

AUMENTO DE LA OFERTA HÍDRICA

AUMENTO DE LA OFERTA HÍDRICA

Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (Indhri)

Primera Edición

Agosto 2010

ISBN: 978-9945-442-87-8

Diseño y diagramación: Eduardo Smith

Diseño de portada: Luis Maireni Pou y Rafael Ant. Núñez

Impreso en República Dominicana
Printed in Dominican Republic

Editora Taller C. x A., Juan Vallenilla esq. Juanico Dolores.
Zona Industrial de Herrera, Santo Domingo Oeste

INDICE

| | |
|--|----|
| PRÓLOGO | 1 |
| INTRODUCCIÓN | 3 |
| | |
| CAPITULO I | |
| PERSPECTIVA DEL AUMENTO DE LA OFERTA HIDRICA | 5 |
| Ing. Francisco T. Rodríguez | |
| | |
| CAPITULO II | |
| CAPTACION O COSECHA DE AGUA DE LLUVIA | |
| DISEÑO DE SISTEMAS DE CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA | 9 |
| Dr. Manuel Anaya Garduño | |
| | |
| 2.1 INTRODUCCIÓN | 9 |
| 2.2 COMPONENTES DE LOS SISTEMAS DE CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA (SCALL) | 10 |
| 2.2.1 DETERMINACION DE LA DEMANDA DE AGUA | 10 |
| 2.2.2 CÁLCULO DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL NETA..... | 13 |
| 2.2.3 DETERMINACION DEL ÁREA DE CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA | 17 |
| 2.2.4 CONDUCCION DEL AGUA DE LLUVIA CAPTADA | 23 |
| 2.2.5 CISTERNAS PARA EL ALMACENAMIENTO DEL AGUA DE LLUVIA..... | 25 |
| 2.3 COSTO UNITARIO POR UNIDAD DE AGUA DE LLUVIA ALMACENADA EN DIFERENTES TIPOS DE CISTERNA..... | 31 |
| 2.4 FILTRACIÓN DE AGUA DE LLUVIA..... | 31 |
| 2.5 SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DEL AGUA DE LLUVIA..... | 33 |
| 2.5.1 USO DOMÉSTICO | 34 |
| 2.5.2 DISEÑO DEL VOLUMEN DEL SEDIMENTADOR O TRAMPA DE SOLIDOS | 35 |
| 2.5.3 BOMBEO DEL AGUA DE LLUVIA ALMACENADA TÉRMINOS HIDRÁULICOS | 37 |
| 2.6 EJEMPLO: CASO COMUNITARIO DE CAPTACION DE AGUA DE LLUVIA | |
| 2.6.1 Área de captación del agua de lluvia | 40 |

| | | |
|-------|---|----|
| 2.6.2 | Equipo de recolección del agua de lluvia | 41 |
| 2.6.3 | Sistema de trampas de sólidos | 45 |
| 2.6.4 | Sistema de filtros de sedimentos | 46 |
| 2.6.5 | Sistemas de almacenamiento | 46 |
| 2.6.6 | Obra civil | 47 |
| 2.6.7 | Descripción del proceso de potabilización y purificación | 48 |
| 2.7 | CONCLUSIONES SISTEMAS DE CAPTACION DE AGUA DE LLUVIA..... | 49 |
| 2.8 | CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA PARA MEJORAR LA PRODUCCION AGRICOLA | 49 |
| 2.8.1 | INTRODUCCIÓN | 49 |
| 2.8.2 | TÉCNICAS PARA MODIFICAR EL MICROCLIMA Y EL MICROAMBIENTE DE LAS PLANTAS | 50 |
| 2.8.3 | PRINCIPALES TECNICAS DE CAPTACION Y APROVECHAMIENTO DEL AGUA DE LLUVIA..... | 50 |
| | - <i>Captación in situ del agua de lluvia</i> | 53 |
| | - <i>Método de Anaya</i> | 53 |
| | - <i>Aplicación de la fórmula de Anaya et al., para cultivos en hilera</i> | 56 |
| | - <i>Aplicación de la fórmula de Anaya et al., para cultivos tupidos</i> | 58 |
| | - <i>Aplicación de la fórmula de Anaya et al. para frutales</i> | 60 |
| | - <i>Labranza de conservación</i> | 65 |
| 2.9 | CONCLUSIONES SISTEMAS DE CAPTACION DE AGUA DE LLUVIA PARA MEJORAR LA PRODUCCION AGRICOLA | 67 |
| 2.10 | RECOMENDACIONES..... | 67 |
| | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 68 |

CAPITULO III

| | |
|----------------------------|----|
| REUSO DE AGUA | 71 |
|----------------------------|----|

Ingeniero Civil. M.Sc. Manuel Cerda Gaete

| | | |
|-------|---|----|
| 3.1 | GENERALIDADES | 71 |
| 3.2 | PROBLEMÁTICA MUNDIAL DE LA ESCASEZ DE AGUA..... | 74 |
| | <i>a. Crecimiento de la Población</i> | 74 |
| | <i>b. Limitación del Recurso Agua</i> | 74 |
| | <i>c. Cambio Climático</i> | 75 |
| | <i>d. La Sequía</i> | 76 |
| | <i>e. Requerimientos ambientales del agua superficial</i> | 76 |
| 3.3 | TECNICAS DE REUSO DE AGUA..... | 77 |
| 3.3.1 | SINOPSIS DE LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO USUALES | 78 |
| 3.3.2 | TECNOLOGÍAS MÁS COMUNES | 80 |
| | - Para tratamiento primario..... | 80 |
| | - Para tratamiento secundario | 80 |
| | - Para tratamiento terciario o avanzado | 81 |

