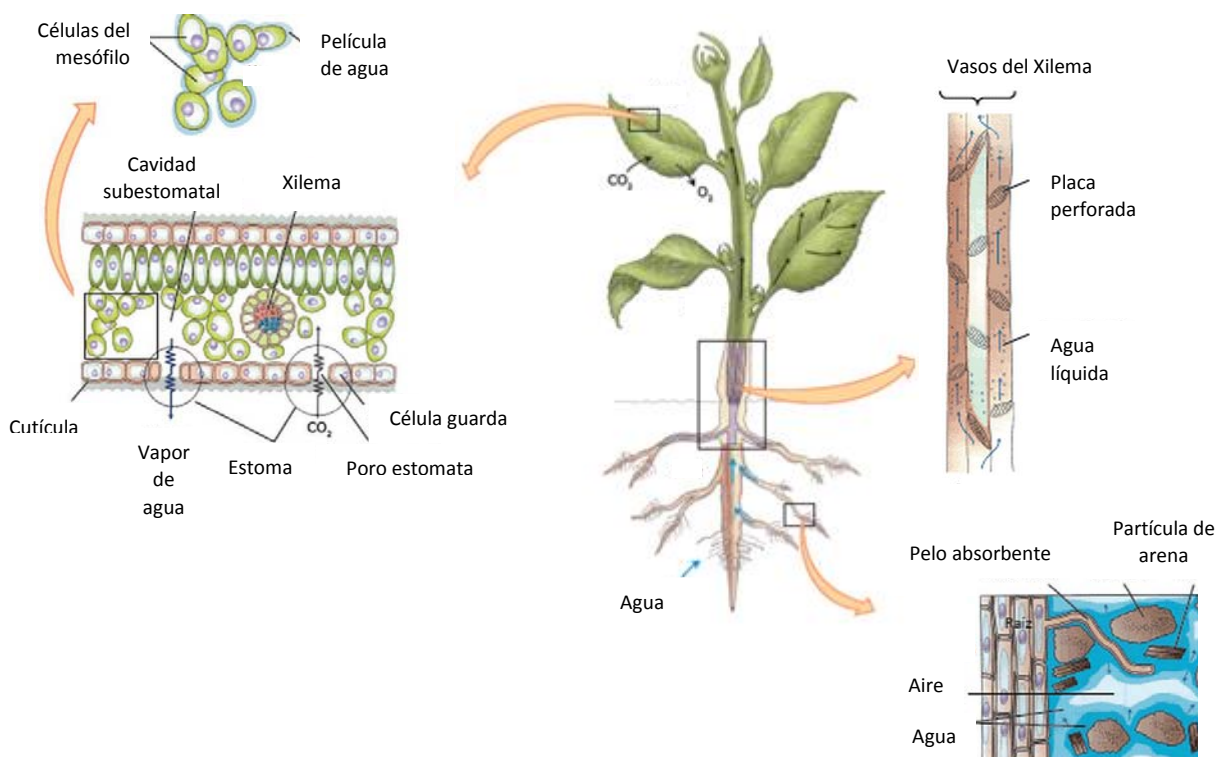
$\sigma$ , es la constante universal Stefan – Boltzman,

con valor de  $5.67 * 10^{-8} W/m^2K^4$

$\psi$ , ángulo que forma la dirección de la energía radiante y la superficie

$T_{amb}$ , es la temperatura ambiente en K

Para extrapolar el efecto de transpiración de las plantas a un material poroso, en este caso a una tela, se debe entender que las moléculas de un líquido que está limitado por una pared son atraídas por las fuerzas del medio superior y por las de la propia pared, si las fuerzas de la pared son mayores que las de las moléculas vecinas de líquido, este se extenderá sobre la pared, mojándola (Sotelo, 1997), este hecho está determinado por la intensidad relativa de las fuerzas cohesivas entre las moléculas del líquido comparadas con las fuerzas adhesivas entre las moléculas del líquido y el contenedor; en tubos con diámetros muy pequeños, se observa que los líquidos se elevan o caen en relación a la tensión superficial<sup>4</sup> (Giancoli, 2006), a este fenómeno se le conoce como capilaridad y es el mismo que las plantas utilizan para absorber agua desde las raíces.



**Ilustración 5. Capilaridad en las plantas**

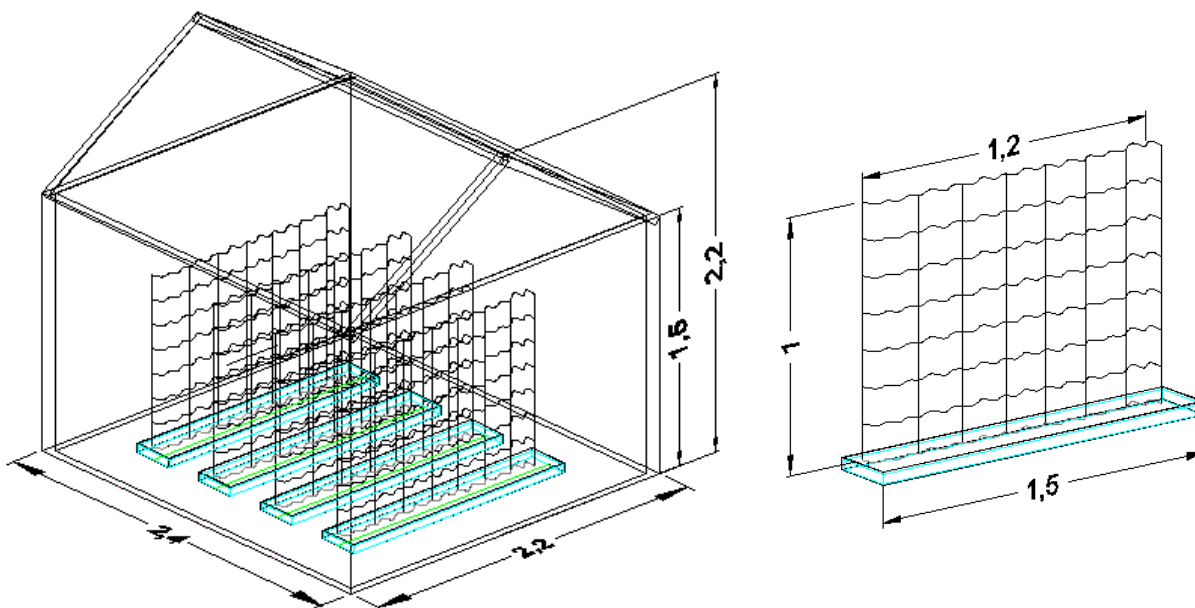
**Fuente:** [www.cenicana.org/publicaciones/carta\\_trimestral/ct2009/ct3y4\\_0918.php](http://www.cenicana.org/publicaciones/carta_trimestral/ct2009/ct3y4_0918.php)

El destilador Vega-Silva consta de una caseta tipo invernadero, orientada con dirección de incidencia solar este-oeste, de policarbonato de 4mm de espesor, con un largo de 2.4m, ancho de 2.2m, altura de pared vertical 1.5m y altura al vértice del techo 2.2m, en el techo el ángulo de escurrimiento es de 30° con el terreno; en el interior se colocan cuatro

<sup>4</sup> La fuerza por unidad de longitud que actúa de forma perpendicular a cualquier corte en una superficie líquida y tiende a jalar a la superficie encerrada (Giancoli, 2006)

canaletas para contener el agua a destilar, con dimensiones de 1.5 m de largo por 0.25 m de ancho con una profundidad de 0.04 m y un bordo libre de 0.01 m, para contar con un volumen individual de 15 litros y un volumen global de 60 litros por caseta de desalinización, véase anexo 1 (Silva, 2012).

En los trabajos realizados por Silva (2012) se detrmínó el uso de cuatro lienzos de tela de algodón blanca de 1.2m de largo y 1m de ancho, para utilizarlos como medios porosos para incrementar la producción, por área superficial, en los trabajos de López (2014) se estableció una producción promedio de 3.56 l y una máxima de 5.5 l por área unitaria de caseta para las condiciones de la Ciudad de México.



**Ilustración 6. Bosquejo del destilador solar Vega-Silva**  
Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos por este método de destilación son los siguientes:

Concentración de sal, [mg/l]		
Inicial	Agua destilada	Salmuera
10,000	25	20,000
35,000	60	60,000
150,000	450	310,00

**Tabla 1. Concentración en el agua destilada y salmuera en los experimentos de Silva**  
Fuente: Silva, 2012

En la metodología original de Silva se desarrolló un número adimensional, que se denominó  $N_{VS}$  (Número Vega-Silva) para calcular la producción de agua obtenida en un destilador solar, con la finalidad de agrupar las diferentes variables, con el uso del sistema internacional de unidades, los resultados obtenidos mostraron que con el uso de  $N_{VS}$ , es posible calcular la producción de agua potable en diferentes zonas geográficas considerando las particularidades del lugar, como la radiación solar, la temperatura ambiente y la concentración de sales en el agua.

$$N_{VS} = \frac{Q_E}{A_{se} \Delta T^{1/3} h_{cv}^{1/3} C_w^{2/3}} \quad (3)$$

Donde:

$N_{VS}$ , es el Número Vega – Siva

$Q_E$ , es el caudal de producción de agua destilada en kg/d

$A_{se}$ , es el área superficial de evaporación en  $m^2$

$\Delta T$ , es la diferencia de temperatura del aire en el interior de la caseta y del agua en K

$h_{cv}$ , es el coeficiente de transferencia de calor convectivo en  $W/m^2K$

$C_w$ , es la concentración de sal en el agua en  $kg/m^3$



### 3 Antecedentes

#### Marco físico, social y jurídico de la Isla Clarión

La Reserva de la Biósfera y Área Natural Protegida Archipiélago de Revillagigedo se localiza en el Océano Pacífico a 382.7 km de Cabo San Lucas, Baja California Sur y a 661.6 km de

#### 3.1 Manzanillo, Colima y está integrada por cuatro islas:

- Isla Socorro o Santo Tomás o Juárez
- Isla Clarión o Santa Rosa
- Isla San Benedicto
- Isla Roca Partida

La Isla Clarión es el territorio insular mexicano más alejado del continente, su coordenada central es 18° 47' N de latitud norte y a los 110° 59' de longitud oeste (RAMSAR, 2015), tiene una extensión superficial total de 636,685.38 ha, de las cuales 15,383.37 ha son terrestres (SIMEC, 2015), la isla tiene 8.5 km de largo por 3.5 km en su parte más ancha. La zona habitada más cercana a ella es la Isla Socorro a 250 km al oeste.



**Ilustración 7. Ubicación del área de estudio**  
**Fuente: SEMARNAT, 2010**



### **3.1.1 Hidrología y climatología**

El clima de la región es considerado como seco, clasificado como BW (h') w(i') de acuerdo con la clasificación de Köppen modificada, para adaptarla a las condiciones de la República Mexicana, la temperatura media anual es de 22 °C, la del mes más frío es superior a 18 °C (CONANP-SEMARNAT, 2004).

En la Isla Clarión son prácticamente inexistentes los cuerpos de agua dulce, debido a la estacionalidad de las lluvias, al carácter permeable de las rocas y a la alta evaporación; razones por las cuales no hay escurrimientos superficiales permanentes, la red fluvial de Isla Clarión es predominantemente radial-centrífuga a las lagunas saladas “UNAM” y “Colegio de Geografía”, compuesta por diez corrientes estacionarias durante las lluvias en verano, cuando la precipitación media es de 61.4 mm (RAMSAR, 2015). La precipitación media anual del ANP apenas es de 313.8 mm y la humedad relativa anual promedio de 76.5%, mientras que en los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre se registra una humedad relativa mayor. Los huracanes presentan una estacionalidad bien marcada, por lo que se puede señalar que es peligrosa la navegación en las inmediaciones de las islas que integran el archipiélago entre los meses de junio y noviembre (CONANP-SEMARNAT, 2004).

### **3.1.2 Relieve, geología y pedología**

La Isla Clarión fue la primera del archipiélago en formarse por las condiciones volcánicas de la zona, en ella se elevan tres altos principales, al oeste el Monte Gallegos con 335 m, en el centro el Monte de la Marina con 280 m y al este el Pico de la Tienda de Campaña con 292 m de altitud respectivamente, contrastantes ante la única depresión con conexión al mar, la llamada Bahía Azufre. En el norte se encuentra una cordillera de acantilados que convergen en la llanura, la cual se extiende desde la colina norte hasta el extremo sur, terminando en dos playas arenosas rodeadas de riscos verticales y separadas por un cono volcánico inactivo. El litoral de la Isla Clarión está constituido en su mayoría por acantilados que van desde 1.50 hasta 30 m de altura en el extremo suroeste, el resto son playas en una extensión aproximada de 3.5 km (Márquez, Morales, 1987).

La presencia de rocas está predominada depósitos de sílice, traquitas, tobas, basaltos, y retinitas, escoria roja en las partes bajas, arenas y cenizas volcánicas (Bryan, 1967); los suelos son totalmente de origen volcánico, color pardo rojizo, integrado por basaltos, cenizas, arena y una capa muy fina de humus, el cual es adecuado para el establecimiento de gramíneas y vegetación arbustiva de matorral (CONANP-SEMARNAT, 2004).



**Ilustración 8. Paisaje de Isla Clarión**

**Imagen: José Roberto Sosa-López Fuente: [neotropical.birds.cornell.edu](http://neotropical.birds.cornell.edu), 2007**

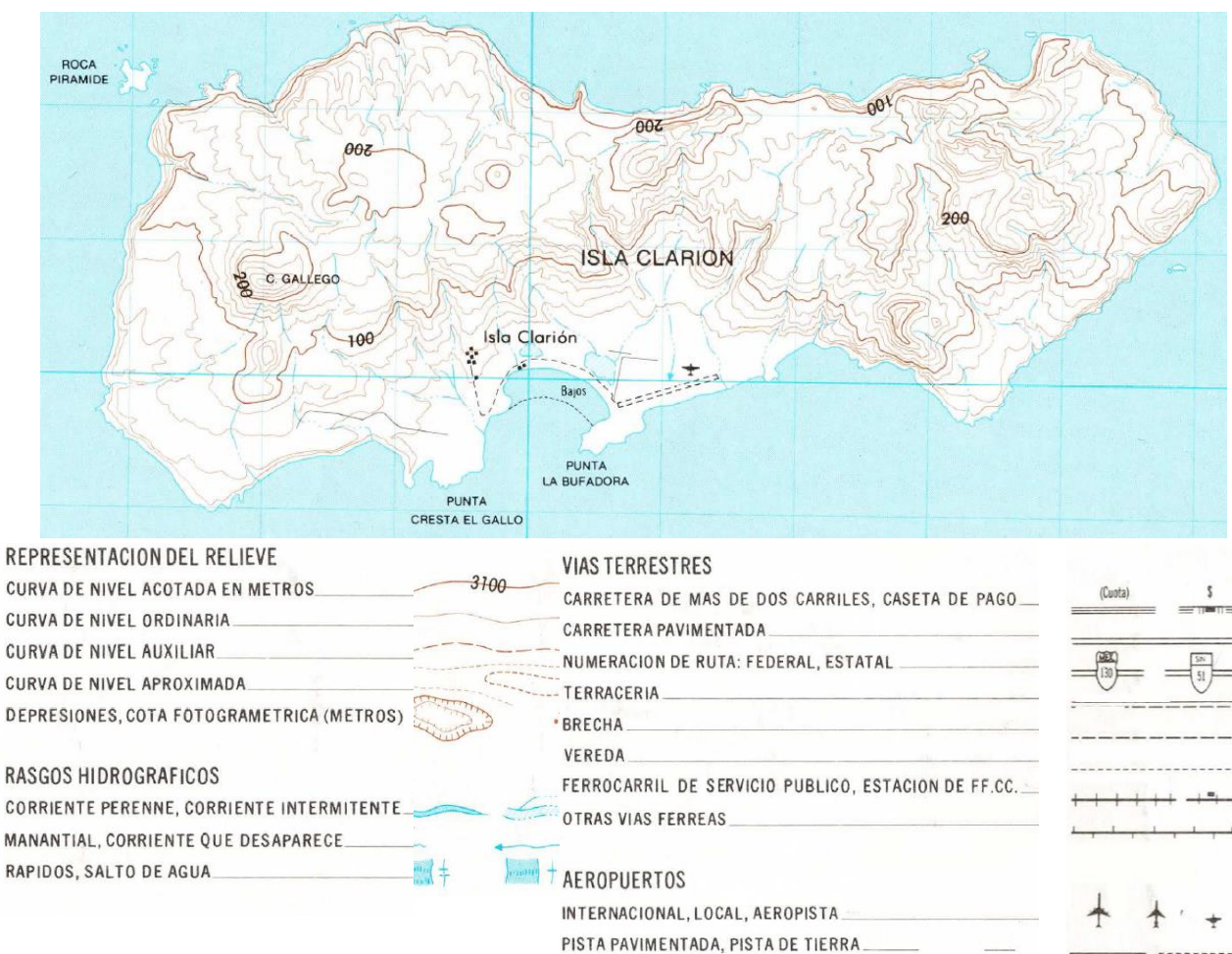
### **3.1.3 Actividades antropogénicas, infraestructura existente y descripción de los servicios**

Desde el año 1790 las islas han sido habitadas de manera ocasional por exploradores, pescadores e investigadores, y a partir de 1957 por personal de la SEMAR, que instaló en Isla Clarión un apostadero naval, que tiene su sede en Manzanillo, Colima (DOF, 2007).

En 1994, en el Decreto Presidencial de Creación del ANP señala específicamente que no se autorizará la fundación de nuevos centros de población dentro de la reserva; lo anterior obedece a que el territorio insular terrestre constituye parte de las zonas núcleo de la misma, además de ser consideradas de alto valor estratégico por la SEMAR, las condiciones físicas de la reserva no permiten sustentar el establecimiento de nuevos centros de población, principalmente por la lejanía del continente, carencia de agua dulce, materiales de mala calidad para la construcción de infraestructura y suelos no aptos para sustentar actividades agrícolas (CONANP-SEMARNAT, 2004).

En la Isla Clarión no hay población instalada permanentemente, las únicas instalaciones existentes son las de la SEMAR para albergar hasta a medio centenar de personas, un pequeño fondeadero, una helipista y los caminos y senderos que unen a éstos y los que sirven para circular en el área (CONANP-SEMARNAT, 2004). Se tiene, además, una estación

de radio sondeo meteorológico enlazada a la red internacional meteorológica y un sistema de comunicación vía satélite, cuya clave OMM ES 76639 (SMN, 2015).



**Ilustración 9. Relieve, rasgos hidrológicos y vías de comunicación de la Isla Clarión**  
Fuente: INEGI, 1992

La isla se puede visitar para investigación y realización de actividades turístico-recreativas dentro de la reserva, la temporada para visitas será exclusivamente del mes de noviembre a julio de cada año, siempre y cuando las condiciones climáticas lo permitan (CONANP-SEMARNAT, 2004).

Las actividades agropecuarias y de aprovechamiento de recursos naturales no están permitidas en la reserva, por lo que el abasto de suministros es por medio de los transportes de la SEMAR; el manejo de los desechos orgánicos e inorgánicos producto de la actividad antropogénica, consiste en incineración y confinamiento en sitios específicos para su posterior disposición final en el continente.

Las únicas actividades permitidas serán las que desarrollen las SEMAR y SEMARNAT, para llevar a cabo las labores de vigilancia y las propias de su ramo, y las que realicen los investigadores para el desarrollo de proyectos científicos autorizados previamente por la SEMARNAT, fundamentalmente de tipo ecológico, así como actividades de visita con fines académicos (SEMARNAT, 2007).

El subsector naval está facultado por la Secretaría de Marina para el desarrollo de operaciones establecidas por la Ley Federal del Mar y la Ley Orgánica de la Armada de México, como las acciones de vigilancia y supresión de narcotráfico, tráfico ilegal de armas, contrabando de productos marinos, además de la salvaguarda de la vida humana en el mar y la soberanía del territorio nacional, como también las funciones de mantenimiento de instalaciones y las propias del ámbito militar.



**Ilustración 10. Actividades antropogénicas en la Reserva de la Biósfera**  
Imágenes: Eduardo Jiménez Fuente: [www.excelsior.com.mx](http://www.excelsior.com.mx), 2011

#### **3.1.4 Naturaleza jurídica de las Áreas Naturales Protegidas (ANP)**

Acorde con la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección del Ambiente (LGEEPA, 1988) las ANP son aquellas zonas del territorio nacional donde se ejerce la soberanía y jurisdicción mexicana, en donde los ambientes originales no han sido significativamente alterados por la actividades antropogénicas o que requieren ser preservadas y restauradas.

Asimismo se establece que quienes pretendan llevar a cabo la realización de obras y actividades en ANP de competencia de la Federación, requerirán previamente la autorización en materia de impacto ambiental que es el procedimiento a través del cual la SEMARNAT, que establecerá las condiciones a que se sujetará un proyecto, a fin de



evitar ó reducir al mínimo sus efectos negativos sobre el medio ambiente; en el caso particular de la Isla Clarión no es suficiente con la aprobación de esta secretaría, ya que para la realización de cualquier actividad en estas zonas, se deberá contar con el permiso que expidan la SEMARNAT, SEMAR y SAGARPA, en el ámbito de sus respectivas competencias (Comité Asesor Nacional sobre el Territorio Insular Mexicano, 2012).

Las ANP son divididas por la zonificación y subzonificación, con el fin de ordenar el territorio en función del grado de conservación y representatividad de sus ecosistemas, acorde con sus elementos biológicos, físicos y socioeconómicos, la vocación natural del terreno, de su uso actual y potencial, y establecer las zonas núcleo y de amortiguamiento (LGEEPA, 1988). Las zonas núcleo, tendrán como principal objetivo la preservación de los ecosistemas, en donde se podrán autorizar las actividades de preservación de los ecosistemas y sus elementos, de investigación y de colecta científica, educación ambiental, y limitarse o prohibirse aprovechamientos que alteren los ecosistemas (CONANP-SEMARNAT, 2004).

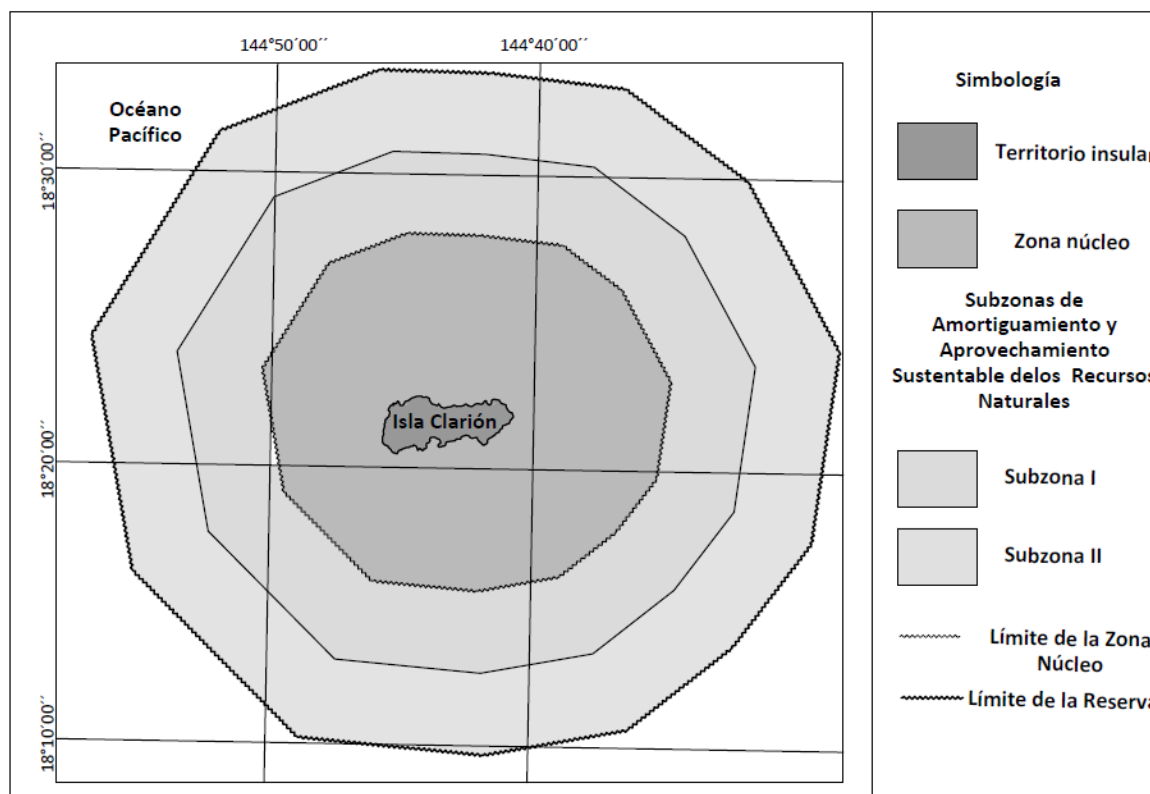
El artículo 49o de la LGEEPA establece que en las zonas núcleo de las áreas naturales protegidas quedará expresamente prohibido:

“

- I. *Verter o descargar contaminantes en el suelo, subsuelo y cualquier clase de cauce, vaso o acuífero, así como desarrollar cualquier actividad contaminante;*
- II. *Interrumpir, rellenar, desecar o desviar los flujos hidráulicos;*
- III. *Realizar actividades cinegéticas o de explotación y aprovechamiento de especies de flora y fauna silvestre y extracción de tierra de monte y su cubierta vegetal;*
- IV. *Introducir ejemplares o poblaciones exóticas de la vida silvestre, así como organismos genéticamente modificados, y*
- V. *Ejecutar acciones que contravengan lo dispuesto por esta Ley, la declaratoria respectiva y las demás disposiciones que de ellas se deriven.*

“

Las zonas de amortiguamiento, tendrán como función principal orientar a que las actividades de aprovechamiento, que ahí se lleven a cabo, se conduzcan hacia el desarrollo sustentable, creando al mismo tiempo las condiciones necesarias para lograr la conservación de los ecosistemas de ésta a largo plazo, y podrán estar conformadas básicamente por subzonas establecidas en el anexo 2.