| | |
|--|----|
| 3.4 PRINCIPALES SECTORES DE APLICACIÓN DEL REUSO DEL AGUA | 84 |
| - <i>Reuso urbano</i> | 84 |
| - <i>Reuso industrial</i> | 85 |
| - <i>Reuso agrícola</i> | 85 |
| - <i>Reuso ambiental</i> | 86 |
| - <i>Reuso para recarga de acuíferos</i> | 86 |
| - <i>Reuso en agua potable</i> | 87 |
| 3.5 ELEMENTOS DE PLANIFICACION DEL REUSO DE AGUA TRATADA | 88 |
| 3.6 CRITERIOS PARA EL ANÁLISIS FINANCIERO Y EVALUACIÓN | |
| ECONÓMICA | 90 |
| - <i>Análisis financiero y evaluación económica</i> | 90 |
| - <i>Métodos de evaluación económica</i> | 91 |
| - <i>Indicadores de evaluación</i> | 92 |
| - <i>Valor Actual Neto (VAN) ó valor presente neto (NPV)</i> | 93 |
| - <i>Relación Beneficio Costo</i> | 94 |
| - <i>Análisis de Sensibilidad</i> | 94 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS | 96 |

CAPITULO IV

| | |
|--|-----------|
| RECARGA CONTROLADA DE ACUIFEROS | 97 |
|--|-----------|

M.Sc. Carlos Gutiérrez Ojeda

| | |
|---|-----|
| 4.1 GENERALIDADES | 97 |
| 4.2 DEFINICIÓN DE LA RECARGA CONTROLADA DE ACUÍFEROS | 99 |
| 4.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS ACUÍFEROS | 100 |
| 4.4 OBJETIVOS DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS..... | 101 |
| 4.5 FUENTES DE AGUA UTILIZABLES PARA LA RECARGA DE ACUÍFEROS | 102 |
| 4.6 BENEFICIOS Y PROBLEMAS DE UN PROYECTO DE RECARGA DE ACUÍFEROS | 102 |
| 4.7 EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL DEL PROYECTO DE RECARGA DE ACUÍFEROS | 104 |
| 4.8 INFORMACIÓN HIDROGEOLÓGICA NECESARIA | 104 |
| 4.9 ESTUDIOS BÁSICOS PARA EL DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE RECARGA DE ACUÍFERO..... | 106 |
| 4.10 IMPLICACIONES DE LA CALIDAD DEL AGUA..... | 106 |
| 4.11 ASPECTOS INSTITUCIONALES Y DE GESTION | 107 |
| 4.12 LUGARES DONDE NO ES FACTIBLE LLEVAR A CABO PROYECTOS DE RECARGA | 107 |
| 4.13 ELEMENTOS CRÍTICOS PARA EL ÉXITO DE UN PROYECTO DE RECARGA .. | 107 |
| 4.14 PRINCIPALES TECNOLOGÍAS PARA RECARGAR ACUÍFEROS | 108 |
| 4.14.1 TÉCNICAS DE DISTRIBUCION | 109 |

| | |
|---|-----|
| i) Estanques y balsas de infiltración..... | 110 |
| ii) Inundación controlada | 111 |
| iii) Zanja, surcos y drenajes de riego..... | 112 |
| iv) Riego | 113 |
| 4.14.2 INFILTRACIÓN INDUCIDA | 114 |
| 4.14.3 POZOS | 116 |
| - Pozos de recarga someros | 116 |
| - Pozos de recarga profunda | 117 |
| - Pozos de almacenamiento y recuperación (ASR) | 118 |
| - Pozos de almacenamiento, transferencia y recuperación (ASTR) | 118 |
| 4.14.4 MODIFICACIÓN DE LOS CAUCES DE LOS ARROYOS Y RÍOS | 119 |
| - Presas para recarga de acuíferos | 120 |
| - Presas sub-superficiales | 121 |
| - Presas de almacenamiento de arena | 122 |
| - Mini-presas de gaviones y tierra | 123 |
| - Técnicas de ampliación de los cauces | 124 |
| 4.14.5 CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA | 124 |
| - Recolección de agua de lluvia en los techos..... | 124 |
| - Sistemas de recolección de escurrimiento superficial | 125 |
| - Barreras que sobresalen de la superficie de la tierra..... | 126 |
| - Zanjas de infiltración, surcos y tinas ciegas..... | 126 |
| 4.15 ASUNTOS BÁSICOS A CONSIDERAR EN UN PROYECTO DE RECARGA DE ACUÍFEROS | 127 |
| 4.16 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 131 |
| BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS | 132 |

CAPITULO V

APLICACION DE INDICE DE SUSTENTABILIDAD DE CUENCAS 135 **Ing. M.Sc.(c) A. Elizabeth Cortés e Ing. Magister Jorge Nuñez**

| | |
|---|-----|
| 5.1 GENERALIDADES | 135 |
| 5.1.1 DESCRIPCIÓN DEL WSI..... | 136 |
| 5.1.2 CONTEXTO DE LA APLICACIÓN DEL INDICE DE SUSTENTABILIDAD DE CUENCAS (WSI) | 141 |
| 5.2 METODOLOGÍA PARA DETERMINAR EL WSI EN LA CUENCA DE ELQUI | 142 |
| 5.3 DETERMINACIÓN DEL WSI PARA LA CUENCA DE ELQUI..... | 143 |
| 5.3.1 DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA DE ELQUI..... | 143 |
| 5.3.2 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS EXISTENTES ... | 144 |
| 5.3.3 ORDENAMIENTO DE LA INFORMACIÓN | 145 |
| 5.3.4 TALLER DE VALIDACIÓN DEL WSI ANTE LA MESA REGIONAL DEL AGUA DE LA REGIÓN DE COQUIMBO | 145 |
| 5.4 RESULTADOS..... | 145 |