**Ilustración 11. Zonificación de la Isla Clarión**  
**Fuente: Modificado de CONANP-SEMARNAT, 2004**

Debido a que en el Archipiélago de Revillagigedo sólo está presente personal de la SEMAR y no existen actividades de agricultura, ganadería o aprovechamientos forestales, el ordenamiento ecológico del territorio no resulta necesario en esta área, sin embargo, existe un instrumento de planeación a corto plazo de la reserva denominado Programa Operativo Anual (POA); a través del cual se expresan los objetivos y metas a alcanzar en un período anual en el cual se pretende:

- Construir las instalaciones que sean indispensables para el funcionamiento de la reserva, procurando que éstas sean mínimas y que provoquen el menor impacto a los ecosistemas del área.

- Acondicionamiento de infraestructura e instalaciones para monitoreo y vigilancia en islas Socorro y Clarión, así como para el almacenamiento de agua y combustible para las embarcaciones de vigilancia.
- Construcción de infraestructura necesaria para viveros, control y recuperación de suelos.

Para fines del área en la que están las instalaciones del apostadero naval que se ubica en la zona núcleo, la matriz de zonificación especifica que las actividades prohibidas son:

- Actividades pecuarias y agrícolas
- Introducción de especies exóticas
- Cacería de especies silvestres
- Desarrollar actividades contaminantes
- Usar explosivos
- Nuevos centros de población

## 4 Sistema de abastecimiento de agua potable

El sistema de abastecimiento de agua potable se compone de varios elementos que en su conjunto tienen el objetivo de proporcionar agua continua en cantidad, calidad y presión adecuadas para el uso y consumo humano. El sistema que se presenta en este trabajo, por las particularidades de ser un sistema hidráulico con un solo consumidor tipo doméstico, sólo se refiere a los elementos propios desde la fuente hasta el almacenamiento previo al consumo, por lo que no están consideradas las redes de distribución ni las instalaciones domésticas porque ya existen, por lo que sólo incluye:

- Fuente de abastecimiento
- Obras de captación
- Líneas de conducción
- Potabilización
- Desinfección
- Almacenamiento

Para diseñar y dimensionar cada uno de los elementos que integran el sistema, se requirió determinar la demanda de agua con base en a la población que requiere el servicio y las condiciones de producción de los destiladores solares.

### 4.1 Población de proyecto y demanda de agua potable

La población de proyecto es la cantidad de usuarios que se espera que demanden cierto servicio en una localidad al final del período de diseño, calculado por proyecciones de población basada en datos censales (NT-011-CNA-2001), este proyecto en particular no requiere hacer las proyecciones de población, ya que se prohíben los nuevos centros de población y el sitio de estudio es tan remoto que no se espera que haya migración, ya que la isla solo puede ser habitada por el personal de la marina asignado y los visitantes ocasionales autorizados a hospedarse. No hay un registro oficial donde se determine la población de la Reserva, la CONANP-SEMARNAT indican que las instalaciones tienen una capacidad para cincuenta personas; por otro lado, fuentes de información extraoficiales indican que la isla está habitada regularmente por diez a quince personas, por lo que se estima una población de diseño de:

***Población = 50 habitantes***

El agua de uso doméstico es aquella con fines de consumo, higiene personal y preparación de los alimentos (OMS, 2003), la cantidad necesaria estrictamente para estas actividades puede variar desde quince (Sphere, 2015) hasta cincuenta litros por persona diarios (Gleik,



1996) como se muestra en la tabla 2, aunque los consumos de agua varían con diferentes factores que afectan al medio de estudio (César, 1990), tales como:

- Cantidad de agua disponible y suficiencia del servicio
- Tamaño de la población
- Características de la población
- Clima
- Nivel económico
- Clase de abastecimiento y su intermitencia en el servicio
- Calidad del agua
- Presión en las redes
- Control del consumo
- Precio del agua
- Existencia del alcantarillado sanitario

Una persona requiere para su supervivencia al día al menos dos litros, pero las necesidades de agua van más allá del consumo por los usos y hábitos de limpieza. En México, los consumos individuales son mayores a 100 litros por habitante al día, lo que limita severamente el proceso en estudio por el área de terreno requerida por los conceptos básicos de los destiladores.

<b>Propósito</b>	<b>Mínimo recomendado [l/hab d]</b>	<b>Rango [l/hab d]</b>
<b>Bebida</b>	5	2 a 5
<b>Servicios sanitarios</b>	20	0 a más 75
<b>Baño y aseo personal</b>	15	5 a 70
<b>Preparación de alimentos</b>	10	10 a 50
<b>Total recomendado</b>	50	

**Tabla 2. Requerimientos básicos de agua para las necesidades humanas**  
Fuente: Gleik, 1996

En el Proyecto de Decreto de la Ley General de Aguas, se establece como obligación de la Federación, estados, Distrito Federal y municipios garantizar tanto el derecho humano al agua como el derecho a la disposición, contemplando la necesidad al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible; esta ley introduce y define el término *mínimo vital*, que es el volumen de agua para consumo personal y doméstico que se otorga con la periodicidad que permite al individuo cubrir sus necesidades básicas que corresponde a 50 litros diarios por persona, los cuales deben estar al alcance físico y seguro, por lo que se debe encontrar en las cercanías inmediatas de cada hogar, institución educativa o lugar de trabajo,

además de satisfacer la necesidad de las zonas rurales y urbanas desfavorecidas, víctimas de desastres naturales, así como a las personas que viven en zonas áridas y semiáridas (PROY-LGA, 2015), como es el caso de la Isla Clarión.

$$\text{Consumo} = 50 \frac{l}{\text{hab} * d}$$

El diseño se basará en la demanda tanto en el periodo de operaciones normales sin visitas, la cual se determinará con la siguiente operación:

$$\text{Demanda} = (\text{Población} * \text{Consumo}) + \text{Pérdidas físicas} \quad (4)$$

Las pérdidas físicas es un término utilizado para referirse al agua que no llega a su destino por deficiencias en el sistema de abastecimiento, las cuales se deben a diferentes causas, tales como la presión, el proceso constructivo, los años de servicio y el mantenimiento, la calidad y tipo de los materiales y piezas especiales, e inclusive por el clandestinaje.

Como el sistema aún se está diseñando, en los manuales de diseño publicados por CONAGUA recomienda a los proyectistas considerar un valor promedio de una o varias localidades similares, para fines de este trabajo se considerará:

$$\text{Pérdidas físicas} = 28.5\% \text{Dotación} \quad (5)$$

Para el cálculo de la dotación, definido como la cantidad asignada de agua por persona, se considera el consumo de los servicios dependiendo de su nivel socio-económico y el clima, además de las pérdidas físicas de agua.

$$\text{Dotación} = \text{Consumo} + \text{Pérdida física} = 70 \frac{l}{\text{hab} * d} \quad (6)$$

Para determinar la cantidad de agua diaria necesaria para satisfacer las necesidades domésticas de los habitantes considerando las posibles fallas del sistema se calcula la demanda.

$$\begin{aligned} \text{Demanda} &= \left( 50 \text{hab} * 50 \frac{l}{\text{hab} * d} \right) + 0.4 \left( 50 \text{hab} * 50 \frac{l}{\text{hab} * d} \right) \\ &= 3,500 \frac{l}{d} \end{aligned} \quad \text{De (4)}$$

El gasto medio es el requerimiento de una población en un día de consumo promedio, en este caso, se calcula considerando una población de cincuenta personas que son las asignadas a habitar la isla.

$$Q_{medio} = \frac{\text{Dotación} * \text{Población}}{86,400} = \frac{70 \frac{l}{hab * d} * 50hab}{86,400 s/d} = 0.0405 \frac{l}{s} \quad (7)$$

El gasto máximo diario es el requerido para satisfacer las necesidades de los usuarios en un día máximo de consumo, y se calcula con base en el gasto medio, usando el coeficiente de variación diaria, el cual se obtiene de un estudio de demandas en poblaciones similares durante el año, en donde en general la máxima demanda se da en los meses más calurosos del año, por los usos y hábitos de los usuarios. El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) sugiere que el aumento de la demanda es de aproximadamente de 40% a través de un coeficiente de variación diaria  $CV_d = 1.4$ .

$$Q_{Md} = CV_d * Q_{medio} = 1.4 * 0.0405 \frac{l}{s} = 0.0567 \frac{l}{s} \quad (8)$$

El gasto máximo horario es el que considera que por los hábitos de uso, la demanda del agua varía en el transcurso del día, en las mañanas hay un aumento en la demanda del recuso para las actividades del aseo personal y del hogar, por lo que se considera el coeficiente de variación horaria, que incrementa 55% el gasto requerido, según las recomendaciones del IMTA, a través de un coeficiente de variación horaria,  $CV_h = 1.55$ .

$$Q_{Mh} = CV_h * Q_{Md} = 1.55 * 0.0567 \frac{l}{s} = 0.0627 \frac{l}{s} \quad (9)$$

4.2

### **Demanda de los destiladores**

Los destiladores solares tienen rendimientos variables en función de varios factores, descritos en el capítulo de Potabilización, es por ello que para el diseño se elige un rendimiento promedio que facilite el dimensionamiento y la cuantificación de los elementos del sistema de abastecimiento.

El destilador solar Vega-Silva original tiene un rendimiento de producción promedio de 3.56 l/m<sup>2</sup>d y una máxima de 5.5 l/m<sup>2</sup>d y cada caseta tiene un área acumulada  $A_c$  de exposición de 1.5 m<sup>2</sup> para las condiciones climatológicas de la Ciudad de México.

Aunque se espera que por el incremento de radiación en la isla, sea mayor, se considerará un rendimiento promedio de diseño  $R_u$  de 5 l/m<sup>2</sup>d; por lo que el rendimiento por caseta  $R_c$  es de:

$$R_c = R_u * A_c = \left( \frac{5 \text{ l}}{\text{m}^2 \text{ d}} \right) \left( \frac{5.28 \text{ m}^2}{\text{caseta}} \right) = 26.4 \frac{\text{l}}{\text{d caseta}} \quad (10)$$

El gasto de diseño para la fuente de abastecimiento y obras de captación es el  $Q_{Md}$ , y con él se cuantificarán los destiladores solares necesarios para el abastecimiento,  $D_{V-S}$ :

$$D_{V-S} = \frac{Q_{Md}}{R_c} = \frac{0.0567 \frac{\text{l}}{\text{s}} * 86400 \frac{\text{s}}{\text{d}}}{26.4 \frac{\text{l}}{\text{d caseta}}} = 186 \text{ casetas} \quad (11)$$

Las casetas Vega-Silva se desarrollaron con la idea de proporcionar volúmenes de agua en zonas marginadas donde los consumos fuesen limitados y necesarios para la subsistencia por lo que la cantidad de casetas para suministrar las demandas típicas de agua resulta impráctica para operar el sistema. Así como muchas tecnologías, varios autores han desarrollado cambios en los diseños básicos de los destiladores para incrementar su eficiencia pasando de ser aplicaciones pasivas a activas por medio de varias técnicas, tales como el precalentamiento del agua a destilar o el aumento de radiación por medio de espejos o colectores solares.

La caseta Vega-Silva aún está en proceso de probar diferentes técnicas para mejorar su rendimiento; actualmente en la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, se están desarrollando modificaciones en el diseño original del destilador Vega-Silva, entre las cuales se han propuesto: el aumento en dimensiones de las casetas y del área expuesta, la extracción del vapor formado dentro de las casetas, incremento de temperatura de influente por medio de un concentrador solar y cambio de material de la superficie evaporante; con el fin de alcanzar rendimientos  $R_{CM}$  de hasta 10.2 l/m<sup>2</sup>d; bajo los criterios teóricos explicados en el capítulo de potabilización donde se justifican estos valores.

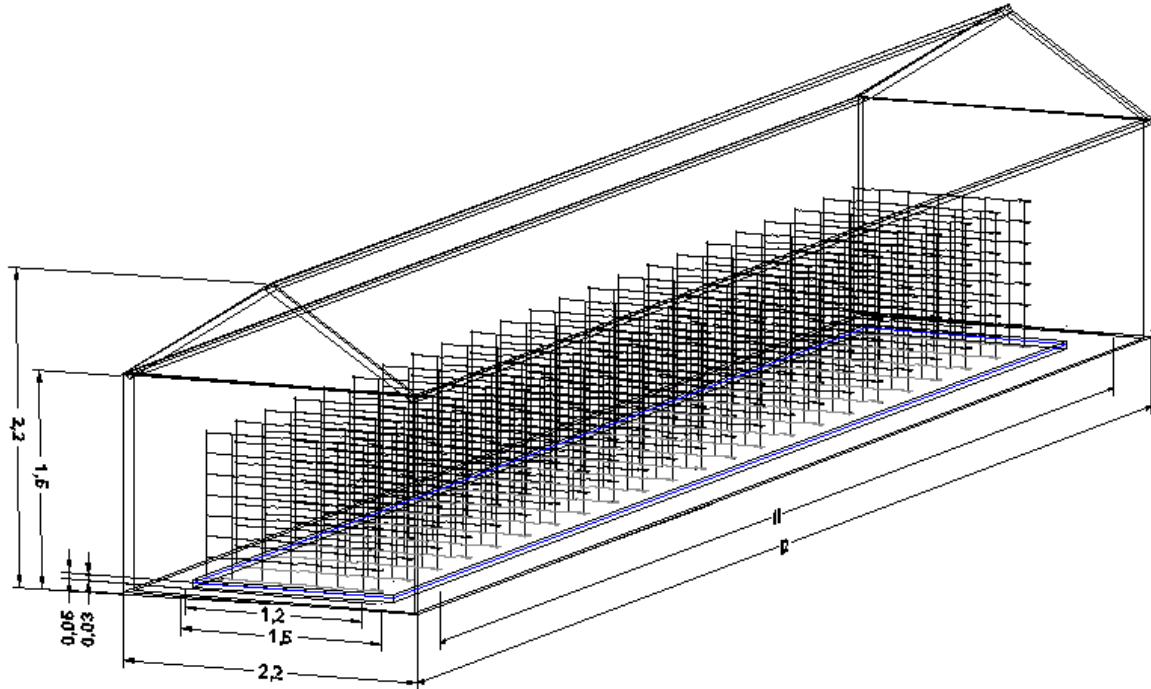


Ilustración 12. Modificaciones a las dimensiones destilador solar Vega-Silva  
Fuente: Elaboración propia



Ilustración 13. Concentrador solar parabólico  
Fuente: energiaunam.wordpress.com

$$R_{CM} = R_u * A_c = \left( \frac{10.2 \text{ l}}{\text{m}^2 \text{ d}} \right) \left( \frac{12 * 2.2 \text{ m}^2}{\text{caseta}} \right) = 269.28 \frac{\text{l}}{\text{d CM}} \approx Q_{ECM} \quad \begin{matrix} \text{De (10)} \\ \text{De (3)} \end{matrix}$$

Considerando que el agua del sistema proviene tanto del sistema de destilación de agua marina en las casetas Vega-Silva  $V - S$ , como de la destilación de salmuera en los destiladores solares típicos  $D - S$ , se considera al volumen producido con estas tecnologías como **Agua disponible**.

$$\text{Agua disponible} = \text{Producción}_{V-S} + \text{Producción}_{D-S} \quad (12)$$

$$\text{Producción}_{V-S} = R_{CM} * D_{V-S} \quad (13)$$

La producción de la destilación de salmuera se iguala al gasto de la purga de las casetas Vega-Silva.

$$\text{Producción}_{D-S} = Q_{purga} = 2Q_{m26} \quad (14)$$

Por lo que se deduce:

$$\text{Consumo}_{real\ ofrecido} \quad (15)$$

$$= \frac{\text{Agua disponible}}{\text{Población}(1 + \%Pérdidas\ físicas)}$$

$$\text{Agua disponible} = (\text{Rendimiento}_{CM} * D_{V-S}) + Q_{purga} \quad (12)$$

De (13)

De (14)

$$D_{V-S} = \frac{[\text{Consumo} * (\text{Población}(1 + 40\%))] - Q_{purga}}{\text{Rendimiento}_{CM}} \quad (16)$$

Se propone que cada una de las casetas funcionen con diferentes concentraciones y que tengan purgas totales de los estanques cada seis días  $Q_{m26}$ , el resto del tiempo sólo se rellenará el estanque, de tal forma que se tenga una demanda y producción regular, por lo que se establece un balance de masas para determinar la demanda de los destiladores solares, donde la acumulación  $\dot{A}$ , es igual a la suma de los flujos másicos de la entrada  $\dot{E}$ , la salida  $\dot{S}$ , la producción  $\dot{P}$  y la remoción  $\dot{R}$ , pero al ser las sales un contaminante inerte y conservativo, se asume que la producción y la remoción del mismo es nula por lo que se puede simplificar el balance a:

$$\dot{A} = \dot{E} - \dot{S} + \dot{P} - \dot{R} \quad (17)$$

$$\dot{A} = \dot{E} - \dot{S}$$

$$\dot{A} = \dot{E} - \dot{S} = \sum Q_E \chi_E - \sum Q_S \chi_S$$

Se tienen entonces dos concentraciones de mezcla en la jornada que se deben balancear, la primera es la mezcla de la salmuera con el agua marina previa al destilado y la segunda es la de la mezcla después del proceso de destilado.

$$Q_a \chi_a + Q_s \chi_s = Q_{m1} \chi_{m1} \quad (18)$$

$$Q_a \chi_a + Q_s \chi_s - Q_d \chi_d = Q_{m2} \chi_{m2} \quad (19)$$

Donde:

$Q_j$ , es el caudal diario de salmuera (s), agua de mar (a), destilado (d), mezcla previa al destilado (m1), mezcla en el estanque después del destilado (m2)

$\chi_j$ , es la concentración de sal en la salmuera (s), agua de mar (a), destilado (d), mezcla previa al destilado (m1), mezcla en el estanque después del destilado (m2)

Se tomaron las siguientes consideraciones:

$$\chi_{ai} = 33,600 \text{ mg/l, la concentración del Océano Pacífico} \quad (20)$$

$$Q_{m1i} = 495 \text{ l/d} \quad (21)$$

$$Q_{di} = -26.4t_i + 396 \quad (22)$$

Es la ecuación que describe un cambio lineal en la eficiencia de la destilación en 10%, que va desde 140% hasta 60%

$$\chi_{destilado i} = 3.39 * 10^{-3} \chi_{m1i} + 58.7 \quad (23)$$

Es la ecuación que describe el aumento lineal de la concentración de los destilados según lo obtenido en los experimentos de Silva, 2012.

$$Q_{si} = Q_{m2i-1} \quad (24)$$

$$Q_{m2i} = Q_{m1i} - Q_{di} \quad (25)$$

$$Q_{ai} = Q_{di-1} \quad (26)$$

$$\chi_{si} = \chi_{m2i-1} \quad (27)$$

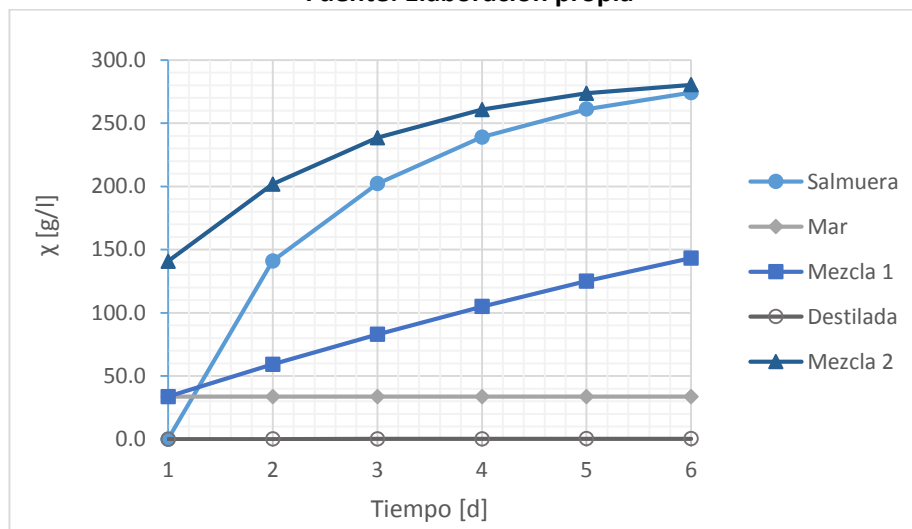
$$\chi_{m1i} = \frac{(\chi_{si} * Q_{si}) + (\chi_{ai} * Q_{ai})}{Q_{m1i}} \quad \text{De (18)}$$

$$\chi_{m2i} = \frac{(\chi_{si} * Q_{si}) + (\chi_{ai} * Q_{ai}) - (\chi_{di} * Q_{di})}{Q_{m2i}} \quad \text{De (19)}$$

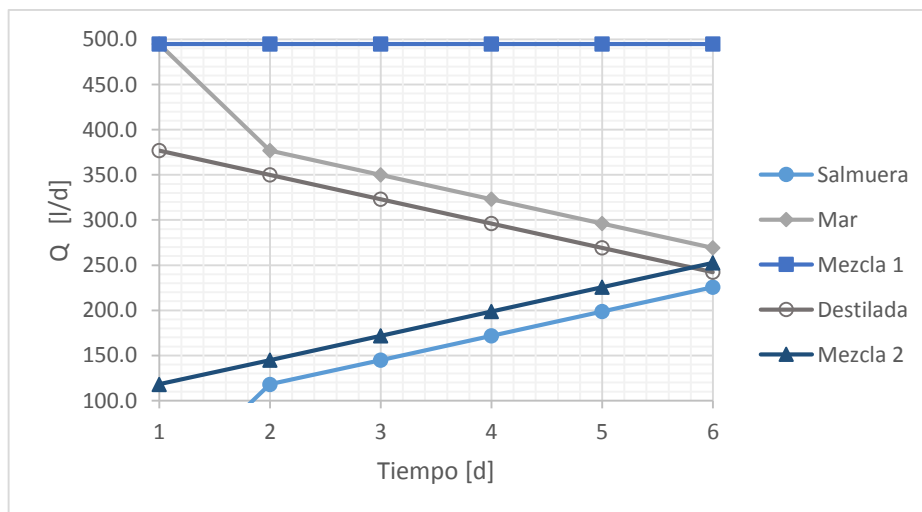
Los resultados para la dinámica de una caseta se muestran en la siguiente tabla:

t [d]	$Q_s$ [l/d]	$\chi_s$ [g/l]	$Q_a$ [l/d]	$\chi_a$ [g/l]	$Q_{m1}$ [l/d]	$\chi_{m1}$ [g/l]	$Q_d$ [l/d]	$\chi_d$ [g/l]	$Q_{m2}$ [l/d]	$\chi_{m2}$ [g/d]
1	0.0	0.0	495.0	34	495.0	33.6	377.0	0.06	118.0	140.8
2	118.0	140.9	377.0	34	495.0	59.2	350.1	0.14	144.9	201.8
3	144.9	202.2	350.1	34	495.0	83.0	323.1	0.22	171.9	238.5
4	171.9	238.9	323.1	34	495.0	104.9	296.2	0.30	198.8	260.7
5	198.8	261.2	296.2	34	495.0	125.0	269.3	0.37	225.7	273.7
6	225.7	274.1	269.3	34	495.0	143.3	242.4	0.43	252.6	280.3
Promedio	143.2	186.2	351.8	33.6	495.0	91.5	309.7	0.3	185.3	232.6