| | |
|--|------------|
| 5.4.1 INDICADOR DE HIDROLOGÍA..... | 145 |
| HIDROLOGÍA- CANTIDAD | 146 |
| a) <i>Presión- variación de la disponibilidad de agua.....</i> | 146 |
| b) <i>Estado- disponibilidad per cápita de agua en la cuenca</i> | 147 |
| c) <i>Respuesta- evolución en la eficiencia del uso del agua</i> | 148 |
| HIDROLOGÍA-CALIDAD | 149 |
| a) <i>Presión- Variación de la conductividad</i> | 150 |
| b) <i>Estado- Conductividad en la cuenca</i> | 151 |
| c) <i>Respuesta - tratamiento y disposición de aguas servidas en la cuenca</i> | 152 |
| 5.4.2 INDICADOR MEDIOAMBIENTAL | 152 |
| a) <i>Presión - Índice de Presión Antrópica en la cuenca</i> | 152 |
| b) <i>Estado - Porcentaje de Vegetación Natural en la Cuenca</i> | 154 |
| c) <i>Respuesta-Evolución de zonas de conservación en la cuenca.....</i> | 154 |
| 5.4.3 INDICADOR DE VIDA HUMANA..... | 155 |
| a) <i>Presión - Variación Índice de Desarrollo Humano (IDH)-Ingreso</i> | 155 |
| b) <i>Estado Parámetro de Vida- Estado</i> | 157 |
| c) <i>Respuesta – Variación IDH ponderado Cuenca</i> | 158 |
| 5.4.4 INDICADOR DE POLÍTICAS PÚBLICAS | 158 |
| a) <i>Presión – Variación IDH educación</i> | 159 |
| b) <i>Estado – Capacidad Legal e Institucional en GIRH en la Cuenca</i> | 160 |
| c) <i>Respuesta – Evolución en las inversiones en GIRH en la cuenca</i> | 161 |
| 5.5 DETERMINACIÓN DE ÍNDICE DE SUSTENTABILIDAD | |
| CUENCA ELQUI (WSI) | 162 |
| 5.6 CONCLUSIONES..... | 163 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS..... | 164 |
| INDICE DE CUADROS..... | 167 |
| INDICE DE FIGURAS | 171 |
| GLOSARIO | 177 |

PRÓLOGO

La escasez de agua en muchas regiones del globo terráqueo obliga a buscar alternativas de aumento de la oferta hídrica para el consumo humano y el desarrollo económico y social de las comunidades afectadas. Con el aumento de la oferta hídrica estamos creando medidas de aprovechamiento hídrico que contrarresten efectos negativos y de escasez como la distribución espacial y de temporada de las lluvias, la escasez de lluvia, el uso exclusivo del agua en determinado sector, el desperdicio de agua disponible para reuso, y la indisposición de grandes almacenamientos de agua para tener volúmenes de reserva de aguas tratadas, entre otras.

El caso del reuso de agua como método de aumento de la oferta hídrica implica una categorización del uso del agua a partir del agua fresca tratada y sus usos sucesivos posteriores, con menos calidad pero aplicada a usos específicos para los cuales resultan óptimamente adecuados.

El aumento de la oferta hídrica busca crear herramientas y sistemas de aprovechamiento máximo del agua disponible utilizando metodologías que superen las tendencias y tecnologías tradicionalmente utilizadas para el aprovechamiento del agua dulce, y que en definitiva produzcan la disponibilidad de un mayor volumen de agua con un nivel de calidad aceptable para el uso humano, económico o de recreación, y a un más bajo costo de producción.

El presente documento tiene la intención de presentar en forma general una panorámica de las principales técnicas de aumento de oferta hídrica que se están utilizando exitosamente en la mayoría de los países desarrollados y subdesarrollados y que están siendo una alternativa viable para la satisfacción de las necesidades

Aumento de la Oferta Hídrica

hídricas de muchas zonas en desarrollo y comunidades del mundo.

Las alternativas de aumento de la oferta hídrica propuestas en el presente documento son compatibles con la conservación y desarrollo ambiental, y también son cónsonas con el esquema de desarrollo global que se lleva a cabo en la mayoría de los países de América Latina incluido las islas del Caribe.

Para los fines de capacitar a profesionales caribeños sobre este importante tema se desarrolló un curso taller regional denominado "*Aumento de la Oferta Hídrica*", celebrado en Santo Domingo, República Dominicana del 2-4 septiembre 2009 auspiciado por el Centro de Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y el Caribe, (CAZALAC), el Plan Hidrológico Internacional (PHI/LAC) de La UNESCO, el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, (INDRHI), de la Republica Dominicana, y el Centro para la Gestión Sostenible de los Recursos Hídricos en los Estados Insulares del Caribe (CEHICA). Este curso de capacitación regional incluyó tres temas básicos que fueron: panorámica sobre el aumento de la oferta hídrica, captación o cosecha del agua de lluvia, el reuso de agua, y la recarga de acuíferos.

Esta publicación presenta en un formato académico y didáctico, el temario del curso-taller y temas complementarios que en su conjunto ofrecen al lector una fuente de consulta y fundamentos básicos sobre el aumento de la oferta hídrica. El texto contiene un desarrollo metodológico enfocado de forma práctica que bien puede servir para fines de docencia, como para referencia técnica profesional.