**Tabla 3. Balance de masa de una caseta**  
Fuente: Elaboración propia



**Gráfico 1. Balance de masa de sales disueltas en una caseta**  
Fuente: Elaboración propia



**Gráfico 2. Balance de masa de agua de una caseta**  
Fuente: Elaboración propia



$$D_{V-S} = \frac{50 \frac{l}{hab * d} * (50 hab (1 + 40\%)) - 2(252.2) \frac{l}{d}}{269.28 \frac{l}{d caseta}} \quad De (16)$$

$$= 12 casetas$$

$$Producción_{V-S} = Rendimiento_{caseta modificada V-S} * D_{V-S} \quad De (13)$$

$$= 269.28 \frac{l}{d caseta} * 12 casetas = 3,231.36 \frac{l}{d} \quad De (12)$$

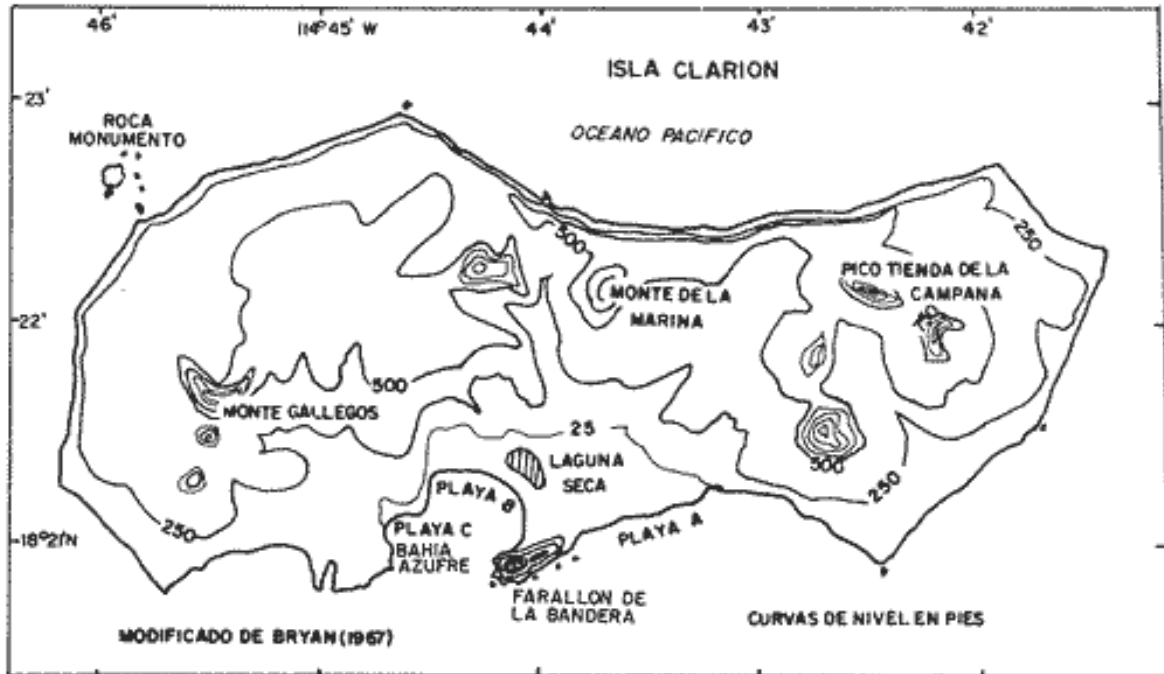
$$Agua disponible = 3,231.36 \frac{l}{d} + 2(252.2) \frac{l}{d} = 3,735.76 \frac{l}{d}$$

$$Consumo_{real ofrecido} = \frac{3,735.76 \frac{l}{d}}{(50 hab (1 + 40\%))} = 53.368 \frac{l}{hab d} \quad De (15)$$

### 4.3 Obra de captación

Para fines de este proyecto se elige hacer la perforación del pozo en la playa, con el fin de extraer agua de mar previamente filtrada por la arena; ya que al no tener la succión directamente en el agua marina, se evita afectar el plancton y la vida marina, protegiendo el ecosistema y se evita el ingreso al sistema de componentes que pueden perjudicar el , tales como algas, plantas, crustáceos, huevos de especies acuáticas, hongos, protozoarios y bacterias. El que el pozo esté en la playa asegura un flujo constante de agua y se le considerará como un acuífero libre, ya que su límite superior está al nivel del agua del mar, funcionando como un conducto abierto.

Las únicas playas de la isla tienen una extensión aproximada de 3.5 km, se localizan en la parte sur central de la isla, y comprenden: la playa localizada al este del Farallón de la Bandera denominada Playa A, la Playa B es la más cercana a las lagunas saladas y la Playa sobre la caleta al oeste de la Bahía Azufre; se propone se localice el pozo en la colindancia de la playa B y la playa C, por la cercanía a las instalaciones del apostadero naval.



**Ilustración 14. Elementos relevantes del relieve de la Isla Clarión**  
**Fuente: Márquez y Morales, 1987**

En las islas, penínsulas, bahías y zonas costeras es común que el agua dulce esté en contacto con el agua salada; bajo condiciones naturales, en estas áreas hay un balance entre el flujo de las aguas saladas y un reflujos de agua dulce que establece una frontera entre los dos regímenes llamada curva de interfase (Vázquez, 1994); la dinámica del agua en las islas arenosas, volcánicas y de coral puede afectarse por el aprovechamiento de aguas subterráneas, ya que al extraer el agua dulce se pueden modificar los límites de la interfase entre estas por la penetración del agua salada (Fair, 1990), este fenómeno se denomina intrusión salina, y generalmente se le considera un problema por la afección de la calidad del agua a extraer y la salinización de suelos.

Dependiendo de la naturaleza del subsuelo, el agua de lluvia se percola por los intersticios formados por los granos de suelo para unirse a una lente subterránea de agua dulce, la cual reposa sobre otra de agua salada que es más densa. El agua que se filtra pasa por una zona de saturación antes de moverse lateralmente en la dirección de mayor pendiente del nivel freático, está pendiente es el gradiente hidráulico del flujo subterráneo; debido a la recarga, descarga y almacenamiento fluctúan, el flujo es inestable, variable y el gradiente no es estacionario; durante la reposición el nivel freático asciende y el gradiente se hace más pronunciado y el flujo aumenta, durante los periodos secos acontece lo opuesto (Fair, 1990).

Sin embargo, este proyecto tiene como objetivo el bombeo de una muy pequeña cantidad de agua marina y en plazos de tiempo determinados, por ello se consideró que en la playa la recuperación del suelo será rápida y que la posible afectación por la extracción es mínima. En virtud de lo anterior el bombeo de agua dulce no es factible debido a las características climatológicas e hidrogeológicas, donde alrededor del 98% del agua recibida en la isla es evapotranspirada, como se puede modelar con la ecuación de Turc, donde se calcula la lámina de evapotranspiración **ETR**, con base en la precipitación **p** y a la temperatura **T** medias anuales.

$$L = 300 + 25T_{amb} + .05T_{amb}^2 = 300 + 25(22) + .05(22^2) = 874.2 \quad (28)$$

$$ETR[mm] = \frac{p}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} = \frac{313.4mm}{\sqrt{0.9 + \frac{313.4^2}{874.2^2}}} = 309.02mm \quad (29)$$

*Ec. Turc*

Donde:

**ETR** = evapotranspiración real en mm/año

**P** = precipitación en  $\frac{mm}{año}$ , aproximadamente 313.4 mm

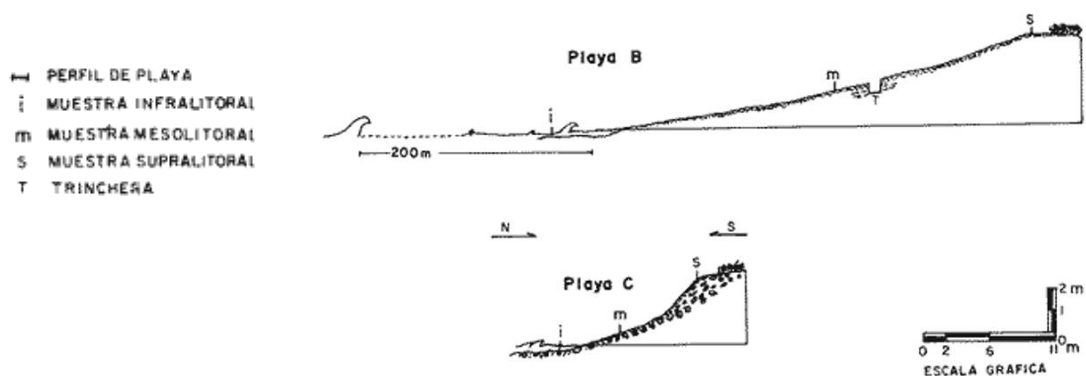
**T<sub>amb</sub>** = Temperatura media anual en °C, alrededor de 22°

Para determinar las dimensiones adecuadas de la estructura física y para la elección de los materiales y equipos a emplear, se deben conocer las características geohidrológicas de la ubicación del aprovechamiento, por lo que se recomienda conocer algunas propiedades hidráulicas del acuífero como la estratigrafía de sedimentos y rocas atravesados durante su perforación, valores de transmisibilidad y coeficiente de almacenamiento del acuífero, condiciones de balance hidrológico y análisis granulométrico de los materiales no consolidados, así como de la identificación de los minerales de las rocas (CONAGUA, 2007); sin embargo, hay tan poca información de la isla que se infirió esta información por el marco teórico presentado en este trabajo.

Actualmente no existen estudios sobre la estratigrafía de la isla, sin embargo, se tiene identificada la presencia de depósitos de sílice, traquitas, tobas traquíticas, basaltos, y retinitas, escoria roja en las partes bajas, arenas y cenizas volcánicas (Bryan, 1967). En 1987 la Universidad Nacional Autónoma de México realizó una expedición con el fin de determinar el comportamiento del oleaje sobre las playas de la isla, por lo que se hizo una descripción de los suelos encontrados en varios niveles de la playa, la fuente de aporte de material a las playas lo constituye una barrera arrecifal formada frente a las playas de la

isla y los materiales piroclásticos localizados principalmente en los extremos de la bahía, siendo el oleaje el principal agente de transporte (Márquez y Morales, 1987).

Los resultados de las playas B y C indican que en su mayoría se trata de suelos gruesos cuyo origen es de restos coralinos, los resultados del estudio se muestran a continuación:



**Ilustración 15. Muestreo en las playas B y C**  
Fuente: Modificado de Márquez y Morales, 1987

Muestra	Arena			Grava			Descripción
	FC %	G o P %	MV %	FC %	G o P %	MV %	
Bi	97	1	2	100	-	-	Arena con grava de coral
Bm	96	1	3	100	-	-	Arena con grava de coral
Bs	97	1	2	100	-	-	Arena con grava de coral
Ci	93	4	3	100	-	-	Grava arenosa de coral
Cm	93	4	3	100	-	-	Arena con grava de coral
Cs	-	-	-	85	10	5	Grava coralina

FC- Fragmentos de coral

G o P- Conchas de gasterópodos o pelecípodos

MV-Material Volcánico (cuarzo, feldspatos, vidrio volcánico, etc.)

**Tabla 4. Composición porcentual del muestreo en la Playa B y C**

Fuente: Modificado de Márquez y Morales, 1987

- Porosidad (n%) es una medida de la cantidad de vacíos que tiene un material y se define como la relación entre sus volúmenes de vacíos y su volumen total. Al estar el material saturado los intersticios están conteniendo agua, por lo que resulta ser también la medida de la cantidad de agua que puede contener por volumen, la porosidad depende de la distribución granulométrica, el grado de compactación y la forma de los granos que

conforman el suelo. En las playas de la isla podemos encontrar suelos arenosos y rocas ígneas por lo que las porosidades probables se muestran en la tabla 5:

Tipo	n%
Depósitos no consolidados	
Arena	25-50
Grava	25-40
Rocas	
Basalto fracturado	5-50
Rocas cristalinas	0-10

**Tabla 5. Intervalos de porosidad**  
Fuente: Freeze, Cherry, 1979

- Permeabilidad  $k$ , es una medida de la capacidad del material permitir el paso del agua, depende del tamaño de los granos, distribución granulométrica, grado de compactación, densidad, abertura de fisuras, tamaño de los conductos, etc. Los suelos gruesos suelen ser muy permeables debido a que el área de contacto con el agua es menor y esto reduce la resistencia al flujo, la permeabilidad en rocas como los basaltos dependerá del tamaño de las vesículas y su conexión, aunque se puede suponer que en la Isla Clarión, se tienen medios filtrantes muy efectivos, ya que no hay cuerpos de agua.
- La Conductividad Hidráulica  $K$ , se define como la cantidad de agua que circula a través de una sección de área unitaria normal al sentido de flujo, bajo un gradiente unitario. Depende de la viscosidad dinámica del fluido y de las características del medio filtrante.

Granulometría	$k$ [cm/s]	$K$ [cm/s]
Grava	$10^{-11}$ - $10^{-12}$	$1$ - $10^{-2}$
Arena limpia	$1$ - $10^{-10}$	$10^{-3}$ - $1$
Arenas arcillosas y arenas finas	$10^{-11}$ - $1$	$10^{-3}$ - $10^{-6}$

**Tabla 6. Conductividad hidráulica y permeabilidad de diferentes granulometrías**  
Fuente: CONAGUA<sub>d</sub>, 2007

- Coeficiente de transmisibilidad, representa el gasto que pasa a través de una sección vertical de un metro de ancho y una altura igual al espesor saturado del acuífero, bajo un gradiente hidráulico unitario.

- Coeficiente de almacenaje específico, representa la capacidad de drenar o almacenar agua un volumen unitario de material; depende de las características y de las condiciones hidráulicas en las que se encuentra.
- Rendimiento específico o capacidad específica, es la relación entre el caudal y el abatimiento del terreno a su alrededor, cuando el acuífero es libre, se dice que el coeficiente de almacenamiento de los acuíferos libres es prácticamente equivalente a su rendimiento específico.

Para la elección del equipo de bombeo se debe determinar el gasto a extraer y la carga hidráulica a vencer, considerando las pérdidas ocasionadas por la fricción y las piezas especiales de la línea de conducción.

El caudal de diseño considera, sólo los volúmenes faltantes para completar el volumen propuesto de 495 l por cada caseta, sin embargo, a partir de del balance de masas se cuantificó el gasto que realmente se debe extraer del pozo:

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{diseño sistema de bombeo}} &= \text{Demanda}_{\text{destiladores solares}} = 2 \sum Q_a \quad (30) \\
 &= 2 * 2,110.7 \frac{l}{d} = 4,224.4 \left( \frac{d}{86400s} \right) = 0.0488 \frac{l}{s}
 \end{aligned}$$

Con este gasto base se construyó la curva del sistema, la cual representa la carga hidráulica necesaria para diferentes proporciones del gasto de diseño, con el fin de comparar las necesidades del sistema con las soluciones comerciales y facilitar la identificación de aquéllas cuyas características solucionen el problema con mayor eficiencia y economía.

Para la construcción de la curva del sistema se ubicó el posible origen y destino de la línea de conducción, con la propuesta de la localización del pozo y el sistema de potabilización, para ello se determinaron las coordenadas, las elevaciones y distancia entre varios puntos, separados entre sí por longitudes aproximadas a veinte metros o por cambios abruptos en el terreno, localizando en el trazo, los cruces importantes de la conducción, en este caso arroyos y caminos.

El cálculo de carga de bombeo  $H_B$ , considerando las cargas estáticas, las pérdidas por fricción y accesorios, tanto del ramal de succión como el de impulsión y la descarga libre a la estructura de almacenamiento como se muestra a continuación:

$$H_B = H_{\text{estática}} + H_{\text{fricción}} + H_{\text{accesorio}} + \frac{v_i^2}{2g} \quad (31)$$



**Ilustración 16. Ruta de la tubería**  
**Fuente: Google Earth, 2015**

#### **4.4 Cálculos de cargas hidráulicas**

Es necesario determinar las pérdidas de energía que se dan en el sistema para determinar la energía que se requiere para mover el agua de un punto a otro. En general todas las disminuciones energéticas son relativas a la fricción que enfrenta el agua ante varios materiales al moverse sobre ellos, cada material y forma ofrece una resistencia diferente al paso del fluido por lo que es necesario analizar cada caso en particular.

##### **4.4.1 Pérdida de carga en la playa**

Aunque el pozo se ubicó muy cerca del mar, la inexistencia de información de campo nos permite pensar en la posibilidad de que el nivel freático del agua decaiga del nivel del mar tierra adentro, independientemente de la existencia de corrientes subterráneas por las que se filtra el agua de lluvia hacia el océano se requirió asegurarse de que el nivel en que se situó la bomba sumergible a elegir sea adecuado para la extracción de agua.

En la naturaleza, la velocidad del movimiento de aguas subterráneas y la pendiente del nivel freático no son grandes, en los acuíferos de alto rendimiento, se encuentran asociadas velocidades de 0.0176 a 0.21 m/s; se consideró para el caso de la playa de la Isla Clarión sea comparable la velocidad a la de un filtro rápido.

Para el cálculo de la pérdida se asemejó la playa a un filtro de arena y se aplicó la ecuación de Carman-Kozeny, 1937.

$$H_p = \frac{F}{\sigma} * \frac{1-n}{n^3} * \frac{L_p}{\varphi_s} * \frac{v_o^2}{g} \quad (32)$$

*Ec. Carman – Kozeny*

Donde:

$H_p$  es la pérdida de carga en un lecho limpio, en este caso la playa

$F$  es el coeficiente de fricción

$\sigma$  es el factor de forma, para arena es equivalente a un valor de 0.75  
para arena convencional

$n$  es la porosidad, equivalente a 0.4

$L_p$  es la longitud del lecho

$\varphi_s$  es el diámetro del grano, se supuso de 0.45 cm

$v_o$  es la tasa de filtración equivalente a 0.021 cm/s

$g$  es la aceleración de la gravedad

$$F = \frac{150(1-n)}{Re} + 1.75 \quad (33)$$

$$Re = \frac{\sigma \varphi_s v_o}{\nu} \quad (34)$$

$$\nu = -3 * 10^{-6} T^3 + 0.0006 T^2 - 0.0484 T + 1.7678 \quad (35)$$

$\nu$ , es la viscosidad cinemática del agua en  $m^2/s$

$T$ , es la temperatura del agua en el medio natural, se considerarán 18 °C

$$\nu = 1.073 * 10^{-6} m^2/s \quad De (35)$$

$$Re = \frac{0.75 * 0.45 cm * 0.35 cm/s}{0.01073 cm^2/s} = 11.008 \quad De (34)$$

$$F = \frac{150(1-0.4)}{11.008} + 1.75 = 9.925 \quad De (33)$$

$$H_p = \frac{9.925}{0.75} * \frac{1-0.4}{0.4^3} * \frac{1500m}{0.45cm} * \frac{\left(0.02 \frac{cm}{s}\right)^2}{981 \frac{cm}{s^2}} = 8.43cm \quad De (32)$$

$$\approx 0.084m$$



#### 4.4.2 Pérdidas de carga estática

Para determinar la altura que el agua debe alcanzar se debe determinar la situación más crítica que pueda enfrentar el sistema, eso se da desde el nivel en que se encuentra la bomba, considerando la pérdida de altura en la playa, la sumergencia y la propia altura de la bomba; hasta el nivel del agua en el tanque de almacenamiento cuando éste está a su máxima capacidad por lo que se define que:

$$H_{estática} = NAME_{almacenamiento} - NB \quad (36)$$

Donde:

*NAME*, nivel de agua máximo extraordinario,  
respecto al mar

*NB*, nivel de bombeo, respecto al nivel del mar

$$\begin{aligned} NAME_{almacenamiento} &= E_{t_a} + h_{t_a} = 49m + 1.6m \\ &= 50.6msnm \end{aligned} \quad (37)$$

Donde:

*E<sub>t<sub>a</sub></sub>*, es la elevación del terreno donde se ubica el almacenamiento

*h<sub>t<sub>a</sub></sub>*, es la altura del tanque de almacenamiento

$$\begin{aligned} NB &= -l_b - H_s - H_p - h_{ad} \\ &= -0.4m - 1m - 0.084m - 1.75m \\ &= -3.234msnm \end{aligned} \quad (38)$$

Donde:

*E<sub>t</sub>*, es la elevación del terreno donde se ubica el pozo, alrededor de 5m

*l<sub>b</sub>*, es la longitud de la bomba, de 40 cm aproximadamente

*NP*, es el nivel piezométrico, considerado de 1m

*H<sub>s</sub>*, es la altura mínima de agua que necesita la bomba sobre ella  
para funcionar, equivalente a 1m

*H<sub>p</sub>* es la pérdida de carga en la playa

*H<sub>ad</sub>*, es el espesor de la lente de agua dulce y terreno antes del agua  
salada, se considera de 1.75m

Como ya se había mencionado, existe un equilibrio en la línea de interfase del agua dulce y el agua salada, este fenómeno fue estudiado por primera vez por Badon Ghyben y Bairat Herzenberg, el cual considera que por la diferencia de densidades entre el agua dulce y la marina la columna de la primera tiene una altura cuya proporción es igual a la densidad relativa respecto a la columna de del agua marina respecto al mismo punto.

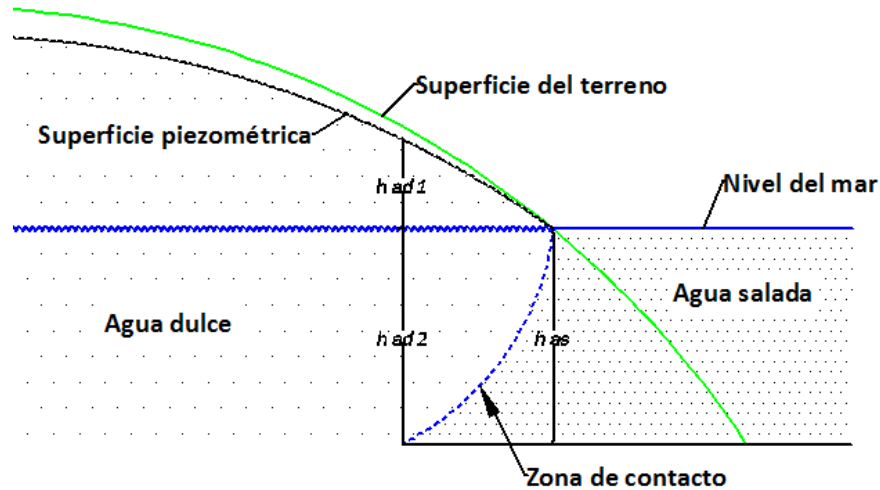


Ilustración 17. Equilibrio hidrostático en las costas  
Fuente: Modificado de Vázquez, 1994

A falta de información, se propone que la lente de agua dulce  $h_{ad1} + h_{ad2}$  sea de un espesor de un volumen acumulado por un año de la precipitación máxima diaria  $p_{max}$  el volumen restante a la evapotranspiración  $ETR$ , de la precipitación media anual  $p$ , más la columna proporcional dada por el factor de proporción dado por la relación de densidades  $\rho$  de los diferentes tipos de agua.

$$h_{ad1} + h_{ad2} = \left[ 365p_{max} \left( 1 - \frac{ETR}{p} \right) \right] + \frac{\left[ 365p_{max} \left( 1 - \frac{ETR}{p} \right) \right]}{\frac{\rho_{agua\ marina}}{\rho_{agua}} - 1} \quad (39)$$

$$= 41 \left[ 365d(0.006 \frac{mm}{d})(0.02) \right] = 1.796 m$$

De (36)

$$H_{estática} = 50.6m - |-3.234| = 53.834m$$

#### 4.4.3 Pérdidas de carga por fricción en conductos a presión

La merma de la carga energética que lleva el fluido está relacionada principalmente a la velocidad del fluido dentro del conducto, por lo que es necesario establecer un diámetro que permita trasladar el agua de forma económica y segura, por lo que se busca que la velocidad sea lo más cercana posible a 1.2 m/s, entre en el rango de 0.3 a 3 m/s.