Ing. Francisco T. Rodríguez

Presidente Consejo Administración

C E H I C A

Director Ejecutivo

INDRHI

INTRODUCCIÓN

El CEHICA es una organización regional en el Caribe especializada en la investigación de los temas del agua, y está orientada a generar conocimientos técnicos aplicables a la conservación y desarrollo de los recursos hídricos en general, en la búsqueda de soluciones innovadoras y sostenibles que permitan la supervivencia y una mejor calidad de vida de las poblaciones insulares. El CEHICA es un centro Categoría II de la UNESCO, aprobado por la 35th. Conferencia General de la UNESCO en octubre del 2009, con sede en el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, INDRHI, de la República Dominicana; posteriormente en Marzo del 2010 se suscribió el Convenio que oficializa los auspicios de la UNESCO entre Francisco T. Rodríguez, Director Ejecutivo del INDRHI e Irina Bokova, Directora General de la UNESCO.

Muchas de las islas del Caribe se encuentran bajo presión hídrica ya sea, en cuanto a calidad y cantidad de agua dulce disponible para el consumo humano y otros usos de aprovechamiento económico. La escasez de los recursos hídricos es un factor limitante para su desarrollo económico, social y para supervivencia de las generaciones futuras. La creación del CEHICA busca estudiar soluciones de mitigación de las limitaciones y el aumento de las disponibilidades de agua en las islas del Caribe.

Dentro de los objetivos de capacitación del CEHICA, se realizó un Curso-Taller internacional "Aumento de la Oferta Hídrica", celebrado en Santo Domingo del 2-4 septiembre 2009, en la República Dominicana, con la participación de representantes de diez países de los Estados Insulares del Caribe: Cuba, Haití, Jamaica, Dominica, Saint Kitts, Santa Lucía, Bahamas, Antigua y Barbuda, Barbados y República Dominicana. Este Curso-Taller fue auspiciado por el Centro de Zonas Áridas y Semiáridas

de América latina y el Caribe, (CAZALAC), el Plan Hidrológico Internacional (PHI/LAC) de La UNESCO, el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI) y el Centro para la Gestión Sostenible de los Recursos Hídricos en los Estados Insulares del Caribe (CEHICA).

El curso taller incluyó el desarrollo de tres temas básicos que fueron: i) Panorámica sobre el Aumento de la Oferta Hídrica, ii) Captación o Cosecha del Agua de Lluvia, iii) Reúso de Agua, y iv) Recarga de Acuíferos.

El tema sobre la panorámica sobre el aumento de la oferta hídrica fue presentado por el Ing. Francisco T. Rodríguez, Director Ejecutivo del INDRHI; el de Captación o Cosecha del Agua de Lluvia fue expuesto por el Dr. Manuel Anaya Garduño del Centro Internacional de Demostración y Capacitación en Aprovechamiento del Agua de Lluvia (CIDECALLI) de México; el de Reuso de Agua fue abordado por el Ing. M. Sc. Manuel Cerda Gaete de Chile quien es profesor titular de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile; el de Recarga Controlada de Acuíferos fue presentado por el Ing. M. Sc. Carlos Gutiérrez Ojeda del Instituto Mexicano de Tecnología de Agua (IMTA). En adición a los temas antes mencionados se incluye una contribución científica de CAZALAC que comprende un estudio relativo a la aplicación de índice de sustentabilidad de cuencas, (water sustainability index, wsi), el cual fue preparado por los Ingenieros. M.Sc. A. Elizabeth Cortés y Jorge Nuñez de CAZALAC.

Este documento es una iniciativa del INDRHI-CEHICA producto del curso taller mencionado, en el cual CAZALAC intervino en principio en estimular a los expositores internacionales en presentar sus temas y el aporte del capítulo correspondiente al índice de sustentabilidad de cuenca; y el INDRHI-CEHICA intervino en la coordinación técnica de la redacción del documento, revisión, edición, diagramación y publicación.

Es importante recordar que el primer tema de un Programa de Aumento de Oferta Hídrica es el incremento de la eficiencia del uso de agua, a través de mejoramiento y cambios a infraestructuras de mayor optimización de uso y manejo del agua, y el establecimiento de nuevos sistemas más eficientes, reparaciones de fugas, control de desperdicios, y sobre todo el desarrollo pleno a nivel de los técnicos, de las comunidades y de los usuarios en general de la cultura del uso eficiente del agua y la conservación del ambiente.

En términos generales esperamos que este manual sirva como un fundamento de capacitación para el aprovechamiento y sostenibilidad de los recursos hídricos en zonas de escasez en las islas del Caribe, y en otras regiones del mundo con situaciones similares, donde es necesaria la optimización del agua para garantizar la subsistencia y la calidad de vida de las poblaciones.

CAPITULO I

PERSPECTIVA DEL AUMENTO DE LA OFERTA HIDRICA

**Autor: Ing. Francisco T. Rodríguez,
INDRHI-CEHICA**

A mediados del siglo pasado y aun entrando la década de 1970, todavía era común en la zona rural de la República Dominicana, encontrar aljibes como medio de almacenamiento y regulación del agua de lluvia que era captada sobre los techos de las viviendas. Este sistema con antecedentes en una sabiduría milenaria, era para muchos hogares la fuente de abastecimiento más confiable; gradualmente la cobertura de los servicios de agua potable fue alcanzado mayor proporción de la población, aunque todavía insuficiente en algunas zonas y los acueductos que fueron construidos suplían agua dentro de las viviendas o a llaves públicas próximas a las viviendas. La captación de agua de lluvia se entendió entonces innecesaria y había un nuevo escenario que suponía agua continua en los hogares. Se descartó prácticamente por completo el antiguo esquema de captación de agua como opción para satisfacer una demanda diaria.