En primera instancia se determina el diámetro teórico que pueda conducir el caudal requerido a la velocidad de 1.2 m/s, para que consecuentemente se busque en el mercado la opción comercial que mejor se adecue a las necesidades del proyecto.

$$\Phi_{teo} = \sqrt{\frac{4 Q_j}{\pi v_t}} \quad (40)$$

Donde:

$\Phi_{teo}$ , es el diámetro interior teórico de la tubería que conduciría el gasto en la velocidad económica 1.2m

$Q_j$ , es el caudal proporcional a conducir  $\frac{m^3}{s}$

Se determina para las tuberías  $j$  de impulsión ( $i$ ) y succión ( $s$ ) los diámetros interiores  $\Phi_{intj}$  comerciales más cercanos y se calcula la velocidad real en cada uno de ellos:

$$v_j = \frac{Q_j}{A_{intj}} = \frac{Q_j}{\frac{\pi \Phi_{intj}^2}{4}} \quad (41)$$

Para determinar la pérdida de energía por fricción se requiere calcular el coeficiente de fricción  $f$ , que es el coeficiente de fricción adimensional; se puede obtener por medio del modelo de Darcy-Weissbach, el diagrama de Moody o calculada por las ecuaciones de Coolebroke-White, Swamme y Jain, o Guerrero:

$$H_{fricción} = H_{fricción_i} + H_{fricción_s} \quad (42)$$

$$H_{fricción_j} = f_j \frac{L_j}{\Phi_{intj}} \frac{v_j^2}{2g} \quad (43)$$

*Ec. Darcy – Weissbach*

Donde:

$f_j$ , es el coeficiente de fricción adimensional

$L_j$ , es la longitud de la tubería en m

$\Phi_{intj}$ , es el diámetro interior de la tubería

$v_j$ , es la velocidad media dentro del tubo en m/s

$g$ , es la aceleración de la fuerza de gravedad en m/s<sup>2</sup>

$$f_j = \frac{0.25}{\log \left[ \left( \frac{\varepsilon_j / \Phi_{intj}}{3.71} + G / Re_j^Y \right)^2 \right]} \quad (44)$$

*Ec. de Guerrero*

$\varepsilon_j$ , es la rugosidad del material de la tubería en mm, al ser materiales muy lisos, se considerará un valor de 0.1mm

$Re_j$  es el número de Reynolds, que se calcula con la ecuación ( 45 )

$$Re = \frac{v_j \Phi_{intj}}{\nu} \quad (45)$$

$\nu$ , es la viscosidad cinemática del agua, ecuación (35)

$G$  y  $Y$ , son valores propuestos por Guerrero (1994) para cada régimen de flujo,

Si  $4000 \leq Re < 10^5$ , entonces  $G = 4.555$  y  $Y = 0.8764$

Si  $10^5 \leq Re < 3 * 10^6$ , entonces  $G = 6.732$  y  $Y = 0.9104$

Si  $3 * 10^6 \leq Re \leq 10^8$ , entonces  $G = 8.982$  y  $Y = 0.9300$

Se construye la curva del sistema con los datos anteriores, relacionando gastos proporcionales y sus respectivas cargas a vencer, en el anexo 6 se incluyen los datos más relevantes de la memoria de cálculo.

#### 4.4.4 Equipo de bombeo

Las curvas características adjuntas en el anexo 6 se compararon con la curva del sistema construida con la metodología mencionada anteriormente, que es una representación gráfica del el cambio de la carga a vencer con diferentes proporciones del gasto base siguiendo la metodología anterior, con la finalidad de determinar el equipo de bombeo que tenga la mayor eficiencia y que cumpla con los requerimientos de carga, así como determinar el punto real de trabajo de la bomba y con ello determinar un régimen de bombeo.

En el gráfico 3 se puede ver la representación de las curvas características de bombas solares reales en el mercado y la curva del sistema:

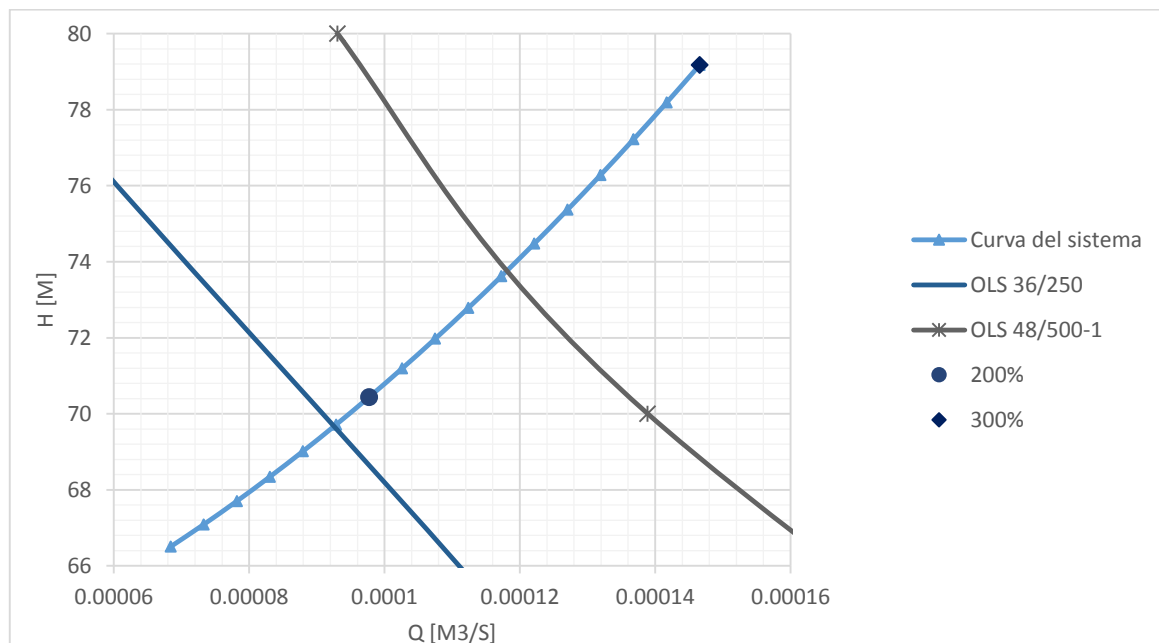


Gráfico 3. Comparativo de curvas de rendimiento y curva de sistema

Fuente: Elaboración propia

En el gráfico anterior se observa que los puntos de operación para las dos bombas se encuentran en las proporciones 190% y 240% del gasto requerido, esto significa que pueden otorgar el gasto en diferentes intervalos de tiempo, el equipo OLS36/250 requeriría de 12.63 horas y el OLS48/500 tomaría 10 horas. Las bombas funcionarán con energía solar, así que se estima que su funcionamiento será de máximo doce horas al día por lo que se elige la segunda opción y se determinan las pérdidas energéticas, por lo que se modifican los gastos probables de diseño como se muestra a continuación:

$$Q_{diseño\ sistema\ de\ bombeo\ 10h} = \frac{2 \sum Q_a}{10\ h} = \frac{4,224.4\ l}{10\ h} \quad De\ (30)$$

$$= 422.4 \frac{l}{h} \left( \frac{h}{3600s} \right) = 0.1173 \frac{l}{s}$$

En el anexo 6 ya están calculados todos los datos relevantes, donde se ha de terminado que para la tubería de impulsión, dada la longitud y el pequeño caudal a conducir se utilice tubería flexible de polietileno de baja densidad PEBD (anexo 4) con el fin de evitar construir soportes para la tubería, identificar fugas con facilidad y evitar pérdidas de energía por cambios de dirección más bruscos; cuyo diámetro interior más cercano es de 17mm; para la tubería de succión se determinó usar una tubería flexible de poliuretano con refuerzo circular textil de poliéster de 20 mm (anexo 5), a continuación se presentan las velocidades respectivas que están dentro del rango:

$$\Phi_{int_i} = 0.017m$$

$$\Phi_{int_s} = 0.02m$$

$$v_i = \frac{\left( 0.1173 * 10^{-3} \frac{m^3}{s} \right)}{\frac{\pi(0.017m)^2}{4}} = 0.52 \frac{m}{s} \quad De\ (41)$$

$$v_s = \frac{\left( 0.1173 * 10^{-3} \frac{m^3}{s} \right)}{\frac{\pi(0.02m)^2}{4}} = 0.37 \frac{m}{s}$$

$$H_{fricción_i} = 0.031 * \frac{387.56m}{0.017m} * \frac{\left( 0.52 \frac{m}{s} \right)^2}{2g} = 10.149\ m \quad De\ (43)$$

$$H_{fricción_s} = 0.031 * \frac{4.6\ m}{0.017m} * \frac{\left( 0.49 \frac{m}{s} \right)^2}{2g} = 0.099m$$

$$H_{fricción} = 10.149m + 0.099m = 10.248m \quad De\ (42)$$

Para determinar las pérdidas por accesorios y por descarga libre se puede determinar la longitud equivalente de las piezas o calcular la pérdida individual que cada uno representa, sin embargo, se optó como cálculo inicial que las pérdidas por accesorio equivalieran a 10% de las pérdidas totales por lo que:

$$H_B = H_{estática} + H_{fricción} + H_{accesorio} + \frac{v_i^2}{2g} = 1.1(H_{estática} + H_{fricción}) \quad De (31)$$

$$= 1.1(64.082m) = 70.490m$$

Para la carga y gasto calculados anteriormente se calcula la potencia mínima requerida del equipo de bombeo:

$$Potencia = H_B \rho Q g \quad (46)$$

$$= 70.490m * 1,025 \frac{kg}{m^3} * 0.1173 * 10^{-3} \frac{m^3}{s} * 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$= 83.14 W \left( \frac{hp}{746.7W} \right) = 0.11hp$$

Una vez determinada la potencia, se realizó una búsqueda de los equipos disponibles y sus curvas características, las cuales representan el comportamiento de la bomba al usar una variedad de gastos y cargas.

Por último se comprueba que la bomba no sufra cavitación, que es un fenómeno en el que la presión se reduce a un valor cercano a la presión de vapor  $P_v$  (consulte anexo 7), lo que propicia un cambio de fase y la formación de burbujas que al implotar interfieren con el funcionamiento de la bomba ya que pueden producir vibraciones o daños físicos al equipo; se puede determinar si la carga neta positiva de succión disponible  $CNPS_d$  es mayor que la requerida  $CNPS_r$ , dada por el proveedor.

La presión atmosférica de la Isla Clarión se considera es de 760 mmHg equivalentes a 10.33 metros columna de agua (m.c.a) ya que está prácticamente al nivel del mar.

$$CNPS_d = \left[ z_b - \left( H_{e_s} + H_{f_s} + H_{a_s} + \frac{v_s^2}{2g} \right) \right] - P_v \quad (47)$$

$$= 10.33m - 1.1(7.507m) - 0.21 = 1.86m$$

$$CNPS_r = h_{min} + \frac{v_s^2}{2g} = 1m + 0.007m = 1.007m \quad (48)$$

$CNPS_d > CNPS_r$ ; por lo tanto la bomba no cavita

Donde:

$z_b$ , es la altura barométrica en metros columna de agua en m. c. a

$h_{min}$ , es la altura mínima necesaria a la entrada del rodete m. c. a

Con base en lo anterior se determina que la profundidad del pozo es de 8 m y el diámetro del ademe será de 20 cm de aluminio.

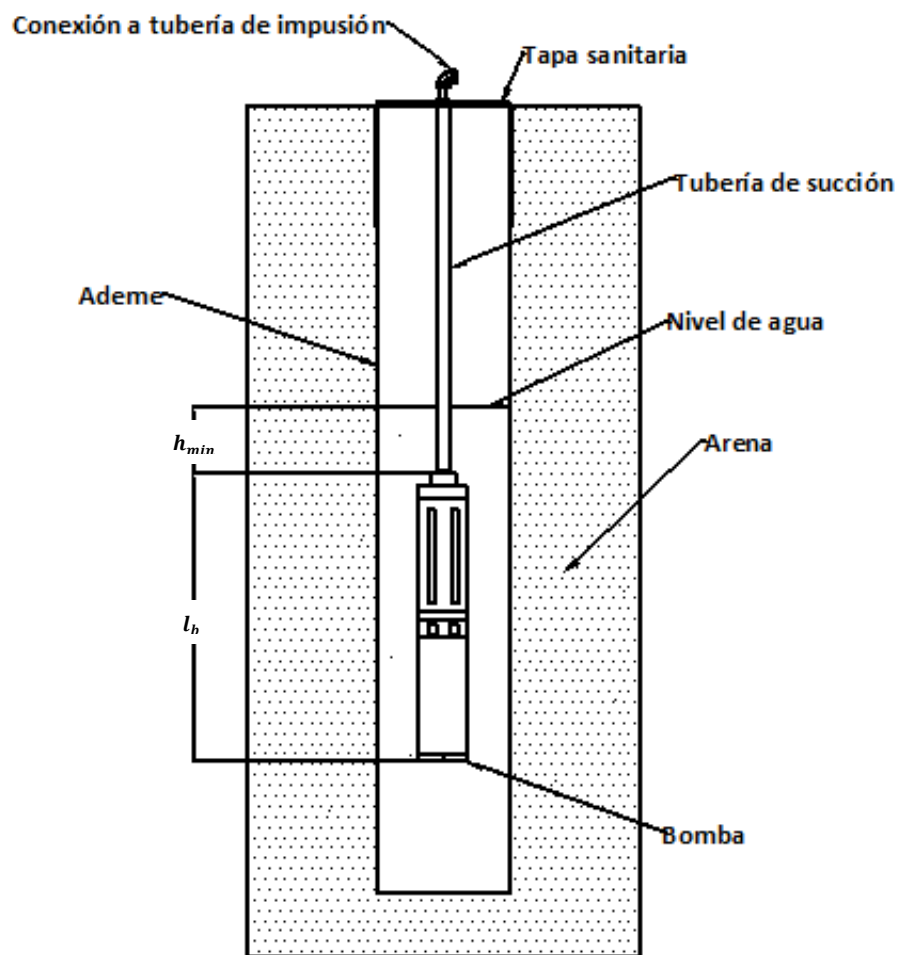


Ilustración 18. Esquema de pozo  
Fuente: Elaboración propia

## Potabilización

4.5 El agua disponible en la naturaleza es una solución acuosa en la que se encuentran disueltas una gran variedad de sustancias sólidas así como gases atmosféricos; a estos componentes también se suman materiales suspendidos orgánicos e inorgánicos, e inclusive organismos microscópicos vivos, vegetales y animales, conocidos respectivamente como fitoplancton y zooplancton; éstos participan activamente sobre las concentraciones de las sustancias disueltas o suspendidas en el agua.

En la abundancia de las sales disueltas que se hallan presentes en el agua, se reconocen a los *constituyentes principales*, que son sales metálicas o básicas expuestas en la tabla 7, mientras que los llamados *constituyentes secundarios* no superan el 0.025% de los principales, parte de ellos son los nutrientes tales como nitrato  $\text{NO}_3^-$ , fosfato  $\text{PO}_4^{3-}$ , nitrito  $\text{NO}_2^-$ , silicato  $\text{Si}(\text{OH})_4$  y amonio  $\text{NH}_4^+$  (IMTA, 2007).

Además de los componentes naturales, el agua podría estar contaminada por las actividades antropogénicas; las sustancias o energía que altere el equilibrio ecológico o la salud y que afecten adversamente sus características organolépticas, físicas y químicas del líquido (OMS, 2005), las que deben ser corregidas mediante un tratamiento; si el agua es para fines de consumo humano el tratamiento se denomina potabilización. Los objetivos principales de la potabilización son que el agua sea segura para consumo humano, que estéticamente aceptable y que sea económica (César, 1990).

### 4.5.1 Calidad del agua

Actualmente existen guías de validez nacional e internacional con los límites máximos permisibles de los contaminantes en el agua potable, que se aplican al control de calidad de las aguas (Mello, da Rocha, 2000); en los Estados Unidos Mexicanos desde 1994 en la NOM-127-SSA1 Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización, se especifica las concentraciones límite permitidas para agua para uso y consumo humano.

En la tabla 7 comparativa se pueden observar las concentraciones típicas de los componentes principales en el agua marina (IMTA), las concentraciones probables en el Océano Pacífico (IMTA), las concentraciones pretendidas de obtener por medio de la destilación con base en los experimentos de Silva (2012) a partir del balance de masas antes expuesto y suponiendo que la concentración promedio de la remoción es proporcional a los constituyentes originales, y las concentraciones límite permitidas por la normatividad mexicana.

$$\chi_{\text{agua de mar del Pacífico}} = \frac{\chi_{\text{SDT Pacífico}}}{\chi_{\text{SDT mar}}} \chi_{\text{Constituyente principal } j} \quad (49)$$



$$\overline{\chi_{m1}} = \frac{\sum \chi_{m1}}{6} \quad (50)$$

$$\begin{aligned} \overline{\chi_{destilado V-S}} &= 3.39 * 10^{-3} \overline{\chi_{m1}} + 58.7 && \text{De (23)} \\ &= 3.39 * 10^{-3} \left( 91.481 \frac{mg}{l} \right) + 58.7 = 251.5 \frac{mg}{l} \end{aligned}$$

$$\chi_{salmuera} = \frac{\chi_{SDT Salmuera}}{\chi_{SDT mar}} \chi_{Constituyente principal j} \quad \text{De (49)}$$

$$\begin{aligned} \chi_{D-S} &= 3.39 * 10^{-3} \chi_{m26} + 58.7 && \text{De (23)} \\ &= 3.39 * 10^{-3} \left( 280,292.4 \frac{mg}{l} \right) + 58.7 = 891.861 \frac{mg}{l} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \chi_{sistema} &&& \text{De (17)} \\ &= \frac{(\chi_{destilado V-S} * Q_{destilado V-S}) + (\chi_{destilado D-S} * Q_{destilado D-S})}{Q_{destilado V-S} + Q_{destilado D-S}} \end{aligned}$$

Como se puede observar en la tabla 7, la concentración de sales en el agua producida por el sistema se sitúa por debajo del límite permisible en agua potable, que establece la NOM-127-SSA1-1994.

La CONAGUA establece que el contenido de sales en el agua debe ser similar al de la saliva para no percibir sabor, sin embargo, ello corresponde a una apreciación individual que dificulta establecer valores límites. Se estima que el 50% de la población percibe un mal sabor cuando hay contenidos de cloruro de sodio (NaCl) de 465 mg/l, de magnesio (Mg) de 47 mg/l y de calcio (Ca) de 350 mg/l. En cuanto a los iones, se estima que en agua destilada el hierro (Fe) en concentración de 0.05 mg/l, el cobre (Cu) en 2.5 mg/l, el manganeso (Mn) en 3.5 mg/l y el zinc Zn en 5 mg/l confieren un sabor desagradable (CONAGUA<sub>c</sub>, 2007).

A reserva que el agua potable no puede considerarse como una fuente importante de minerales suplementarios en la dieta diaria, es importante el equilibrio mineral óptimo del agua potable para asegurar la calidad y los beneficios a la salud, sabiendo que el calcio y el magnesio son importantes factores para la salud, y el fluoruro también se considera que es beneficioso para salud dental (Cotruvo, OMS, 2006). A falta de la legislación que guíe la corrección del contenido de sales y determine las concentraciones mínimas de sales indispensables, será necesario hacer los estudios de evaluación de la calidad del agua pertinentes a las condiciones locales del sistema de destilación, tanto del agua de la fuente como del agua desalinizada, además de considerar la dieta alimenticia de la población.

Constituyente		$\chi$ agua de mar [mg/l]	$\chi$ del Pacífico [mg/l]	$\chi$ V-S [mg/l]	$\chi$ Salmuera [mg/l]	$\chi$ D-S [mg/l]	$\chi$ sistema [mg/l]	$\chi$ límite [mg/l]
<b>Cloruro</b>	<b>Cl<sup>-</sup></b>	19,350	18,507	139	128,133	491	186	250
<b>Sodio</b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	10,760	10,291	77	71,251	273	104	200
<b>Sulfato</b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>-</sup></b>	2,710	2,592	19	17,945	69	26	400
<b>Magnesio</b>	<b>Mg<sup>++*</sup></b>	1,290	1,234	9	8,542	33	12	NA
<b>Calcio</b>	<b>Ca<sup>++*</sup></b>	410	392	3	2,715	10	4	NA
<b>Potasio</b>	<b>K<sup>+</sup></b>	390	373	3	2,583	10	4	NA
<b>Bicarbonato</b>	<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	140	134	1	927	4	1	NA
<b>Dureza total como CaCO<sub>3</sub></b>	<b>DT CaCO<sub>3</sub>**</b>	6,312	6,037	45	41,796	160	61	500
<b>Bromuro</b>	<b>Br<sup>-</sup></b>	67	64	0	444	2	1	NA
<b>Estroncio</b>	<b>Sr<sup>++</sup></b>	8	8	0	53	0	0	NA
<b>Bario</b>	<b>B<sup>-</sup></b>	4	4	0	26	0	0	7
<b>Fluoruro</b>	<b>F<sup>-</sup></b>	1	1	0	7	0	0	2
<b>Sólidos Disueltos Totales</b>	<b>SDT</b>	35,130	33,600	252	232,626	892	338	1,000

**Tabla 7. Comparativo de las concentraciones de los parámetros químicos**  
**Fuentes: Modificado de IMTA, 2007, modificado de NOM-127-SSA1, 1994 y elaboración propia**

4.6

### Destiladores modificados Vega-Silva

El rendimiento de los destiladores solares puede mejorarse por medio de cambios en diseño que permitan reducir el área superficial que ocupa el destilador, ya que esta es la mayor limitante en el uso de esta tecnología; los principales procedimientos para incrementar la eficiencia del proceso de destilado se basan en los parámetros de diseño, tales como la intensidad de radiación recibida, profundidad del tirante de agua, el espesor de la cubierta transparente, material de cubierta para la condensación, temperatura ambiental y velocidad del viento (Tiwari, 2009); a estos parámetros se le aumentan en el proceso de destilado Vega-Silva el área superficial de evaporación, concentración de las sales, la diferencia de temperatura entre el agua y la cubierta (Silva, 2012).

El destilador solar Vega-Silva modificado con las dimensiones establecidas en la ilustración 12 aún se encuentra en proceso de desarrollo, por lo que los rendimientos establecidos

en este trabajo tienen un tratamiento exclusivamente teórico y apegado a los estándares prestablecidos en los trabajos de Silva (2012) y López (2013), por lo que el diseño, los materiales y los rendimientos son susceptibles de cambios.

La caseta propuesta conservó los materiales de construcción originales, con láminas de policarbonato de 4 mm de espesor, con una densidad de 1.2 g/cm<sup>3</sup>, índice de refracción de 1.586 a 20° C y un índice de transmisión lumínica de 85% (Silva, 2012) en una estructura de aluminio; como superficie evaporante se propusieron las telas de algodón blancas, ya que en los trabajos de López (2013) se concluyó que si bien las telas negras absorben un mayor porcentaje de calor radiante que las blancas, no se favorece la producción de destilado, dado que la mayor absorción de radiación impide que el calor llegue a las canaletas que contienen el agua que es el principal almacenador de calor del sistema.

Para determinar los posibles rendimientos utilizados en el diseño, se propuso utilizar los parámetros medidos de las casetas originales para calcular el  $N_{VS}$ , para posteriormente y con algunas modificaciones calcular el caudal diario potencial a obtenerse; considerando que la temperatura del techo es de 42°C, la del agua d 50°C, la del destilado es de 20°C; las presiones de vapor correspondientes en el anexo 7, con lo cual se calcula:

$$h_{cvC} = 0.884 \left[ 323.15K - 315.15K + \frac{(12,352Pa - 6,157Pa)(296.15 + 273)}{293.15 * 10^3 - 12,352Pa} \right]^{1/3} \quad De (1)$$

$$= 2.421 \frac{W}{m^2K}$$

$$N_{vsc} = \frac{26.4 kg}{4.8m * 8K^{1/3} * 2.421 \frac{W}{m^2K} * 850 \frac{kg}{m^3}} = 0.022 \quad De (3)$$

Se considera que para una caseta modificada donde el área expuesta a la evapotranspiración es mayor y la diferencial de temperatura es considerablemente mayor debido los cambios de temperatura en el agua cada vez que se recarga con agua marina y que la caseta está expuesta a mayor radiación por su ubicación geográfica, se considera que el  $A_{se}$  sea de 8 m<sup>2</sup>, que la temperatura del techo es de 38°C, la del agua mayor a 55°C, la del destilado es de 20°C.

$$h_{cvC} = 0.884 \left[ 328.15K - 311.15K + \frac{(15,762Pa - 6,632.8Pa)(296.15 + 273)}{293.15 * 10^3 - 15,762Pa} \right]^{1/3} \quad De (1)$$

$$= 2.902 \frac{W}{m^2K}$$

$$\begin{aligned}
Q_{ECM} &= N_{VS} A_{se} \Delta T^{1/3} h_{cv}^{1/3} C_w^{2/3} \\
&= 0.022 * 8m^2 * 16K^{1/3} 2.902 \frac{W}{m^2K}^{1/3} 850 \frac{kg}{m^3}^{2/3} \quad De(3) \\
&= 56.763 kg/d
\end{aligned}$$

Cada caseta modificada equivale a en volumen considera cinco de las originales, se considera que el gasto obtenido puede ascender a:

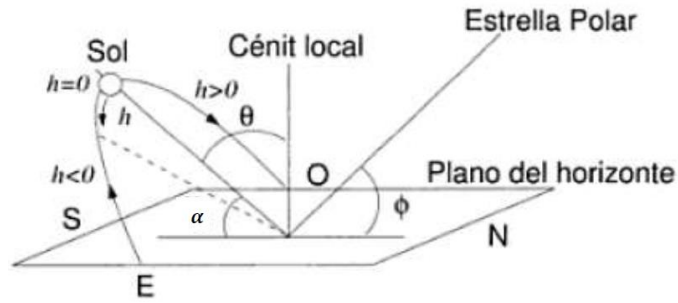
$$5Q_{ECM} = 5 * 56.763 \frac{kg}{d} = 283.814 \frac{kg}{d}$$

Por lo que el rendimiento por metro cuadrado asciende a 10.75 kg, sin embargo se diseñó para un gasto de 10.2 kg, considerando las pérdidas por la evaporación y condensación continua en el ciclo.

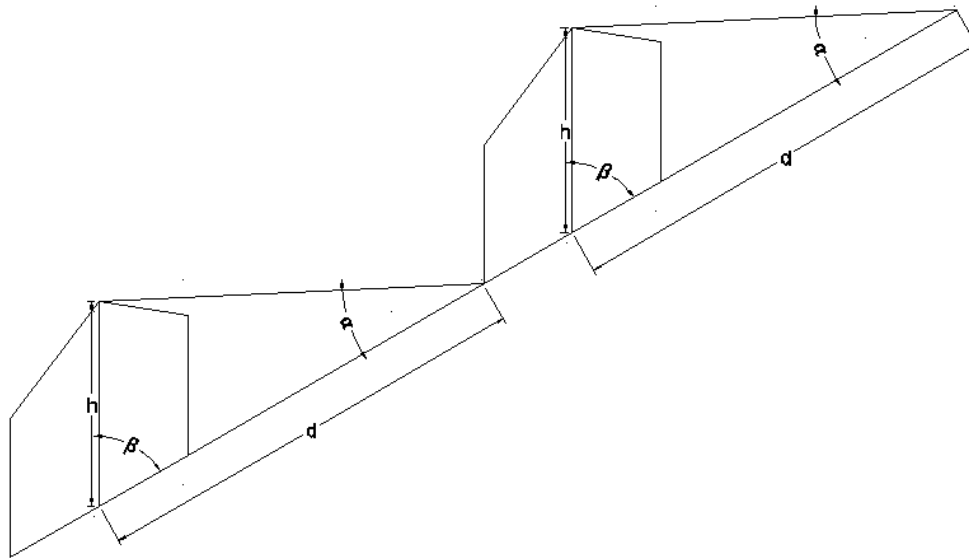
Por practicidad de construcción y operación del sistema, las canaletas se intercambian por un estanque, destacando que el material del que se construya el colector no es especialmente importante, desde el punto de vista térmico, pero sí desde otros puntos de vista. Por ejemplo, la lámina de hierro puede tener problemas de corrosión, aumentado precisamente por la presencia de las sales que se desea remover (Castillo, 2008), para este caso se elige la lámina de aluminio color negro, que debido a sus características químicas evitará la oxidación del material y facilitará su limpieza; las dimensiones son 11m de largo, 1.5 m de ancho, 0.1 m de profundidad y un bordo libre promedio de 0.07 m, para contar con un volumen de 495 litros, véase anexo 8, con una pendiente del 2% que facilite el sistema de purgado de la salmuera por dos drenes con un diámetro de 114 mm .

Las casetas se orientaron de este a oeste, siguiendo la trayectoria del Sol; sin embargo, las casetas de experimentación estaban lo suficientemente separadas para no generar un sombreado entre ellas, considerando una producción en serie, se propuso que entre ellas debe existir una distancia suficiente para no mermar la eficiencia de estas y simultáneamente debe ser lo más pequeña posible para ocupar la menor área, por lo que se calculó la distancia necesaria entre casetas durante las horas de máxima irradiación.

$$d = \frac{h \operatorname{sen}(180 - \beta - \alpha)}{\operatorname{sen} \alpha} \quad (51)$$



**Ilustración 19. Relación entre el plano horizontal local y los rayos solares**  
**Fuente: Hewitt, 2004**



**Ilustración 20. Datos para calcular la distancia**  
**Fuente: Elaboración propia**

*Donde:*

***h**, es la altura de las casetas equivalente a 2.2m*

***α**, es la altura solar (el ángulo que el Sol forma con el horizonte)*

***β**, es el ángulo de inclinación de un cuerpo plano sobre el terreno,  
en este caso es equivalente a 90° y*

$$\text{sen } \alpha = \text{cos } \lambda \text{ cos } \delta \text{ cos } \omega + \text{sen } \lambda \text{ sen } \omega$$

***λ**, es la latitud, es el ángulo entre el punto de interés y el plano del Ecuador,  
en este caso es 18°21'01''*

***δ**, es la declinación, define la posición angular del Sol cuando este tiene una  
altura máxima respecto al plano del observador, se consideró en primavera y otoño*

valores de  $0^\circ$ , mientras que en verano  $23.5^\circ$  y en invierno  $-23.5^\circ$

$\omega$ , es el ángulo horario, éste se comprende entre el plano meridiano del punto y la trayectoria del Sol

En el anexo 9 se calcularon las distancias en diferentes horas del día y en diferentes estaciones, se determinaron la distancias más desfavorables, pero económicamente viables y su promedio es de 2.375 m, por lo que se determina que los vértices de los destiladores deben estar separados entre sí esta distancia, considerando el ancho del destilador, la separación entre paredes es de 1.275, por lo que se considera adecuada una separación entre los destiladores de 1.3m.

La recolección del agua destilada se hace por medio de canaletas plásticas con una pendiente del 2% debajo de los techos donde ocurre la destilación el agua, dichas canaletas están conectadas a mangueras plásticas de pequeño diámetro que conducen el agua hasta el almacenamiento previo a la desinfección como se ve en la ilustración 23.

### Manejo de subproductos

#### 4.7

En la mayoría de los procesos de desalación se genera salmuera, que es agua de rechazo con un contenido de sales mayor a 50,000 mg/l (IMTA, 2006), en los últimos años ha aumentado la preocupación por los efectos ecológicos que pueden tener las disposiciones típicas de la salmuera, ya que generalmente son:

- Descargas al mar
- Pozos de inyección
- Lagunas de evaporación

Ninguno de los casos anteriores es aplicable en las ANP, cuyo objetivo principal es resguardar y proteger a las especies y por ende se especifican las actividades determinantemente prohibidas ya mencionadas en el marco teórico de este trabajo; por lo que se opta por desalinizar las salmueras en destiladores solares convencionales, con el fin de que las telas de las casetas no se saturen y que el gasto obtenido sea complementario.

El concepto básico del destilador solar convencional proporciona, al menos, un rendimiento general de 1 l/d de agua destilada, llegando a producir en condiciones óptimas de 5 a 9 l/d (Silva, 2012), en La Paz, México ( $24^\circ$  de latitud norte), un destilador puede lograr destilar cerca de 5 l/m<sup>2</sup> en un día de verano (Torchia, 2009); por lo que se considerara un rendimiento  $R_d$  de 2 l/m<sup>2</sup> para un tirante de 0.05m, un largo  $l_d$  de 43 m, el ancho  $w_d$  se determinó con las ecuaciones:

$$w_d * l_d = A_d \quad (52)$$

$$Q_{purga} = A_d * R_d = w_d * l_d * R_d \quad (53)$$

De (52)  
De (53)

$$w_d = \frac{Q_{purga}}{l_d * R_d} = \frac{0.5044m^3}{40.7m * 0.002 \frac{m^3}{m^2}} = 6.196m$$

Sin embargo, las dimensiones de este destilador son poco prácticas, por lo que se propuso usar dos destiladores convencionales con techumbre a dos aguas para facilitar la recolección del agua destilada en un compartimiento debajo de los contenedores de salmuera, como se dimensionó en el capítulo de almacenamiento.

Generalmente se recomienda que el ángulo de inclinación de la techumbre sea la latitud del punto donde se van a ubicar, sin embargo, se consideró que un ángulo de 30° facilitaría la escorrentía de las gotas del agua destilada, por lo que se calculan las dimensiones de los destiladores como se muestran a continuación:

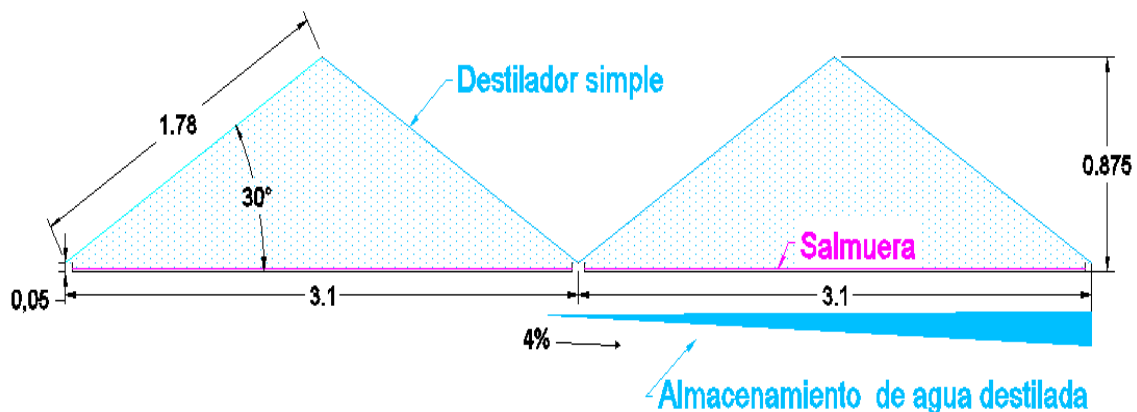
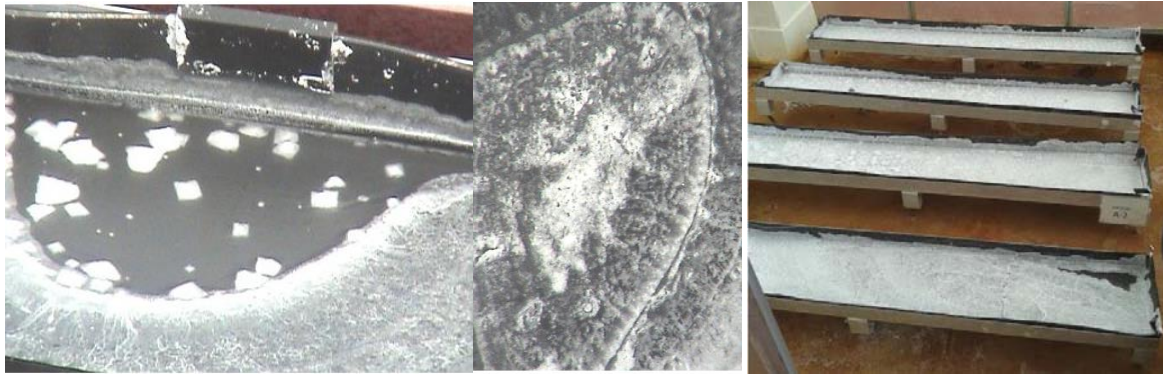


Ilustración 21. Destiladores simples para salmuera  
Fuente: Elaboración propia

El material de las techumbres es policarbonato de 4 mm de espesor y los estanques son de aluminio negro, con la finalidad que facilite la limpieza de las sales producidas diariamente, ya que se deben retirar los cristales formados para evitar que ocupen espacio innecesariamente y aumenten la concentración de la salmuera aún más.

$$M_{sales} = Q_{purga} * \chi_{purga} = 504.4 \frac{l}{d} * 0.283 \frac{kg}{l} = 142.745 \frac{kg}{d} \quad (54)$$



**Ilustración 22. Formación de cristales**  
**Fuente: Silva, 2012 y López, 2013**

El área bruta requerida para la destilación es de 669.14 m<sup>2</sup>, que en comparación al usar destiladores solares convencionales y proporcionar el gasto máximo diario de 4,900 l/d se requerirían 2,450 m<sup>2</sup> representa una marcada ventaja. Se debe considerar que esta área podría ser susceptible de reducción, si se considera que la mayor parte del tiempo la isla no está habitada por cincuenta personas, y que para las condiciones normales de operación sería suficiente con la mitad del área obtenida, la cual se podría complementar de ser necesario con agua transportada en embarcaciones.

<b>Población [hab]</b>	<b>N VS [caseta]</b>	<b>Disposición [l/d]</b>	<b>Dotación [l/d/hab]</b>	<b>Consumo [l/d/hab]</b>
<b>15</b>	6	1867.8	124.5	88.9
<b>15</b>	12	3735.7	249.0	177.8
<b>25</b>	6	1867.8	74.7	53.3
<b>25</b>	12	3735.7	149.4	106.7
<b>50</b>	12	3735.7	74.71	53.3

4.8

**Tabla 8. Comparativo de agua disponible en diferentes escenarios**

**Fuente: Elaboración propia**

### **Almacenamiento**

El almacenamiento es un elemento esencial en cualquier sistema de agua, la función principal del almacenamiento para la distribución es hacer posible almacenar agua anticipadamente a su necesidad real, en uno o más lugares de la zona de servicio, cercanos al consumidor final. Las principales ventajas del almacenamiento para las distribución, por otra parte en este proyecto tiene por objeto transformar el régimen de alimentación de agua proveniente de la fuente que generalmente es constante en el régimen de demanda que es variable en todos los casos, ya que la población consume agua en forma variable (César, 1990).



Este proyecto en particular requirió de las bondades proporcionadas por los dispositivos de almacenamiento para poder regular los gastos en el proceso y que estos a su vez no sean un obstáculo para los equipos, producciones y demandas requeridas para que el servicio sea constante.

Se requieren almacenamientos para:

- Agua salina previa al destilado, el agua marina bombeada debe almacenarse hasta que el operador asigne a cada estanque el volumen requerido para completar los 495 l.
- Agua destilada sin desinfectar, la cual se recolecta en veinticuatro horas, después de este tiempo pasa a la desinfección que es un proceso que requiere un caudal mínimo para funcionar.
- Agua potable, después de la desinfección el agua tiene las características adecuadas para consumo humano, debe almacenarse para evitar su contaminación y estar disponible en cualquier momento.
- Agua residual tratada previa a la desinfección, la desinfección que es un proceso que requiere un caudal mínimo para funcionar.
- Agua residual tratada y desinfectada, la cual puede usarse para complementar las demandas de agua, en particular para riego o limpieza, pero jamás para consumo humano.

La estructura de almacenamiento debe tener capacidad para resguardar por lo menos la disponibilidad de agua ofrecida totalmente, por lo que su volumen debe de ser:

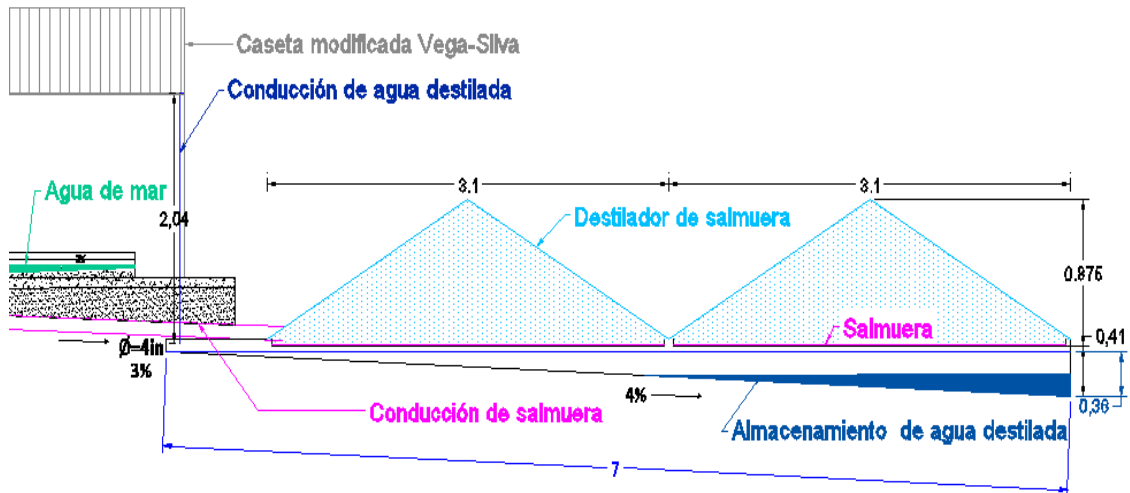
$$V_{almacenamiento} = Q_{md} * 1d = 3564.76 \frac{l}{d} * 1d \left( \frac{m^3}{1000l} \right) = 3.564m^3, \quad (55)$$

El almacenamiento del agua destilada sin desinfectar es el único que requerirá un dimensionamiento particular, ya que se contempló un contenedor ubicado debajo del sistema de destilación simple para facilitar la recolección tanto del sistema Vega- Silva como del escurrimiento del sistema convencional, con una capacidad para cinco mil litros.

Para favorecer la evaporación de la salmuera se propone que el repositorio tenga una pendiente del 4% con el tirante máximo del almacenamiento  $d_a$  el cual tiene una dimensión de 36 cm; la base máxima del almacenamiento  $b_a$  de 7 metros y el largo  $l_a$  constante de 40.7 m; estos datos se obtuvieron de la geometría del sistema.

$$V_{almacenamiento} = \frac{b_a * d_r}{2} * l_a \quad (56)$$

$$d_r = \frac{2V_{almacenamiento}}{b_a * l_a} = \frac{2 * 5m^3}{7m * 40.7 cm} = 0.035m \quad d_r < d_a; \text{ por lo que es adecuado}$$

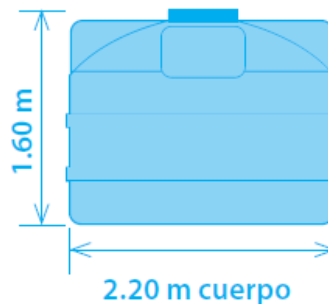


**Ilustración 23. Perfil del sistema**  
Fuente: Elaboración propia

El procedimiento constructivo para el particular almacenamiento de agua se contempló usando la pendiente del terreno natural para posteriormente ser cubierta con una geomembrana<sup>5</sup> que no permitiese el paso del agua al terreno.

Para los siguientes almacenamientos del sistema se considera usar cisternas comerciales con capacidad para 5000 l, las dimensiones se muestran a continuación:

$$V_{cis} = 5000 \text{ l}$$



**Ilustración 24. Dimensiones de cisterna comercial**  
Fuente: <http://www.rotoplas.com/>

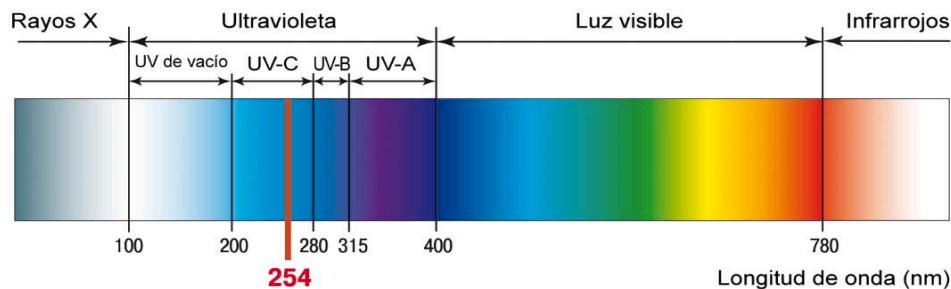
<sup>5</sup> . Las geomembranas son películas plásticas fabricadas especialmente para tener una impermeabilización así como la resistencia a las condiciones climáticas y en algunos casos son desarrolladas específicamente a cierto tipo de uso, los cuales siempre tienen que ver con la contención o aislamiento de líquidos, son fabricadas en diferentes calibres (grosos) según las necesidades requeridas, también las hay en diferentes materiales las más comunes son de PVC y HDPE.

## Desinfección

La desinfección es uno de los procesos básicos en todo tratamiento de agua, ya sea para consumo humano o para tratamiento de aguas residuales; es considerada el tratamiento mínimo que se le da al agua para fines de consumo, ya que destruye o inactiva a los organismos patógenos con el fin de evitar las enfermedades transmisibles por el agua. Actualmente están comercialmente disponibles muchos desinfectantes tales como el cloro, dióxido de cloro, el ozono y la luz ultra violeta (UV).

La cloración es un proceso popular ya que es una tecnología establecida y efectiva, que ofrece la capacidad de tener efectos residuales, que por un lado pueden favorecer el proceso al mantener el efecto germicida por un de tiempo, pero ésta misma capacidad puede ser perjudicial en un ANP donde podría dañar el equilibrio ambiental si no hay un proceso para remover el cloro residual. Por otro lado en algunas de sus presentaciones puede ser una sustancia peligrosa y de manejo delicado, y se dependería de un suministro, por lo que se opta por otra tecnología.

El sistema de desinfección con luz UV transfiere energía electromagnética desde una lámpara al material genético del organismo, cuando la radiación penetra en las paredes celulares de éste destruye la habilidad de reproducción de la célula. La eficacia de este sistema depende de las características del agua, en particular sus componentes coloidales<sup>6</sup>, la intensidad de la radiación, el tiempo de exposición y la configuración del reactor (EPA, 1999).