Actualmente una proporción significativa de esos acueductos que sustituyeron los aljibes, enfrentan serias dificultades, sean estas administrativas – económicas o técnicas – operativas, y no han resuelto de forma satisfactoria la garantía del suministro de agua en cantidad, calidad y oportunidad, para el consumo domestico. En esos casos la oferta de agua es realmente discontinua y de calidad inferior al agua de lluvia, de la cual disponemos naturalmente, libre de sales y minerales dañinos. En muchos casos se optó por construir cisternas u otros tipos de depósitos, alimentados por las redes de suministro de agua para regular las interrupciones del servicio, que podrían o pueden ser, de varios días. El agua de lluvia fue escasamente vista o pensada como fuente de agua para las viviendas y ahora no se dispone ni de los diseños adecuados de los techos, ni los colectores, ni de los aljibes para

aprovechar esa agua, como fuente complementaria de agua que es muy necesaria en zonas con variaciones estacionales importantes en la disponibilidad.

El uso dado al aumento de la oferta hídrica por vía de la llamada "Cosecha de Agua" de lluvia, se ha reintroducido con mucho arraigo actualmente en algunos países como en la India, inclusive a nivel urbano.

Las técnicas de aumento de la oferta hídrica no se limitan tampoco al consumo en el hogar, siendo también una alternativa de solución de bajo costo para suplir agua para algunos cultivos en zonas áridas y semiáridas. Los antiguos sistemas de aprovechamiento de los wadis en el medio oriente¹, de los cuales se tienen vestigios de haber estado en uso desde hace cuatro mil años, y las técnicas de aprovechamiento de las crecidas para la agricultura que se han practicado en Arizona y Nuevo México, en los Estados Unidos de Norteamérica, desde hace por los menos mil años (Zaunderer y Hutchinson 1988), hoy serían justamente clasificados como técnicas de aumento de la oferta hídrica.

Las experiencias del desarrollo normativo en Nuevo México, Bermuda y las Islas Vírgenes Británicas, donde está legalmente estatuido como requisito el que las nuevas edificaciones que se construyen incluyan los diseños y dispositivos necesarios para captación de agua de lluvia. Estas experiencias, ilustran muy bien la seriedad con que en algunas sociedades están abordando el problema de la escasez de agua.

Es importante re-enfatizar que aumentar la oferta hídrica no se limita a captar agua de lluvia. Me permito en este sentido plantear que toda acción para aprovechar la disponibilidad de la precipitación o coleccionar o canalizar escurrimiento superficial para fines de consumo productivo o de conservación, incluyendo las técnicas de micro - captación de agua que escurre en una parcela para el suministro de agua a las plantas, la recarga de acuíferos practicas de manejo de cuencas hidrográficas y de manejo de los sistemas de drenaje urbano, así como también las técnicas de ahorro de agua y el reuso del agua, deben ser considerados en el menú de opciones de incremento de la disponibilidad de agua.

Entre sus múltiples ventajas están una inversión menor y costos operacionales bajos, el control de la erosión de suelos, reduciendo de este modo el arrastre de sedimentos y fertilizantes y mejorando la conservación del agua y suelos. Otras ventajas que se pueden lograr son las mejoras en la recarga de acuíferos, el control de su sobreexplotación y la deshidratación de esas valiosas fuentes de agua subterráneas y su contaminación. Por su efecto en la reducción de la degradación ambiental, como su efecto en el control de la esterilización de los suelos con barreras inertes

¹ Los wadis son pequeños reservorios de captación de agua de lluvia y de escorrentía, que se construyen en lechos secos de ríos o cauces o cañadas con caudales temporarios de las regiones desérticas. Los wadis suelen construirse en forma escalonada o como pequeñas lagunas aisladas para el aprovechamiento del agua. Esta técnica se utiliza mucho en el norte del Néguev.

de concreto, la salinidad de suelos, la sobre-fertilización y la salinización de suelos, estas técnicas de aumento de la oferta hídrica ofrecen una solución ecológicamente visible y constituyen remedios idóneos y prácticos para zonas semiáridas y las zonas propensas a sequías, y en asentamientos humanos donde hay fuerte presión de demanda de agua por el crecimiento de la población.

El aumento de la oferta hídrica es un tópico que imaginábamos sería una solución exclusiva para sitios de extrema dificultad en la disponibilidad de agua o su suministro por vía de redes. Sin embargo, dado que el manejo de la oferta hídrica no se circunscribe únicamente a captar el agua de lluvia, puede cubrir varias etapas del ciclo hidrológico incluyendo el manejo y aprovechamiento del agua de drenaje pluvial, y el manejo de regímenes de escurrimiento en las cuencas hidrográficas. Esta óptica es muy interesante por su vínculo con la gestión total del agua.

La tecnología que exhiben en el Neguey en Israel y en el sur de Tunez, donde aplican técnicas de micro-captación para cultivos de árboles entre estos de almendra y nuez de pistacho, el aprovechamiento de las crecidas para el riego de cultivos en Estados Unidos y Australia, llamado también la cosecha de agua de crecida, el manejo de cursos de agua efímeros o intermitentes y la construcción de diques o barreras para regulación del flujo de agua subterránea en varios lugares incluyendo a Kerala. Estado de la India, son buenos ejemplos de las técnicas de aumento de la oferta hídrica.

En el contexto regional de América Latina y el Caribe, la promoción de las técnicas de aumento de la oferta hídrica para la sub-región del Caribe es claramente pertinente. Uno de los factores que incide en la presión existente por los recursos hídricos, es el crecimiento de la población y una rápida urbanización, registrándose en las Antillas las densidades de población más altas en la región, especialmente en las Antillas Menores con cifras entre los 150 y 609 habitantes/Km². Otro factor con las limitaciones en términos tanto de cantidad, como de calidad de agua dulce debido al pequeño tamaño de las islas y condiciones particulares de su geografía, topografía y geología.