**Ilustración 25. Espectro electromagnético**

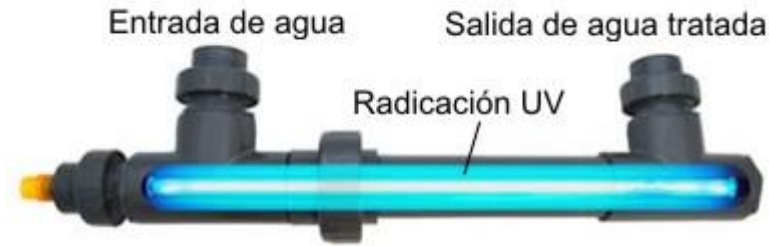
**Fuente:** [www.lit-uv.com/es/technology/](http://www.lit-uv.com/es/technology/)

Entre las ventajas de este sistema están:

- La eficacia de la desactivación de la mayoría de virus, esporas y quistes
- No hay necesidad de manejo de sustancias tóxicas, peligrosas o corrosivas
- No hay efectos residuales que puedan afectar a los seres humanos u organismos acuáticos
- No requiere mucho espacio

<sup>6</sup> Los coloides son partículas en un rango de tamaño de  $10^{-4}$  a  $10^{-6}$  mm

- Fácil manejo para los operadores



**Ilustración 26. Desinfección con luz UV**  
 Fuente: [www.carbotecnica.info/encyclopedia/luz-ultavioleta-uv/](http://www.carbotecnica.info/encyclopedia/luz-ultavioleta-uv/)

$$D = I * t \quad (57)$$

Donde:

*D*, es la dosis de luz UV que recibe el agua,

según la EPA debe ser entre  $21 - 36 \frac{mW s}{cm^2}$

*I*, es la intensidad de la lámpara en  $\frac{mW s}{cm^2}$

*t*, es el tiempo de exposición del agua a la luz UV en s

En el anexo 10 se incluye la ficha técnica de un equipo disponible en el mercado convencional con las siguientes características:

$$D = 30 \frac{mW s}{cm^2}$$

$$Q_{max} = 6 \frac{l}{min}$$

Utilizando una sola lámpara, el proceso de desinfección de toda el agua que se va a disponer para consumo humano y tratamiento de aguas residuales se lleve a cabo en:

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{\text{Disposición de agua}}{Q_{max}} = \frac{3,735.76 l}{6 \frac{l}{min}} = 622.6 min \left( \frac{hr}{60 min} \right) \quad (58)$$

$$= 10.4 hr$$

Este tiempo podría reducirse de usar más lámparas, es importante considerar tener en almacén más dispositivos ya que estos equipos, tienen un promedio de vida de un año o nueve mil horas de uso.

## 5 Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales es indispensable **parara** el saneamiento de la comunidad y protección de la reserva, que además podría aprovecharse para complementar la disponibilidad de agua para varios usos, como se ve en la tabla 9; siempre y cuando las características del agua no sean nocivas a la salud, como se estipula en **la legislación mexicana en la NOM-003-ECOL-1997** la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público, tales como el lavado de vehículos, riego de áreas verdes, abastecimiento y limpieza de instalaciones, aunque nunca para consumo humano.

Población [hab]	N VS	Agua potable			Agua tratada			Total
		Disposición [l/d]	Dotación [l/d/hab]	Consumo [l/d/hab]	Disposición [l/d]	Dotación [l/d/hab]	Consumo [l/d/hab]	Consumo total [l/d]
15.0	6.0	1867.9	124.5	88.9	1681.1	112.1	80.1	169.0

15.0	12.0	3735.8	249.1	177.9	3362.2	224.1	160.1	338.0
25.0	6.0	1867.9	74.7	53.4	1681.1	67.2	48.0	101.4
25.0	12.0	3735.8	149.4	106.7	3362.2	134.5	96.1	202.8
50.0	12.0	3735.8	74.7	53.4	3362.2	67.2	48.0	101.4

**Tabla 9. Disposición de agua**

**Fuente: Elaboración propia**

### Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA)

5.1 Existen diferentes opciones de tratamiento aplicables para tratar las aguas servidas, según su volumen y características, sin embargo, en la isla se produce un gasto tan pequeño y de origen puro doméstico, por lo que se optó por una tecnología denominada reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA), ya que en general son indicados para tratar aguas residuales sin consumo de energía, y en la isla solo se recolectarán las aguas provenientes de las instalaciones, sin arrastre de partículas del ambiente por lo que se espera un contenido de sólidos bajo, sin embargo se esperan concentraciones altas de materia orgánica, medidas con la demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO); respectivamente del orden de 800 mg/l y 350 mg/l (Metcalf & Eddy Inc., 2003), ya que el gasto entregado para consumo personal menor que en las zonas urbanizadas.

Los tratamientos anaerobios son procesos biológicos que se realizan en ausencia de oxígeno, con el objetivo de descomponer a la materia orgánica basado en la aceleración de los procesos de descomposición naturales, y se utiliza tanto para tratamiento de aguas residuales como para lodos. Los principales productos finales de la degradación anaerobia son gases, principalmente metano CH<sub>4</sub> y dióxido de carbono CO<sub>2</sub>, así como pequeñas cantidades de sulfuro de hidrógeno H<sub>2</sub>S, mercaptano RSH e hidrógeno H<sub>2</sub> y se descompone en dos fases principalmente, la primera es la fermentación ácida, donde los componentes orgánicos complejos se hidrolizan para producir unidades que se biooxiden en ácidos grasos de cadena corta, como el acético, propiónico y butilico; la segunda fase es la fermentación metánica, donde los organismos metanogénicos convierten los ácidos producidos en la etapa anterior a metano y dióxido de carbono (Ramalho, 1993).

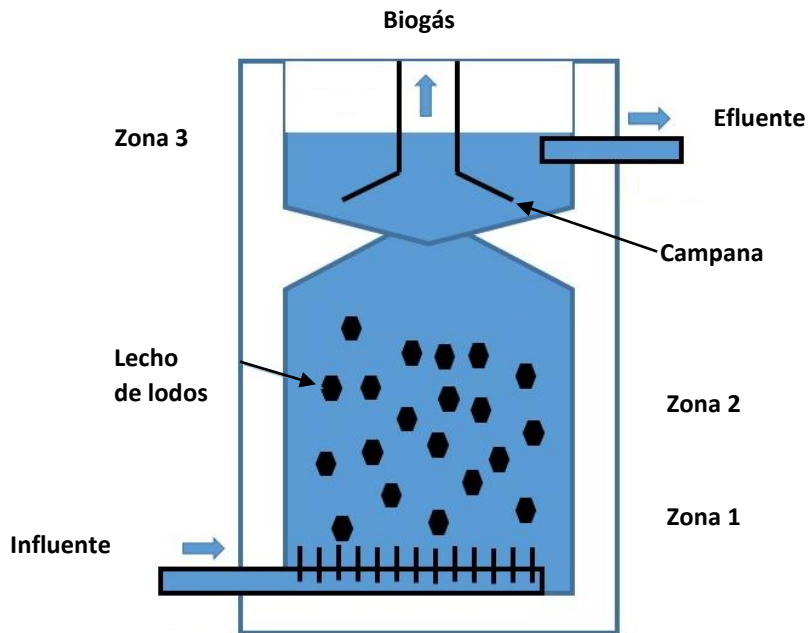
El RAFA es un tratamiento de lodos granulares o biopelícula<sup>7</sup> fija sin medio de soporte, con una cámara de digestión que tiene flujo ascendente y a cierta altura se desarrolla un manto de lodos anaerobios que es altamente activa y en el cual se da la estabilización de la materia orgánica del afluente con producción de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> (Caicedo, 2006); en biomasa el RAFA está formado por gránulos de 3 a 4 mm que tienen altas velocidades de sedimentación, y por consiguiente son retenidas casi totalmente por el reactor (Metcalf & Eddy Inc., 1985); al estar sumergido bajo el agua residual no hay aire en absoluto dentro del sistema (Ramalho, 1993).

<sup>7</sup> Una biopelícula o biomasa fija se forma de pequeños conglomerados y comunidades celulares de microorganismos (Branda, 2005)

La operación de los reactores RAFA se basa en la actividad autorregulada de diferentes grupos de bacterias que degradan la materia orgánica al establecer entre sí relaciones simbióticas de alta eficiencia metabólica bajo la forma de gránulos o flóculos, formando un lodo biológicamente activo en el reactor (Márquez, 2011). El agua a tratar asciende con una pequeña velocidad, poniéndose en contacto con una altísima concentración de lodos anaerobios, simultáneamente se llevan a cabo procesos de filtración biológica, absorción y adsorción, al mismo tiempo que decantación. (López, 1998); se puede asegurar la inmovilización de los microorganismos por la formación de flóculos y granos densos que se disponen en capas de lodo a partir del fondo del reactor.

En la ilustración 27 se muestra un esquema general de uno de estos reactores, donde se distingue:

- La zona 1 o lecho de lodo, se desarrolla una capa de lodo muy concentrado con sedimentación alta.
- La zona 2 o manta de lodo, es un espacio con un alojamiento microbiano más disperso y de menor concentración que en el lecho de lodo
- La zona 3 o de bajo nivel de turbulencia
- La campana, para evitar la salida de los lodos se incorporan un sistema separador de gas, líquido y sólidos en la parte superior del tanque denominado campana, a partir de la cual es factible colectar y reutilizar el biogás (Márquez, 2011), además sirve como sedimentador del lodo, ya que la pantalla crea una zona de bajo nivel de turbulencia donde un 99% del lodo en suspensión se sedimenta y es retornado al reactor (Ramalho, 1993).



**Ilustración 27. Reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA)**

Fuente: <http://wastewaterinfo.asia/tech-sheets/tds-012>

Entre sus ventajas están:

- Costos de implantación y manutención reducidos
- Las fermentaciones ácidas y metánicas, así como la sedimentación se da en el mismo reactor, por lo que las plantas son muy compactas
- La retención de biomasa es muy buena por lo que no hay necesidad de la recirculación de lodos y su producción es muy pequeña, además al usar tiempos de retención celular mayores a los treinta días, el lodo estará estabilizado
- Consumo pequeño de energía eléctrica y puede ser nulificado, puesto que el sistema no requiere ninguna agitación mecánica, ya que es automezclado por el movimiento ascendente del agua y de las burbujas de gas.
- Simplicidad del funcionamiento
- Bajos requerimientos nutricionales
- La concentración de biomasa es alta por lo que el proceso puede manejarse con altas cargas, intermitencia e incluso presencia de sustancias tóxicas
- Los lodos se conservan sin alimentación por largos períodos de tiempo
- Producción de metano aprovechable



### 5.1.1 Dimensionamiento del reactor

El diseño del RAFA está basado fundamentalmente en consideraciones empíricas (Ramalho, 1993), se considera la concentración de sustrato del influente, la velocidad superficial y el volumen efectivo de tratamiento para determinar el volumen requerido del reactor y sus dimensiones (Márquez, 2011); cuando se tratan aguas domésticas, la carga orgánica no es un factor limitante, ya que puede ser menor de 2.5 a 3 kg DQO/m<sup>3</sup>d.

El volumen efectivo de tratamiento es el volumen ocupado por el manto de lodo y de biomasa activa y un espacio adicional existe entre el volumen efectivo y la unidad de recolección de gas donde se produce una cierta separación adicional de sólidos y la biomasa se diluye.

Las principales características físicas que requieren una cuidadosa consideración son: la alimentación de entrada, la separación y recolección de gas y la retirada del efluente, para proveer una distribución uniforme y evitar la formación de zonas muertas. Estos dos aspectos son muy importantes sobre todo cuando se tratan aguas residuales débiles, ya que se puede tener menor producción de gas y mezcla del manto de lodos

El separador de gas está diseñado para recolectar el biogás, previniendo el lavado de sólidos, fomentando la separación de partículas de gases y sólidos, para permitir que los sólidos se deslicen hacia atrás en la zona de manto de lodos, y ayudar a mejorar la eliminación de sólidos en el efluente, una serie de pantallas en forma de V invertida se utiliza junto a vertederos de efluentes para lograr los objetivos mencionados

Los objetivos a lograr con la implementación de las campanas para cada reactor son:

- Separación y descarga adecuadas del biogás
- Permitir el deslizamiento del lodo dentro del compartimento de digestión
- Servir como una barrera para expansiones de lodos dentro del sedimentador
- Prevenir la salida de lodo granular flotante y floculento

Para el dimensionamiento de la campana se tienen en cuenta la velocidad de flujo ascendente en la abertura, el ángulo de los lados de la campana y el traslapo vertical, los cuales indican que la estructura convencional es la más adecuada, gracias a su fácil construcción, simplicidad de instalación, funcionamiento y eficiencia.

Con la metodología propuesta por Márquez se determinaron las dimensiones de los posibles reactores necesarios para tratar las aguas residuales de la isla.

Para determinar el diseño de dos reactores se calcula el caudal mínimo a recibir:

$$Q_{minAR} = \%R \frac{Q_{medio}}{2} = 0.9 * \frac{Disposición\ de\ agua}{2} \quad (59)$$

$$= 0.9 * \frac{3.736 \frac{m^3}{d}}{2} = 1.693 \frac{m^3}{d}$$

Se propone un tiempo de residencia hidráulica  $\tau$ ; en general se considera que para un sistema anaerobio de manto de lodos puede funcionar con cuatro horas de contacto como mínimo hasta lapsos medios entre catorce y dieciocho horas, considerando que si los tiempos de retención son muy cortos puede ocasionarse pérdida excesiva de biomasa, por lo que se propuso para el diseño 1 día, con lo que se calcula el volumen del reactor  $V_R$ :

$$V_R = \tau * Q_{minAR} = 1d * 1.693 \frac{m^3}{d} = 1.693m^3 \quad De (58)$$

Se propone una carga hidráulica  $C_H$  unitaria, la cual representa la relación entre el gasto y el área del reactor, se sugiere ésta no exceda de 1 m/h, pues este es el valor típico recomendado para un correcto funcionamiento.

$$A_R = \frac{Q_{minAR}}{C_H} = \frac{1.693 \frac{m^3}{24 h}}{1 \frac{m}{h}} = 1.693m^2 \quad (60)$$

Se determinó que el reactor sea cilíndrico para evitar áreas muertas y se determina con (40) que tenga un diámetro  $\Phi_R$  de 1.5m, para utilizar medidas comerciales y se calcula la altura efectiva del reactor  $H_R$ , con el área real del reactor de 1.767 m<sup>2</sup>, la cual se sugiere sea mayor o igual a un metro.

$$H_R = \frac{V_R}{A_R} = \frac{1.693 m^3}{1.767m^2} = 0.96m \approx 1m \quad (61)$$

Se determina la velocidad de flujo en la campana con la carga hidráulica real con la ecuación (62):

$$V_C = 4C_H = 4 * 0.96 \frac{m}{h} = 3.83 \frac{m}{h} \quad (62)$$

El área de abertura relaciona el gasto y la velocidad de flujo en la campana con:

$$A_{abertura} = \frac{Q_{minAR}}{V_C} = \frac{1.693 \frac{m^3}{24 h}}{3.83 \frac{m}{h}} = 0.44m^2 \quad De (41)$$

El área de la sección transversal de la campana es la diferencia entre el área del reactor y el área de la abertura, a partir de este valor se puede calcular el radio mayor de la campana  $r_{campana}$ , mediante la siguiente ecuación:

$$r_{campana} = \sqrt{\frac{A_R - A_{abertura}}{\pi}} = \sqrt{\frac{A_{campana}}{\pi}} = \sqrt{\frac{1.32m^2}{\pi}} = 0.65m \quad (63)$$

El ancho de la abertura  $W_{abertura}$  está relacionado con los radios del reactor y los de la campana, por lo que se tiene:

$$W_{abertura} = R_{Reactor} - R_{Campana} = \frac{1.5m}{2} - 0.65m = 0.1m \quad (64)$$

La altura de la campana  $H_G$  requiere conocer previamente la longitud  $W_G$  que existe entre el extremo del radio mayor de la campana y el extremo de la abertura de la campana, el ángulo que se recomienda es de  $60^\circ$  debido a que ajusta de forma más adecuada a las condiciones de diseño, tanto de la campana como del tubo del reactor. Para lo cual se presentan las siguientes expresiones:

$$W_G = R_{Campana} - 0.5W_{abertura} = 0.65m - 0.5(0.1m) = 0.6m \quad (65)$$

$$H_G = W_G \tan \theta = 0.694m \tan 60 = 1.04m \quad (66)$$

El traslapo  $T_V$ , se refiere a los deflectores que se colocan para dirigir los gases producidos hacia la campana y se pueda hacer la separación de los gases del líquido.

$$T_V = 1.5W_{abertura} = 1.5(0.1m) = 0.15m \quad (67)$$

El ancho de los deflectores  $W_D$ , se calcula con la suma del traslapo y del ancho de la abertura:

$$W_D = T_V + W_{abertura} = 0.15m + 0.1 = 0.25m \quad (68)$$

La longitud de los deflectores  $L_D$ , está en función de un ángulo, el cual, para facilitar la construcción se considera de  $45$  grados, la expresión para su cálculo es la siguiente:

$$L_D = 2W_D \tan 45 = 2(0.25m) \tan 45 = 0.5m \quad (69)$$

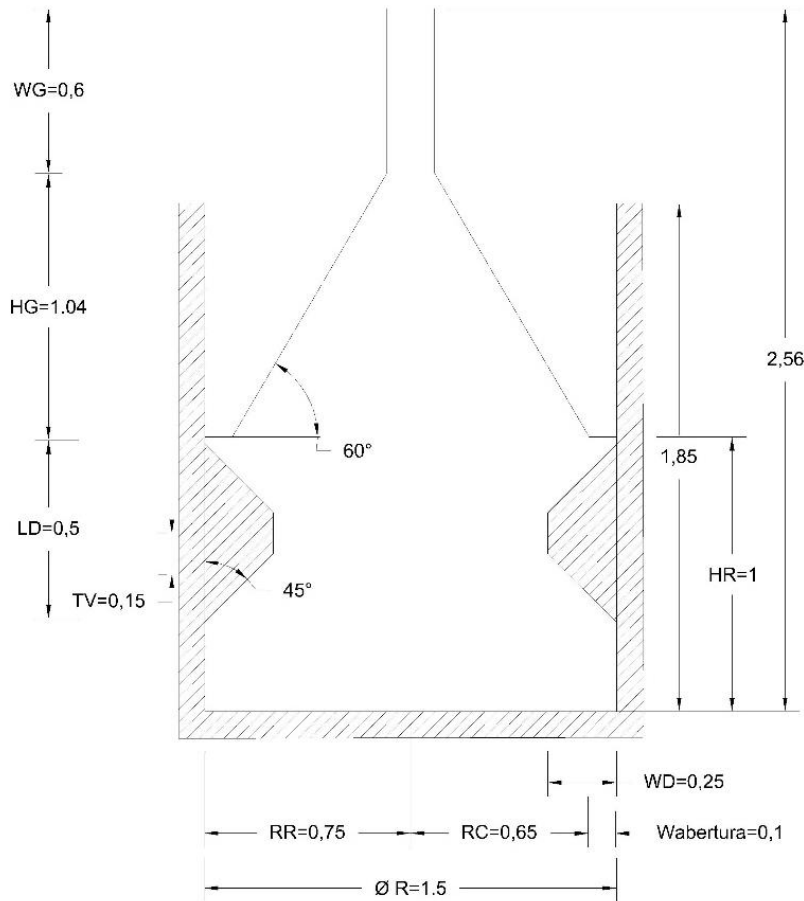
El flujo másico representa la carga orgánica que se tiene por día, se calcula con:

$$F = Q_{minAR} * \chi_{DQO} = 1,693.261 \frac{l}{d} * \frac{0.0008kg}{l} = 1.354 \frac{kg}{d} \quad (70)$$

Pueden esperarse rendimientos entre 50 y 70% para la remoción de DQO y DBO, en base a datos experimentales se estimaron:

$$\eta_{DQO} = 100(1 - 0.68\tau^{-0.35}) = 100(1 - 0.68(24)^{-0.35}) = 77.64\% \quad (71)$$

$$\eta_{DBO} = 100(1 - 0.7\tau^{-0.5}) = 100(1 - 0.7(24)^{-0.5}) = 85.71\% \quad (72)$$



**Ilustración 28. Esquema de la campana de separación gas-líquido**  
**Fuente: Modificado de Márquez, 2012**

## 5.2

### Filtración

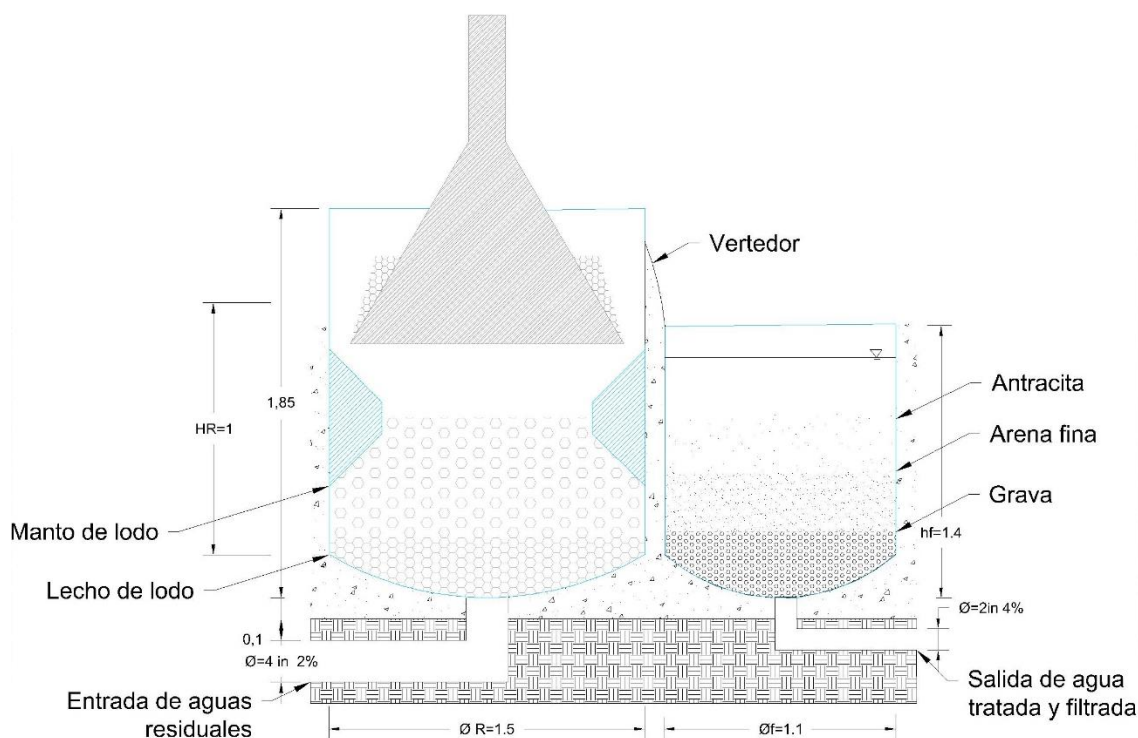
El efluente del RAFA potencialmente podría contener partículas que afectaran su calidad y el proceso de la desinfección, ya que la presencia de estas impurezas podrían afectar la eliminación de organismos patógenos debido al efecto de sombreado de los sólidos ante la luz UV, es por ello que se propone una filtración previa a la desinfección, donde se separen las partículas coloidales o suspendidas del agua haciéndola pasar por un medio poroso, que usualmente es un lecho de arena, aprovechando la gravedad para vencer la resistencia en el filtro, donde las partículas de mayor tamaño que los poros del medio sean retenidas y las partículas más pequeñas se adhieran a la superficie del medio filtrante.

Aunque la filtración es una de las principales operaciones unitarias utilizadas en el tratamiento de aguas para consumo humano, se ha constituido como una operación de capacidad comprobada para la obtención de eliminaciones de adicionales de sólidos suspendidos presente en los efluentes de los de agua residual proveniente de los procesos de tratamiento biológico y químicos (Metcalf & Eddy Inc., 1985).

Los principales tipos de filtros de medio granular pueden clasificarse de acuerdo con el número de medios, los más comunes son los lechos de medio único, medio doble o triple, donde cada uno de los lechos tiene características de espesor y de tamaño de grano diferentes entre sí, en donde la distribución de los tamaños de los granos va en el sentido del flujo del filtro desde el grano grueso al fino; el tamaño del grano es la característica principal del medio filtrante ya que afecta tanto la pérdida de carga como la velocidad y esto es importante porque influye en el área requerida.

Uno de los factores más importantes a considerar es la concentración de sólidos en el influente del filtro, generalmente la concentración de sólidos en suspensión en el efluente de plantas das varía, las partículas contenidas pueden considerarse pequeñas dentro del intervalo de 1 a 15  $\mu\text{m}$  y grandes de 50 a 150  $\mu\text{m}$  (Metcalf & Eddy Inc., 1985).