Los países y así llamados Estados Islas en la Sub-región de las Antillas Menores, representan la zona de mayor escasez de agua en la región, con cifras típicas de 776 m³/habitantes/año para Antigua y Barbuda, 313 m³/habitantes/año para Barbados, y 576 m³/habitantes/año para Saint Kits and Nevis, todas por debajo del límite internacional de 1,000 m³/per cápita por año, que define la escasez (CEO, 2005), Cuba, Barbados y la República Dominicana están entre los países más vulnerables a la escasez de agua. Esto supone una restricción al futuro desarrollo del turismo y del riego, lo cual demandará el uso de mejores prácticas que involucrarán tecnología más moderna y suministros más controlados y optimizados.

En la región del Caribe se ha generado una fuerte presión por el recurso agua, por

cuya competencia el sector agrícola empieza a perder volúmenes de asignaciones de agua ante el sector de abastecimiento de poblaciones. Uno de los sectores que ejerce presión sobre los recursos hídricos es el turismo, que en la mayoría de las islas, constituye un importante factor de generación de divisas.

Las técnicas de Aumento de Oferta Hídrica nos proveen una oportunidad de diálogo y de construir una cultura de aprovechamiento del agua sobre una plataforma común de discusión sobre las experiencias y el conocimiento acumulado, así como las posibilidades, la amplitud y el alcance de las aplicaciones de las técnicas de aumento de la oferta de agua, asociada con otras herramientas y mecanismos de la gestión de los recursos hídricos. Consideramos que es justificado plantear que se construya un diálogo amplio y permanente sobre la eficacia de las técnicas tradicionales y el presente y futuro de las técnicas de aumento de la oferta hídrica.

A nivel de América Latina y el Caribe existen temas muy importantes para insertar entre las prioridades de nuestra agenda de desarrollo del sector agua, en relación al aumento de la oferta hídrica, iniciando por el aumento de la eficiencia en el uso de los sistemas existentes, que de por sí libera agua que hoy desperdiciamos en cantidades abundantes, mientras a la vez sufrimos una escasez innecesaria, siendo una verdadera necesidad ver ese escurrimiento ocioso de agua en nuestros alcantarillados pluviales y drenajes agrícolas. Vemos en estas técnicas otros atractivos de índole político, social, ambiental y económico, como son el fomento del uso de los recursos locales bondades ecológicas, la cooperación a nivel local, la sostenibilidad y la autosuficiencia económica y la participación de toda la comunidad.

El planeamiento del aprovechamiento hídrico de nuestros países necesariamente debe tomar en cuenta hoy los criterios y los principios de optimización del aumento de la oferta de agua, por lo cual debemos estar edificados de ese conocimiento y lleno de la buena voluntad para fomentar las tecnologías, las políticas públicas, el desarrollo normativo, la racionalidad de las inversiones y la promoción y la movilización social, para que se reviertan los procesos de agudización en la presión del agua, y podamos convertir la escasez en abundancia.

CAPITULO II

CAPTACION O COSECHA DE AGUA DE LLUVIA

DISEÑO DE SISTEMAS DE CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA

Autor: Dr. Manuel Anaya Garduño

2.1. INTRODUCCIÓN

La precipitación pluvial representa un valioso recurso natural que debe aprovecharse, es una de las opciones más reales para proporcionar agua a aquellos que no cuentan con este recurso.

Es urgente, de acuerdo con “los objetivos del milenio”, que cada ser viviente en este planeta disponga de agua en cantidad y calidad, con el objeto de lograr el verdadero Desarrollo Sustentable de la humanidad.

La importancia de captar, almacenar y utilizar el agua de lluvia para consumo humano, uso doméstico, consumo animal y producción agrícola siendo de gran relevancia para las poblaciones, principalmente para aquellas que no tienen acceso a este vital líquido en cantidad y en calidad.

Esta opción permite satisfacer las necesidades básicas de la población; asimismo, ayuda a prevenir la presencia de enfermedades gastrointestinales, ayuda a mitigar los efectos de la sequía en el consumo animal y en la producción de cultivos.

Es importante identificar los principales componentes de un Sistema de Captación del Agua de Lluvia (SCALL), su funcionamiento, los criterios de diseño más sobresalientes, las características de los materiales de construcción, la forma de construir

estos sistemas, su operación y mantenimiento, de tal forma que la puesta en marcha de los proyectos sea factible con un enfoque de sostenibilidad.

La captación de agua de lluvia se practica desde hace varios miles de años según reportes del medio oriente; sin embargo, su utilización no se ha generalizado. Actualmente existe sobre explotación y contaminación de las fuentes de agua superficiales y subterráneas. Es por ello, que los sistemas de captación de agua de lluvia representan una verdadera opción para hacer frente a la escasez de este vital recurso, además de ser una biotecnología eficiente y eficaz, ya que este es un recurso que afecta seriamente la disponibilidad para consumo humano, consumo animal y para la producción agrícola.

2.2. COMPONENTES DE LOS SISTEMAS DE CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA (SCALL)

A continuación se describen e ilustran los componentes para el aprovechamiento del agua de lluvia a nivel familiar y comunitario, lo que permitirá dimensionarlos en el tema de diseño, en el siguiente orden:

2.2.1. DETERMINACION DE LA DEMANDA DE AGUA

La demanda o dotación por persona, es la cantidad de agua que necesita una persona diariamente para cumplir con las funciones físicas y biológicas de su cuerpo, además considera la cantidad de agua requerida para satisfacer la necesidad establecida en el objetivo del proyecto. Así por ejemplo si el SCALL proyectado es destinado al consumo humano, el requerimiento por persona por día será diferente a aquella condición que se establezca para la obtención de agua para consumo humano más la preparación de alimentos, la demanda sería mayor para el segundo escenario (Figura 2.1). Este mismo concepto aplica si se considera el sistema para una familia compuesta por cuatro personas o para una comunidad de 2 mil personas.

La expresión matemática para calcular la demanda de agua es la siguiente:

$$D_j = Nu * Dot * Nd \quad \dots\dots\dots (ec. 2.1)$$

$$D_{anual} = \sum_{j=1}^{12} D_j$$

j = No. del mes, j = 1,, 12

Donde:

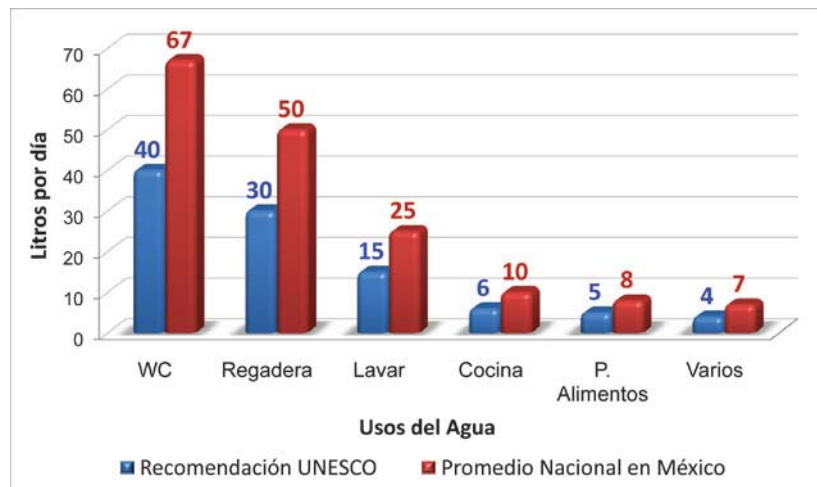
D_j = demanda de agua en el mes j, (m³/mes/población)

Nu = número de beneficiarios del sistema,

Dot = dotación, (L/persona/día)
 Nd_j = número de días del mes j,
 D_{anual} = demanda de agua para la población,
 j = número del mes (1, 2, 3,..., 12)
 1000 = factor de conversión de litros a m³

Figura 2.1.

Demanda para diferentes usos del agua de acuerdo con los criterios planteados



De igual manera si se establece que el propósito del SCALL es abastecer de agua a un sistema de producción pecuario, la determinación de la demanda será a partir del requerimiento diario de agua por cada animal que componga el sistema.

Ejemplo:

La demanda de agua para satisfacer la demanda de consumo animal de un parque zoológico puede observarse en los cuadros 2.1 y 2.2.

Cuadro 2.1

Demanda de agua diaria y anual por especie animal, información base para la determinación del volumen de diseño del SCALL.

| Especie | Consumo de agua (l/día) | Consumo de agua (m ³ /día) | Consumo anual de agua (m ³) |
|--------------------|-------------------------|---------------------------------------|---|
| Elefante asiático | 200 | 0.2 | 73 |
| Rinoceronte blanco | 150 | 0.150 | 54.75 |
| Tigre | 20 | 0.020 | 7.3 |
| León africano | 20 | 0.020 | 7.3 |
| Antílopes | 45 | 0.045 | 16.425 |
| Jirafas | 24 | 0.024 | 8.76 |
| Aves | 0,2 | 0.0002 | 0.073 |
| Cebras | 30 | 0.030 | 10.95 |
| Corderos | 4 | 0.004 | 1.46 |
| Bisontes | 40 | 0.040 | 14.6 |
| Avestruz | 4 | 0.004 | 1.46 |
| Llamas | 8 | 0.008 | 2.92 |
| Primates | 2 | 0.002 | 0.73 |

Fuente, Garza V. I., Zoológico African Safari, México. 2009.

Cuadro 2.2

Demanda de agua diaria y anual para diferentes especies animales de explotación comercial, en diferentes estadios.

| Especie | Consumo de agua (l/día) | Consumo de agua (m ³ /día) | Consumo anual de agua (m ³) |
|--|-------------------------|---------------------------------------|---|
| Vacas adultas grandes productoras | 80 | 0.08 | 29.2 |
| | 130 | 0.13 | 47.5 |
| Cerdos última etapa de crecimiento de 54.5 kg PV | 6 | 0.006 | 2.2 |
| | 8 | 0.008 | 2.9 |
| Ovinos a 4 meses de gestación | 5.4 | 0.0054 | 2.0 |
| Cabras productoras de carne | 4.2 | 0.0042 | 1.5 |
| Cabras productoras de leche | 11.2 | 0.0112 | 4.1 |
| Conejos machos adultos | 0.5 | 0.0005 | 0.2 |
| Pollos de 1.30 kg PV | 1.57 | 0.00157 | 0.6 |
| Pavos de 20 semanas de edad | 6 | 0.006 | 2.2 |
| | 8 | 0.008 | 2.9 |

PV : Peso Vivo

Fuente; IICA. 1998

Si el SCALL se plantea para obtener agua que será utilizado en un sistema de producción agrícola en condiciones de invernadero, la demanda de agua estará compuesta por la evapotranspiración (uso consuntivo del cultivo).