Para la operación de filtrado se propuso un filtro de tres lechos, el primero con un espesor de 10 cm de grava, el segundo de 15 cm de antracita y 50 cm de arena, en un filtro de 1.1 m de diámetro y 1.4 m de alto, como se muestra a continuación:



**Ilustración 29. RAFA y filtro**  
**Fuente: Elaboración propia**

## 6 Evaluación económica

La preparación de un presupuesto es una parte fundamental para el desarrollo de un proyecto, además de ser un factor clave en la evaluación las diferentes soluciones que ofrece el mercado.

En general un presupuesto es la compilación de los costos directos, indirectos y financieros de los conceptos de obra a realizar, incluyendo los materiales, equipos, mano de obra, gastos de operación, gastos administrativos y el financiamiento requerido para poder llevar a cabo las actividades planeadas.

En este trabajo presenta en el anexo 11 los importes comerciales en el 2015 y en moneda nacional, de los elementos más relevantes del sistema propuesto, sin embargo no están contemplados en los precios algunos aspectos relevantes que se especifican a continuación:

1. El costo del traslado hacia la Isla Clarión, por la naturaleza del ANP, no hay embarcaciones comerciales capaces de trasladar los artículos y el personal necesario, por lo que se requeriría aprovechar los viajes de las embarcaciones de la SEMAR.
2. Los costos por mano de obra y renta del equipo de perforación son susceptibles a aumentar considerando que el personal tendrá que viajar hasta la isla y hospedarse ahí hasta que la SEMAR pueda trasladarlos de nuevo al continente.
3. Los gastos de hospedaje ni viáticos.
4. Los costos de estudios preliminares de topografía, calidad del agua, radiación y mecánica de suelos.
5. Los costos indirectos ni financieros, puesto que los gastos de operación, administrativos y de financiamiento, son particulares de la empresa potencial que desarrolle el proyecto.
6. Los costos de equipos auxiliares de emergencia como son los generadores eléctricos.
7. El costo del terreno, ya que está dentro del ANP.
8. Sueldos de personal de operación, ya que el sistema será operado por el personal de la SEMAR.

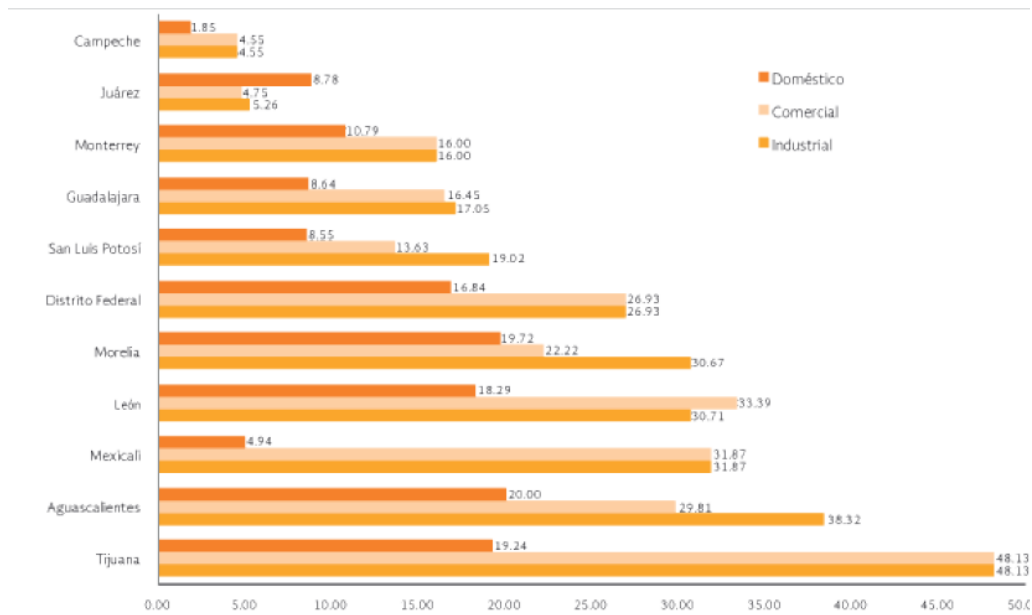
Como se puede ver en el anexo 11 se estimó una inversión inicial de \$1,411, 839.49 pesos mexicanos, de los cuales el costo aproximado del sistema de abastecimiento de agua representa el 97.5% de la inversión inicial. El sistema está diseñado para operar por lo menos diez años, por lo que se calculó el costo de la reposición de las piezas que requerirán ser cambiadas en este lapso de tiempo, como las lámparas para la desinfección que tienen una duración aproximada de un año, considerándose un aumento en su precio de 10%; la inversión anual promedio para el mantenimiento de los equipos asciende a \$11,663.30.

Para calcular el costo de un metro cúbico de agua y determinar si es competitivo el sistema se utilizó:

$$C_l = \frac{\text{Inversión inicial} + \text{Reposiciones}}{\text{Disposición total de agua} * 365 \text{ d} * 10 \text{ años}} \quad (73)$$

$$= \frac{\$1,411,839.49 + \$116,633.00}{7,098 \frac{l}{d} * 365 \text{ d} * 10 \text{ años}} = \frac{\$0.06}{l} = \frac{\$59}{m^3}$$

El costo por metro cúbico es elevado en comparación con las tarifas que se ofrecen en diferentes ciudades del país como se ve en la ilustración 30, pero es mucho menor al del agua embotellada cuyos precios en el 2015 varían por litro desde \$8.00 hasta \$14.00.



**Ilustración 30. Comparativo de tarifas de agua**  
Fuente: Elaboración propia

## 7 Conclusiones y recomendaciones

### Conclusiones

En el presente trabajo se desarrolló una propuesta de plan de manejo de recursos hídricos para las instalaciones de la SEMAR en la Isla Clarión, el cual incluye un sistema de abastecimiento con base en la desalinización de agua de mar por medio de la destilación solar utilizando el sistema Vega-Silva y el tratamiento de aguas residuales por medio de un reactor anaerobio de flujo ascendente.

7.1

1. En el caso de estudio presentado se determinó que las tecnologías a base de la energía solar, como la destilación de agua de mar resultan viables para su uso en las instalaciones remotas de los Estados Unidos Mexicanos, ya que las condiciones de irradiancia en el territorio nacional hacen posible su aprovechamiento, sin embargo, es necesario considerar los cambios en el territorio de las condiciones climatológicas y orográficas, para que estas funcionen con la eficiencia esperada, además de determinar las posibles mermas en su eficiencia y tratar de mitigarlas, ya que las diferentes alternativas tecnológicas se desarrollan en circunstancias ambientales que las favorecen, por lo que la amplia gama de soluciones para el abastecimiento y tratamiento de aguas residuales debe corresponder a las condiciones medioambientales donde se va a implementar, por lo que se requiere una investigación previa y de ser posible una visita de campo que permita recopilar la información para asegurar el funcionamiento del sistema.

Los sistemas de destilación de agua de mar son una opción viable para comunidades con poco acceso al agua; considerando que una persona requiere para su supervivencia al día solo dos litros de agua; aunque los usos y costumbres actuales elevan los requerimientos de agua, por ejemplo, en México las dotaciones ascienden a más de 100 litros por habitante al día; lo que limita severamente a los destiladores, sin embargo, como cualquier otra tecnología es susceptible a mejoras continuas en el diseño que permitan tener mejores rendimientos, un ejemplo de ello son las casetas de destilación Vega-Silva.

2. Se desarrolló un marco físico, social y legal de la Isla Clarión, bajo el cual se construyeron todas las hipótesis de variables ambientales necesarias para el diseño.
3. Se dimensionaron, caracterizaron y cuantificaron por medios teóricos, con base en el marco teórico de información pública, los elementos más relevantes para el abastecimiento a partir de la destilación de agua marina y tratamiento de aguas residuales de la Isla Clarión, bajo las condiciones que implica la lejanía de las instalaciones y los pocos recursos disponibles, ya que el abastecimiento de agua



de instalaciones remotas requiere evaluar múltiples factores para aplicar las diferentes alternativas que incluyen soluciones a nivel doméstico y comunal, que permitan otorgar los servicios básicos de manera constante y con calidad adecuada; y en el caso de las ANP se requerirá que además de que las soluciones otorgadas estén dentro de las consideraciones que prevé la legislación, que tengan el menor impacto ambiental posible.

4. Se determinó el costo de los elementos principales del proyecto, con limitaciones en los costos presentados por la lejanía de las instalaciones y las implicaciones que esto conlleva. El costo del metro cúbico producido en el sistema es relativamente más costoso que los ofrecidos en diferentes ciudades del país, sin embargo, se concluye que es competitivo bajo las circunstancias en las que se encuentra la isla.

## **Recomendaciones**

- 7.2** El desarrollo de un marco teórico sobre el área de estudio es una herramienta útil para desarrollar suposiciones sobre información desconocida, sin embargo, no sustituye los estudios técnicos de campo, los cuales aportan al desarrollo del proyecto mayor afinidad ante las adversidades ambientales a enfrentar.

En México aún no hay legislación enfocada a la desalinización de agua, pero es importante mantener contacto y revisar las próximas normas en elaboración por parte del Comité Consultivo Nacional de Normalización (CCNNSA), en particular aquella denominada Norma que establece los requisitos para las obras de toma y descarga, que deben cumplir las plantas desalinizadoras (elaboración conjunta con la SEMARNAT), ya que este documento de trabajo no se encuentra aún disponible al público en general solo pude tener acceso a él, los miembros del grupo de trabajo, se espera que próximamente sea publicado en el DOF como un proyecto de NOM para consulta pública.

## 8 Referencias

- **Bibliografía**
- i. Allen, R. Pereira, L. Raes, D. Smith M. 2006. Evaporación del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua en los cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. 323pp
- ii. Bryan, W. 1967. Geology and Petrology of Clarion Island, México. Geolical Society American. 147pp.
- iii. César, E. 1990. Abastecimiento de agua potable. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 258pp.
- iv. Comité Asesor Nacional sobre el Territorio Insular Mexicano. 2012. Estrategia Nacional para la Conservación y el Desarrollo Sustentable del Territorio Insular Mexicano. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Secretaría de Gobernación, Secretaría de Marina-Armada de México y Grupo de Ecología y Conservación de Islas, A.C. México, D.F. y Ensenada, B.C. México. 125 pp.
- v. CONAGUA<sub>a</sub>. 2014. Estadísticas del agua en México. Edición 2014. Editor Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 239pp.
- vi. CONAGUA<sub>b</sub>. 2007. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Datos básicos. Editor Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 85pp.
- vii. CONAGUA<sub>c</sub>. 2007. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas potabilizadoras tipo de tecnología simplificada. Editor Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 329pp.
- viii. CONAGUA<sub>d</sub>. 2007. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Perforación de pozos. Editor Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 355pp.
- ix. CONAGUA<sub>e</sub>. 2014. Estadísticas del agua en México. Editor Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 239pp.
- x. CONANP-SEMARNAT. 2004. Programa de conservación y manejo Reserva de la Biosfera Archipiélago de Revillagigedo. Editor Dirección General de Manejo para la Conservación, CONANP. México. 222pp.
- xi. Fair, G. Grejer J. Okun J. Abastecimiento de agua y remoción de aguas residuales. Editorial Noriega Limusa. México. 1990. 576pp.
- xii. Fattorrelli, S. Fernández, P. 2011. Diseño hidrológico. Water Assesment and Advisory Global Network. Edición digital. 531pp.
- xiii. Freeze, A. Cherry, J. 1979. Groundwater. Prentice-Hall. México. 604pp.
- xiv. García, E. 1973. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Publ. UNAM, México. 246 pp.

- xv. Gleik, P. 1996. Basic water requirements for human activities: meeting Basic Needs. Pacific Institute for Studies in Development, Environment and Security. Oakland.
- xvi. INEGI. 2011. Catálogo del Territorio Insular. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Secretaría de Gobernación, Secretaría de Marina, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México y Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Documento no publicado (en revisión, 2011).
- xvii. Giancoli, C. Física. Principios con aplicaciones. Sexta edición. Prentice Hall. México. 753pp.
- xviii. Metcalf and Eddy Inc. Tchobanoglous, G. Burton, F. Stensel, D. Ingeniería sanitaria. Tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales. Editorial MacGraw Hill. Segunda edición. México. 1985. 697pp.
- xix. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 2000. Manual de captación y aprovechamiento del agua de lluvia. Experiencias en América Latina. Serie: zonas áridas y semiáridas No 13. Santiago. 235pp.
- xx. Ramalho, R. Tratamiento de aguas residuales. Editorial Reverte. Quebec. 1993. 705 pp.
- xxi. Sotelo, G. Hidráulica general. Volumen 1. 1997. LIMUSA. México. 561pp.
- xxii. UNESCO. 2003. Water for people, water for life. UNESCO Mundi-Prensa Libros. París. 36pp.
- xxiii. Vázquez, A. César, E. Impacto ambiental. Facultad de Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México e Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Primera edición. 1994. 258 pp.
- xxiv. World Health Organization. 2005. Environmental Health Impact Assessment of Development Projects: A Practical Guide for the WHO Eastern Mediterranean Region. World Health Organization, Regional Office for the Eastern Mediterranean (EMWO), Regional Centre for Environmental Health Activities

- **Legislación publicada en el Diario Oficial de la Federación**

- i. Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, Ciudad de México, Estados Unidos Mexicanos, 5 de febrero de 1917.
- ii. Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar, Ciudad de México, Estados Unidos Mexicanos, 16 de noviembre de 1994.
- iii. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, Estados Unidos Mexicanos, 28 de enero de 1988.
- iv. Ley Federal del Mar, Ciudad de México, Estados Unidos Mexicanos, 8 de enero de 1986.
- v. Ley de Aguas Nacionales, Ciudad de México, Estados Unidos Mexicanos, 1 de diciembre de 1992.

- vi. Ley Orgánica de la Armada de México, Ciudad de México, Estados Unidos Mexicanos, 30 de diciembre de 2002.
- vii. Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público. Ciudad de México, Estados Unidos Mexicanos, 1997.
- viii. Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Ciudad de México, Estados Unidos Mexicanos, 1994.
- ix. Norma Técnica NT-011-CNA-2001, Métodos de proyección de población, junio de 2001.
- x. Decreto Presidencial de Creación del Área Natural Protegida con el carácter de Reserva de la Biosfera Archipiélago de Revillagigedo, ubicada en el Océano Pacífico, Ciudad de México, Estados Unidos Mexicanos, 6 de junio de 1994.
- xi. Programa de Manejo del Área Natural Protegida con el carácter de Reserva de la Biosfera Archipiélago de Revillagigedo, ubicada en el Océano Pacífico, Ciudad de México, Estados Unidos Mexicanos, 6 de junio de 1994, Ciudad de México, Estados Unidos Mexicanos, 28 de noviembre de 2007.
- xii. Propuestas de la Ley General de Aguas, Ciudad de México, Estados Unidos Mexicanos, 5 de marzo de 2015.

- **Tesis**

- i. Castillo Téllez, Margarita. Desarrollo y análisis de destiladores solares de agua con convección natural y convección forzada. Tesis de maestría. Ciudad de México, México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2008. 77 pp.
- ii. Caicedo, F. Diseño, construcción y arranque de un reactor U.A.S.B. piloto para el tratamiento de lixiviados. Tesis de Especialidad en Ingeniería Ambiental-Área Sanitaria. Universidad Nacional de Colombia. 2006.
- iii. Dwayne, G. Evaluación de alternativas para la desalinización de agua de mar aplicables en la Isla Unión, San Vicente y Las Granadinas. Tesis de Licenciatura Ciudad de México, México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2014. 123 pp.
- iv. López Ortega, Mónica Guadalupe. Evaluación de un destilador solar tipo invernadero asistido con telas de evapotranspiración para la obtención de agua potable a partir de agua de mar. Tesis de maestría. Ciudad de México, México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2014. 99 pp.
- v. Silva Martínez, Ana Elisa. Mejoramiento de la calidad de aguas salinas y salobres mediante un sistema de evapotranspiración y destilación solar. Tesis de doctorado. Ciudad de México, México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2012. 111pp.

- **Artículos y monografías**
  - i. Branda, S., Vilk, A., Friedman, L., Kolter, R. 2005. Biofilms: the matrix revisited. *Trend in Microbiology* No. 13. 6pp.
  - ii. Chaibi, M.T. Thermal Solar Desalination Technologies for Small-Scale Irrigation. 2013 *American Journal of Energy Reserch*. Vol. 1, No.3, 25-32pp.  
<http://pubs.sciepub.com/ajer/1/2/1>
  - iii. Cotruvo. Water Desalination Processes and Associated Health Issues. 2005. *Water Conditioning and Purification*. January, 13-17. [www.wcponline](http://www.wcponline.com), Issue 47, #1
  - iv. Cotruvo. Health Aspects of Calcium and Magnesium in Drinking Water. 2006. *Water Conditioning and Purification*, June, 40-44. [www.wcponline](http://www.wcponline.com), Issue 48, #6.  
[www.watertreatmentguide.com](http://www.watertreatmentguide.com)
  - v. Gleik, P. Basic Water Requirements for Human Activities: Metting Basic Needs. Pacific Institute for Studies in Development, Enviroment, and Security. Oakland. 1996.
  - vi. López, M. El reactor anaeróbico tipo EASA: nuevo reactor hibrido de flujo ascendente. 1998. Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
  - vii. Mello, C., da Rocha A. Potabilización del agua de mar por destilación solar. Organización Panamericana de la Salud. Biblioteca Virtual de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental. Brasil. Edición electrónica.
  - viii. Márquez A., Morales E. Características sedimentológicas de las playas de la Isla Clarión, Colima, México.1987. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología C.C.H., Universidad Nacional Autónoma de México. México. 17pp.
  - ix. Márquez, M., Martínez S. 2011. Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (RAFA's o UASB) Antología. Centro Tecnológico Aragón. 31pp.
  - x. Torchia J., Porta M., Cervantes J. Análisis de energía en estado permanente de un destilador solar simple. 2010. *Ingeniería investigación y tecnología*. Vol.11, n.1, 25-34pp.
  - xi. Tiwari, G.N. Thomas, Dimiri, V., Chel, A. Parametric study of an active and passive solar distillation system: Energy and exergy analysis. *Desalination*. 2000. Center for Energy Studies, Indian Institute of Technology Delhi. India. 18pp.
  - xii. United States Enviromental Protection Agency (EPA). 1999. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Desinfección con luz ultravioleta. Office of Water. Whashington D.C. 9pp.
- **Páginas consultadas**
  - i. INECC  
<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/2/revill.html>, 02/03/2015
  - ii. INEGI  
<http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/islas/default.aspx?tema=T>, 25/02/2015

- <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=702825611361>,  
02/03/2015
- iii. Periódico Excélsior  
<http://www.excelsior.com.mx> 25/02/2015
- iv. SEMAR  
<http://meteorologia.semar.gob.mx>, 25/02/2015
- v. SENER  
<http://www.energia.gob.mx/res/1803/Solar.pdf>
- vi. SIMEC  
<https://simec.conanp.gob.mx/ficha.php?anp=82&=11> 25/07/2015
- vii. SRE  
<https://sre.gob.mx/images/stories/doctransparencia/docs/09/laudo.pdf>
- viii. The Cornell Lab of Ornithology  
<http://neotropical.birds.cornell.edu/>, 28/09/2015
- ix. The Sphere Project  
<http://www.spherehandbook.org/en/water-supply-standard-1-access-and-water-quantity/>, 07/9/2015

• **Sistemas de información geográfica consultados**

- i. CONANP  
<http://www.conanp.gob.mx/sig/> , 25/02/2015
- ii. RAMSAR  
<http://ramsar.conanp.gob.mx/lsr.php>, 25/02/2015
- iii. SIMEC  
<https://simec.conanp.gob.mx/ficha.php?anp=82&reg=11#image11>, 25/02/2015

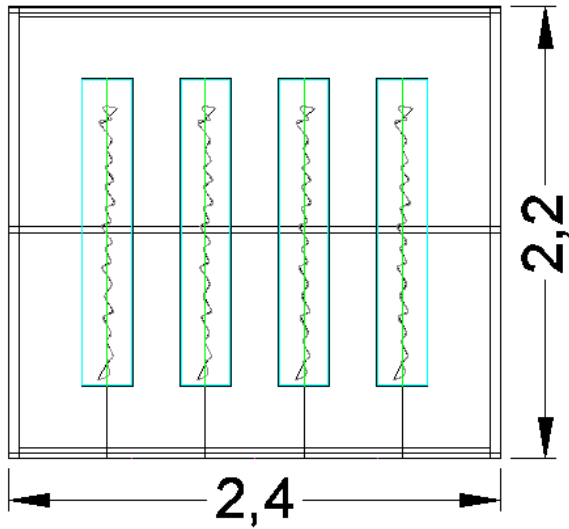
• **Cursos**

- i. González, C. Curso Abastecimiento de agua potable y alcantarillado. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2013.
- ii. Monterrubio, P. Curso Tecnologías alternativas para edificios. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2014.

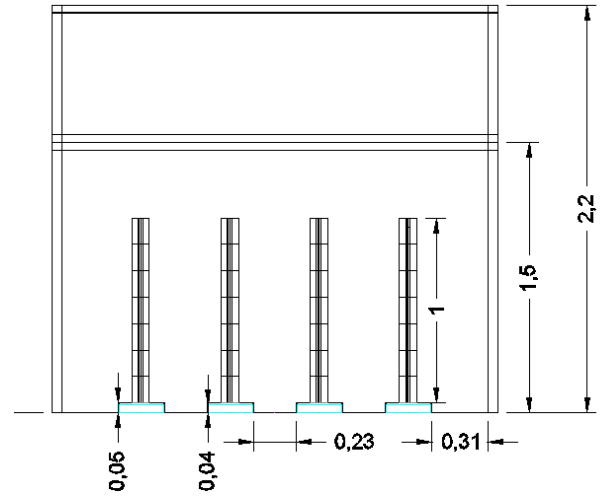
## 9 Anexos

### Anexo 1. Detalles del destilador Vega-Silva Fuente: Elaboración propia

Planta



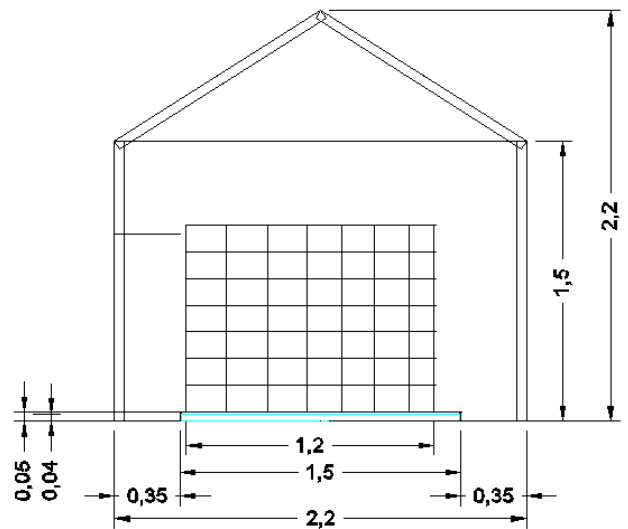
Perfil



Vista real



Frente



## Anexo 2. Subzonas de amortiguamiento y aprovechamiento de los recursos naturales

Fuente: Elaboración propia

Subzona	Descripción	Actividades permitidas	Infraestructura
<b>De preservación</b>	Buen estado de conservación, contienen ecosistemas relevantes o frágiles, o fenómenos naturales relevantes, en las actividades requieren de un manejo específico su preservación	La investigación científica , el monitoreo del ambiente, las actividades de educación ambiental y productivas de bajo impacto ambiental	La infraestructura de apoyo que se requiera, utilizando ecotécnicas y materiales tradicionales de construcción propios de la región, aprovechamiento de los recursos naturales para la satisfacción de las necesidades económicas básicas y de autoconsumo de los pobladores, utilizando métodos tradicionales enfocados a la sustentabilidad, conforme lo previsto en las disposiciones legales y reglamentarias aplicables
<b>De uso tradicional</b>	Los recursos naturales han sido aprovechados de manera tradicional y continua, sin ocasionar alteraciones significativas en el ecosistema.	Relativas a la satisfacción de las necesidades socioeconómicas y culturales de los habitantes del área protegida	
<b>De aprovechamiento sustentable de los recursos naturales</b>	Aprovechamiento de los recursos naturales y todas las actividades productivas se efectúen bajo esquemas de aprovechamiento sustentable	Aprovechamiento de los recursos naturales renovables, la investigación científica, la educación ambiental, el desarrollo de actividades turísticas de bajo impacto y el aprovechamiento sustentable de la vida silvestre.	En dichas subzonas sólo se podrán ejecutar obras públicas o privadas para la instalación de infraestructura o explotación de recursos naturales, que generen beneficios públicos, que guarden armonía con el paisaje, que no provoquen desequilibrio ecológico grave y que estén sujetos a estrictas regulaciones de uso sustentable de los recursos naturales
<b>De aprovechamiento sustentable de los ecosistemas</b>	Superficies con usos agrícolas y pecuarios a actuales	Actividades agrícolas y pecuarias de baja intensidad, agroforestería y silvopastoriles.	
<b>De aprovechamiento especial:</b>	Superficies de extensión reducida, con presencia de recursos naturales que son esenciales para el desarrollo social.	Explotación sin deteriorar el ecosistema, modificar el paisaje de forma sustancial, ni causar impactos ambientales irreversibles.	



**Anexo.2 Subzonas de amortiguamiento y aprovechamiento de los recursos naturales  
(Continuación)**

Subzona	Descripción	Actividades permitidas	Infraestructura
<b>De uso público</b>	Aquellas superficies que presentan atractivos naturales	La realización de actividades de recreación y esparcimiento, en donde es posible mantener concentraciones de visitantes, en los límites que se determinen con base en la capacidad de carga de los ecosistemas	Instalaciones para el turismo, investigación y monitoreo del ambiente, y la educación ambiental, congruentes con los propósitos de protección y manejo de cada área natural protegida.
<b>De asentamientos humanos</b>	Hay modificación sustancial o desaparición de los ecosistemas originales, debido al desarrollo de asentamientos humanos	En estas subzonas deberán utilizarse preferentemente para su rehabilitación, especies nativas de la región; o en su caso, especies compatibles con el funcionamiento y la estructura de los ecosistemas originales	No especificada.
<b>De recuperación</b>	Los recursos naturales han resultado severamente alterados, y que serán objeto de programas de recuperación y rehabilitación.		

### Anexo 3. Especificaciones técnicas del equipo bombeo

Fuente: <http://www.orledsolar.com/>

## Linea OLS



### Sistema Solar de Bomba Sumergible de Corriente Directa

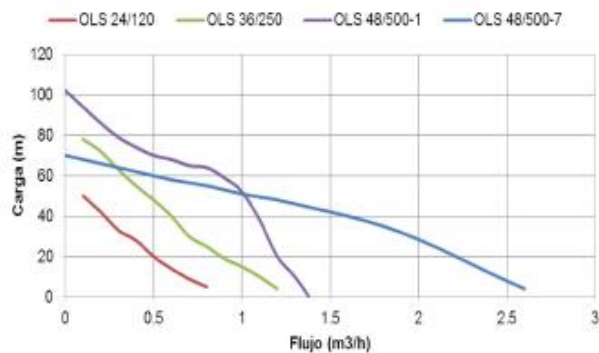
#### CARACTERÍSTICAS:

- Alta eficiencia y rendimiento.
- Fabricada con materiales de calidad.
- Libre de mantenimiento.

#### ESPECIFICACIONES DE LA BOMBA

OLS	MCH24/120	MCH36/250	MCH48/500-1	MCH48/500-7
Potencia (W)	120	250	500	500
Voltaje (V)	24	36	48	48
Flujo a la máxima velocidad (m <sup>3</sup> /h)	.76	1.25	4.5	2.5
Máxima altura de descarga (m)	55	80	100	70
Longitud de la bomba sin motor (mm)	190	190	190	205
Salida (In)	3/4"	3/4"	3/4"	1"
Máxima temperatura del agua (°C)	35°	" "	" "	" "

#### CURVAS DE RENDIMIENTO



Making Green Ideas

[www.orledsolar.com](http://www.orledsolar.com)

**Anexo 4. Tubería de impulsión**  
 Fuente: <http://es.metzerplas.com/es-ES/86/955/>



**TUBOS PE**

- > Tubos de PEAD para riego
- > Tubos de PEAD para agua
- > Tubos de PEBD para riego
- > Tubos de PEBD para agua

**Tubos de PEBD para agua**

Las tuberías de PEBD para conducción de agua de Metzerplas son producidas en conformidad con la normas del Instituto de Standards de Israel (IS 4427 PE Pipes for water supply). Los tubos se producen en diversos espesores de pared, aptos para presiones nominales de 4 a 10 bar. Se encuentran disponibles tubos multicapa, con capa externa de color.

Diámetro externo del tubo (mm)	Relación diámetro / espesor de pared		
	SDR 41	SDR 21	SDR 17
	PN (Presión nominal) Bar		
	PN 4	PN 8	PN 10
Espesor de pared nominal (mm)			
16		2.0	2.3
20		2.3	3.0
25		3.0	3.5
32	2.0	3.6	4.4
40	2.4	4.6	5.5
50	3.0	5.6	6.9
63	3.8	7.1	8.6
75	4.5	8.4	10.3
90	5.4	10.1	12.3
110	6.6	12.3	15.1
125	7.4	14.0	17.1
140	8.3	15.7	19.2
160	9.5	17.9	21.9
180	10.7	20.1	24.6
200	11.9	22.4	27.4
225	13.4	25.2	30.8
250	14.8	27.9	34.2
280	16.6	31.3	38.3
315	18.7	35.2	43.1
355	21.1	39.7	48.5



Datos técnicos:

- Materia prima: PEBD para conducción de agua
- Color externo: Marrón, púrpura, blanco, verde u otros, con una línea interna negra.
- Marcas impresas: De acuerdo a las normas y a las especificaciones del cliente.
- Empaque: Rollos o bobinas de metal, de longitudes variables.
- Conectores: Mecánicos, soldadura interna, electrofusión.

## Anexo 5. Tubería de succión

Fuente: <http://well-riser.com/rylbrun-tp-tuberias-flexibles.html>




HOME


LA TUBERÍA FLEXIBLE PARA LA INSTALACIÓN DE BOMBAS SUMERGIBLES PARA BOMBAS DE PEQUEÑO CAUDAL.  
 Poliuretano con refuerzo circular textil de poliéster.  
 Cumple con los requisitos de potabilidad de la normativa NSF-61, WRAS.  
 Presentación en bobinas de hasta 500 m. / 1.640'  
 Menor pérdida de carga (15% dilatación axial a presión de servicio)

Código	Descripción	Color	Diámetro	Caudal máx. recomendable		Presión de trabajo / Profundidad máx. de instalación		* Carga máx en servicio		Longitud de rollo
				L/h	Gpm	bar-m	psi-ft	kg	lb	
01909	RYLBRUN 25 TP	Azul	1"-26mm	7.200	32	17-150	245-490	400	880	up to 500-1640
01907	RYLBRUN 32 TP	Gris	1 1/4"-32mm	11.300	50	12-100	145-325	400	880	up to 500-1640
01906	RYLBRUN 32 TP	Negro	1 1/4"-32mm	11.300	50	25-200	290-655	650	1.435	up to 500-1640
01908	RYLBRUN 2" TP	Gris	2"-52mm	29.000	128	12-100	145-325	750	1.650	up to 500-1640

ACCESORIOS



\* Incluye el peso de la tubería, los cables eléctricos, racores, bombas, otros accesorios y la columna de agua

APLICACIONES:

CAPTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

- Residencial
- Agricultura
- Granjas
- Pequeña industria
- Campos deportivos, Parques públicos, etc.

AFORO DE POZOS

MONITOREO DE AGUA

**Anexo 6. Curva del sistema**  
**Fuente: Elaboración propia**

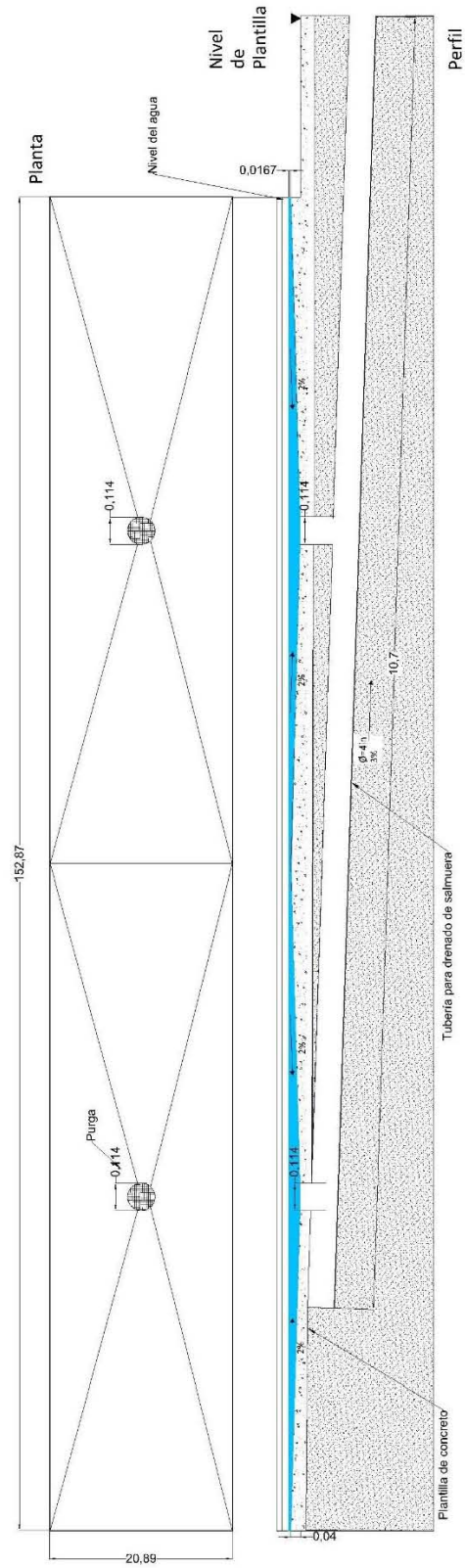
Curva del sistema												
Q %	Q [m3/s]	vi [m/s]	vs[m/s]	Re i	Re s	Gi	Gs	Yi	Ys	fi	fs	Hf
150%	0.00007	0.32	0.23	5113	4346	4.555	4.555	0.876	0.876	0.037	0.039	67.092
160%	0.00008	0.34	0.25	5454	4636	4.555	4.555	0.876	0.876	0.037	0.038	67.704
170%	0.00008	0.37	0.26	5795	4926	4.555	4.555	0.876	0.876	0.036	0.038	68.346
180%	0.00009	0.39	0.28	6136	5215	4.555	4.555	0.876	0.876	0.035	0.037	69.016
190%	0.00009	0.41	0.30	6477	5505	4.555	4.555	0.876	0.876	0.035	0.037	69.715
200%	0.00010	0.43	0.31	6818	5795	4.555	4.555	0.876	0.876	0.034	0.036	70.441
210%	0.00010	0.45	0.33	7158	6085	4.555	4.555	0.876	0.876	0.034	0.035	71.195
220%	0.00011	0.47	0.34	7499	6374	4.555	4.555	0.876	0.876	0.033	0.035	71.976
230%	0.00011	0.50	0.36	7840	6664	4.555	4.555	0.876	0.876	0.033	0.035	72.784
240%	0.00012	0.52	0.37	8181	6954	4.555	4.555	0.876	0.876	0.033	0.034	73.619
250%	0.00012	0.54	0.39	8522	7244	4.555	4.555	0.876	0.876	0.032	0.034	74.480
260%	0.00013	0.56	0.40	8863	7533	4.555	4.555	0.876	0.876	0.032	0.033	75.368
270%	0.00013	0.58	0.42	9204	7823	4.555	4.555	0.876	0.876	0.032	0.033	76.282
280%	0.00014	0.60	0.44	9545	8113	4.555	4.555	0.876	0.876	0.031	0.033	77.222
290%	0.00014	0.62	0.45	9885	8403	4.555	4.555	0.876	0.876	0.031	0.032	78.188
300%	0.00015	0.65	0.47	10226	8692	4.555	4.555	0.876	0.876	0.031	0.032	79.179

### Anexo 7.Presiones de vapor

Fuente: [http://www.vaxasoftware.com/doc\\_edu/qui/pvh2o.pdf](http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui/pvh2o.pdf)

T/°C	P/mmHg	P/hPa	T/°C	P/mmHg	P/hPa
0	4.5840	6.1115	47	79.709	106.27
0.01	4.58780	6.11657	48	83.834	111.77
1	4.9286	6.5709	49	88.147	117.52
2	5.2954	7.0599	50	92.648	123.52
3	5.6861	7.5808	51	97.343	129.78
4	6.1021	8.1355	52	102.24	136.31
5	6.5449	8.7258	53	107.35	143.12
6	7.0158	9.3536	54	112.67	150.22
7	7.5164	10.021	55	118.23	157.62
8	8.0482	10.730	56	124.01	165.33
9	8.6130	11.483	57	130.03	173.36
10	9.2123	12.282	58	136.29	181.71
11	9.8483	13.130	59	142.82	190.41
12	10.522	14.028	60	149.61	199.46
13	11.237	14.981	61	156.67	208.88
14	11.993	15.990	62	164.02	218.67
15	12.795	17.058	63	171.65	228.85
16	13.642	18.188	64	179.59	239.43
17	14.539	19.384	65	187.83	250.42
18	15.487	20.647	66	196.39	261.83
19	16.489	21.983	67	205.28	273.68
20	17.546	23.393	68	214.51	285.99
21	18.663	24.882	69	224.09	298.76
22	19.841	26.453	70	234.03	312.01
23	21.085	28.111	71	244.33	325.75
24	22.395	29.858	72	255.02	340.00
25	23.776	31.699	73	266.11	354.78
26	25.231	33.639	74	277.59	370.09
27	26.763	35.681	75	289.49	385.95
28	28.376	37.831	76	301.82	402.39
29	30.071	40.092	77	314.58	419.41
30	31.855	42.470	78	327.80	437.03
31	33.730	44.969	79	341.48	455.27
32	35.700	47.596	80	355.63	474.14
33	37.769	50.354	81	370.28	493.67
34	39.942	53.251	82	385.43	513.87
35	42.221	56.290	83	401.10	534.76
36	44.613	59.479	84	417.30	556.35
37	47.121	62.823	85	434.04	578.67
38	49.750	66.328	86	451.33	601.73
39	52.506	70.002	87	469.21	625.56
40	55.391	73.849	88	487.67	650.17
41	58.413	77.878	89	506.73	675.58
42	61.577	82.096	90	526.41	701.82
43	64.886	86.508	91	546.72	728.90
44	68.349	91.124	92	567.68	756.84
45	71.968	95.950	93	589.31	785.68
46	75.749	100.99	94	611.61	815.41

### Anexo 8. Esquema del contenedor de agua salina Fuente: Elaboración propia





### Anexo 9. Cálculo de sombras en los solsticios

Fuente: Elaboración propia

Estación	Hora	$\omega$	$\alpha$	d [m]	Estación	Hora	$\omega$	$\alpha$	d [m]
Otoño	06:00	90	0	0.0	Primavera	06:00	90	0	0.0
	07:00	75	14	8.7		07:00	75	14	8.7
	08:00	60	28	4.1		08:00	60	28	4.1
	09:00	45	42	<b>2.4</b>		09:00	45	42	<b>2.4</b>
	10:00	30	55	1.5		10:00	30	55	1.5
	11:00	15	66	1.0		11:00	15	66	1.0
	12:00	0	72	0.7		12:00	0	72	0.7
	13:00	-15	66	1.0		13:00	-15	66	1.0
	14:00	-30	55	1.5		14:00	-30	55	1.5
	15:00	-45	42	<b>2.4</b>		15:00	-45	42	<b>2.4</b>
Invierno	16:00	-60	28	4.1	16:00	-60	28	4.1	
	17:00	-75	14	8.7	17:00	-75	14	8.7	
	18:00	-90	0	0.0	18:00	-90	0	0.0	
	06:00	90	-7	17.3	Verano	06:00	90	7	17.3
	07:00	75	6	22.2		07:00	75	21	5.9
	08:00	60	18	6.8		08:00	60	34	3.2
	09:00	45	29	3.9		09:00	45	48	<b>2.0</b>
	10:00	30	39	<b>2.7</b>		10:00	30	62	1.2
	11:00	15	46	2.2		11:00	15	75	0.6
	12:00	0	48	2.0		12:00	0	85	0.2
13:00	-15	46	2.2	13:00		-15	75	0.6	
14:00	-30	39	<b>2.7</b>	14:00		-30	62	1.2	
15:00	-45	29	3.9	15:00		-45	48	<b>2.0</b>	
16:00	-60	18	6.8	16:00	-60	34	3.2		
17:00	-75	6	22.2	17:00	-75	21	5.9		
18:00	-90	-7	17.3	18:00	-90	7	17.3		



**Anexo 10. Especificaciones técnicas de purificador de agua por medio de luz UV**  
 Fuente: [www.instapura.com.mx](http://www.instapura.com.mx)



Serie diseñada para purificar agua por medio de luz ultravioleta para la eliminación de bacterias y virus, sin añadir sustancias químicas al agua.

**ESPECIFICACIONES:**

Marca y modelo:	PROUV-06
Flujo de operación:	Máx. 6 lpm (1.5 gpm)
Presión de operación:	Máx. 7 kg/cm2 (100 psi)
Purificación bacteriológica:	Por medio de luz ultravioleta Dosis 30mJ/cm2@254 NM
Cámara de agua:	Acero inoxidable AISI 304 Pulido sanitario
Tuercas de compresión:	Aluminio
Arosellos:	Silicón
Requerimiento eléctrico:	120 V- 60 Hz
Consumo:	10W@120VAC
Lámparas UV:	Una Instalamp LG-UV10W
Vida útil lámpara UV:	9,000 hrs. / 12 meses
Tubo de cuarzo:	Un TC-UV09.85
Dimensiones del equipo:	27 x 09 x 06 (10.5" x 3.5" x 2.5")
largo x alto x fondo:	
Peso:	0.8 kg (1.8 lb)
Entrada y Salida:	0.6 mm (¼")

**PROCESO:**

El agua pasa por la cámara, en la cual es irradiada la luz ultravioleta que hace contacto con las bacterias y virus que pudieran existir, penetrando su membrana exterior y alterando el ADN de los mismos, sin que puedan volver a reproducirse. Sin embargo, la luz ultravioleta no cambia las propiedades del agua ni afecta a quien la usa o bebe ya que no tiene efectos residuales. La desinfección por medio de luz ultravioleta es el método más sencillo, seguro y eficaz para la purificación de agua.

**VENTAJAS:**

- Lámparas germicida de alta intensidad
- Tubos de cuarzo de alta pureza
- Pulido sanitario interno y externo
- Indicadores luminosos para monitoreo visual
- Balastros electrónicos de alta calidad
- Cámara de agua fabricada en acero inoxidable T304
- Sensor instaGuard para monitoreo continuo auditivo y visual del equipo
- 2 años de garantía en la cámara de agua

**Notas:**

Este sistema de purificación, debe contar con prefiltro en línea para eliminar sedimentos que pueda contener el agua.  
 La lámpara germicida debe reemplazarse cada 12 meses como máximo.  
 Garantía: 2 años en la cámara de agua, las demás partes 1 año (no aplica en la lámpara germicida).  
 Especificaciones sujetas a cambio sin previo aviso



**Anexo 11.Costos**  
**Fuente: Elaboración propia**

<b>Etapa</b>	<b>Concepto</b>	<b>U</b>	<b>K</b>	<b>Precio</b>	<b>F</b>	<b>Importe</b>	<b>Subtotal</b>	<b>K</b>	<b>Reposición</b>
Obra de captación y conducción	Bomba	Pz	1	\$ 7,700.00	1	\$ 7,700.00		1	\$ 8,470.00
	Ademe	Pz	1	\$ 2,100.00	2	\$ 2,100.00			\$ -
	Panel solar	Pz	2	\$ 3,060.00	1	\$ 6,120.00		2	\$ 6,732.00
	Tubería succión	Pz	1	\$ 1,459.00	3	\$ 1,459.00			\$ -
	Tubería de impulsión	Pz	4	\$ 970.00	3	\$ 3,880.00			\$ -
	Perforación	Co	1	\$ 37,000.00	4	\$ 37,000.00	\$ 58,259.00		\$ -
	Instalación de tuberías	Co	1	\$ 1,200.00	5	\$ 1,200.00			\$ -
	Instalación de paneles solares	Pz	1	\$ 670.00	5	\$ 670.00		1	\$ 737.00
Almacenamiento	Cisternas	Pz	3	\$ 10,077.00	6	\$ 30,231.00			\$ -
	Construcción de cisterna	m2	252.3	\$ 120.00	5	\$ 30,280.80			\$ -
	Geomembrana	m2	252.3	\$ 200.00	7	\$ 50,468.00	\$ 110,979.80		\$ -
Destilación	Caseta Vega-Silva	m2	316.8	\$ 1,967.80	8	\$ 623,399.04			\$ -
	Destilador solar simple	m2	252.3	\$ 1,967.80	8	\$ 496,554.65			\$ -
	Firme de concreto	m2	569.8	\$ 130.00	5	\$ 74,074.00			\$ -
	Tubería	m	144	\$ 40.00	6	\$ 5,760.00	\$ 1,199,787.69		\$ -
Desinfección	Lámparas	Pz	2	\$ 2,200.00	9	\$ 4,400.00		2	\$ 48,400.00
	Instalación de paneles solares	Pz	1	\$ 670.00	5	\$ 670.00		1	\$ 737.00
	Panel solar	Pz	1	\$ 2,870.00	1	\$ 2,870.00	\$ 7,940.00	1	\$ 3,157.00
Tratamiento de aguas residuales	Reactor	Pz	2	\$ 6,399.00	6	\$ 12,798.00			\$ -
	Campana	Pz	2	\$ 4,200.00	5	\$ 8,400.00			\$ -
	Filtro	Pz	2	\$ 2,459.00	5	\$ 4,918.00			\$ -
	Medio granular	Tn	1	\$ 1,200.00	1	\$ 1,200.00			\$ -
	Cisterna	Pz	1	\$ 1,077.00	6	\$ 1,077.00			\$ -
	Firme de concreto	m2	16	\$ 130.00	5	\$ 2,080.00			\$ -
	Lámparas	Pz	2	\$ 2,200.00	9	\$ 4,400.00	\$ 34,873.00	2	\$ 48,400.00
Inversión						\$ 1,411,839.49		\$ 116,633.00	

**Anexo 12.Costos (Continuación)**  
**Fuente: Elaboración propia**

<b>U</b>	<b>Unidad</b>	
<b>K</b>	Cantidad	
<b>F</b>	Fuente	
<b>Pz</b>	Pieza	
<b>Co</b>	Concepto	
<b>m2</b>	Metro cuadrado	
<b>m</b>	Metro	
<b>Tn</b>	Tonelada	
<b>Fuente</b>		
<b>1</b>	Orled Solar	<a href="http://www.orledsolar.com/">http://www.orledsolar.com/</a>
<b>2</b>	Amanco	<a href="http://www.amanco.com.mx/">http://www.amanco.com.mx/</a>
<b>3</b>	Aquamarket	<a href="http://www.aguamarket.com/">http://www.aguamarket.com/</a>
<b>4</b>	Geoex	<a href="http://geoex.com.mx/">http://geoex.com.mx/</a>
<b>5</b>	Generador de precios	<a href="http://www.mexico.generadordeprecios.info/">http://www.mexico.generadordeprecios.info/</a>
<b>6</b>	Home Depot	<a href="http://www.homedepot.com.mx/">http://www.homedepot.com.mx/</a>
<b>7</b>	Geomebrana mexicana	<a href="http://geomembranasmexicanas.com/">http://geomembranasmexicanas.com/</a>
<b>8</b>	Herralum	<a href="http://www.herralum.com.mx/">http://www.herralum.com.mx/</a>
<b>9</b>	Instapura	<a href="http://www.instapura.com.mx/">http://www.instapura.com.mx/</a>
<b>10</b>	Ferreteria casablanca	<a href="http://www.ferreteriacasablanca.com.mx/">http://www.ferreteriacasablanca.com.mx/</a>