El cálculo de la demanda, se hace mediante la siguiente ecuación:

$$D = \frac{Nu * Dot * Nd}{1000} \dots\dots\dots \text{(ec. 2.2)}$$

Donde:

D = demanda de agua, (m³)

Nu = número de beneficiarios del sistema,

Dot = dotación, (l/persona/día)

Nd = número de días (se utiliza 1, para obtener la demanda diaria)

1000 = factor de conversión de litros a m³.

Ejemplo:

Para dos comunidades del Departamento de El Paraíso, Honduras C.A. ubicadas en la parte sur de la subcuenca del río Texiguat en los límites con la cuenca baja del río Choluteca, considerando una dotación diaria de 65 L/persona para uso domestico, alimentación y consumo humano establecida por el Servicio Autónomo Nacional de Acueductos y Alcantarillado (SANAA) (Cuadro 2.3), de Honduras C.A. Aplicando la ecuación anterior se tiene que la demanda diaria para cada una de las comunidades es la siguiente. (Fuente: Peña P., T. M., 2008, VII Diplomado CIDECALLI-CP).

a).- Comunidad de Jiñicua:

$$D = \frac{256 * 65 * 1}{1000} = 16.64 \text{ m}^3/\text{día}$$

b).- Comunidad Terrero

$$D = \frac{100 * 65 * 1}{1000} = 6.5 \text{ m}^3/\text{día}$$

Cuadro 2.3

Demanda de agua para las comunidades de Jiñicua y Terrero, de Honduras C.A. Para la población de 356 habitantes en ambas comunidades, la demanda diaria de agua para uso domestico, alimentación y consumo humano es de 23.14m³

| Municipio | Comunidad | Núm. de viviendas | Núm. de habitantes | Demanda Litros/persona /día | Demanda m ³ /persona /día |
|--------------|-----------|-------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| Vado Ancho | Jiñicua | 47 | 256 | 16,640 | 16.64 |
| Vado Ancho | Terrero | 15 | 100 | 6,500 | 6.5 |
| TOTAL | | 62 | 356 | 23,140 | 23.14 |

2.2.2. CÁLCULO DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL NETA

A partir de la información disponible de precipitación (P), se determina la Precipitación Neta (PN), que se define como la cantidad de agua de lluvia que queda a disposición del sistema (SCALL), una vez habiendo descontado las pérdidas por factores como salpicamiento, velocidad del viento, evaporación, fricción, tamaño de la gota; considerados en un coeficiente de captación que se ha planteado del 85%

(0.85) de acuerdo con la experiencia desarrollada en el CIDECALLI-CP. La eficiencia de la captación del agua de lluvia depende del coeficiente de escurrimiento de los materiales del área de captación, el cual varía de 0.1 a 0.9 (Cuadro 2.4).

Cuadro 2.4
Coeficientes de escurrimiento (Ce) de los diferentes materiales en el área de captación.

| Tipo de Captación | Ce |
|---|--------------------|
| Cubiertas superficiales | |
| <i>Concreto</i> | <i>0.6 - 0.8</i> |
| <i>Pavimento</i> | <i>0.5 - 0.6</i> |
| <i>Geomembrana de PVC</i> | <i>0.85 - 0.90</i> |
| Azotea | |
| <i>Azulejos. Teja</i> | <i>0.8-0.9</i> |
| <i>Hojas de metal acanaladas</i> | <i>0.7-0.9</i> |
| Captación en tierra | |
| <i>Suelo con pendientes menores al 1 0%</i> | <i>0.0-0.3</i> |

A continuación se presenta la fórmula para estimar la precipitación neta:

$$PN = P * \eta \text{ captación} \dots\dots\dots (\text{ec. 2.3})$$

$$\eta \text{ captación} = Ce * Pr \text{ ob.}$$

PN = precipitación neta, (mm)

P = precipitación, (mm)

η captación = eficiencia de captación del agua de lluvia,

Ce = coeficientes de escurrimiento.

Cuando las precipitaciones medias mensuales sean menores de 40-50 mm y de baja intensidad (mm/hr), se recomienda no considerarlas, sobre todo si se presentan durante las épocas secas, ya que la cantidad y calidad del agua de lluvia no será de consideración para su almacenamiento. La determinación de la demanda anual se obtiene mediante la siguiente expresión matemática.

$$D_{\text{anual}} = \sum_{j=1}^{12} DJ \dots\dots\dots (\text{ec. 2.4})$$

Dónde:

D: Demanda anual y J: número del mes (1, 2, 3, . . . , 12)

Dj: Demanda de agua en el mes j (m3/mes/población)

De acuerdo con la población objetivo del SCALL y la demanda de agua por persona, se establecen los costos para su implementación. En el cuadro 2.5 se presenta el costo para cuatro sistemas diferentes.

Cuadro 2.5

Estimación de la demanda y el costo de inversión por persona para un sistema familiar y cuatro sistemas comunitarios.

| Numero | | L/persona /día | Demanda | | Tipo de cisterna | Inversión | |
|----------|----------|----------------|--------------------------------|------------------------------|------------------|---------------|-------------|
| Familias | Usuarios | | Demanda mensual m ³ | Demanda anual m ³ | | persona (USD) | total (USD) |
| 1 | 4 | 50 | 6 | 72 | Familiar | 1,000 | 4,000 |
| 125 | 500 | 2.7 | 40.5 | 486 | Comunal | 100 | 50,000 |
| 250 | 1,000 | 2.7 | 81 | 972 | Comunal | 80 | 80,000 |
| 750 | 3,000 | 2.7 | 243 | 2,916 | Comunal | 70 | 210,000 |
| 1,250 | 5,000 | 2.7 | 405 | 4,860 | Comunal | 60 | 300,000 |

Fuente CIDECALLI-CP, 2009

La fuente de aprovisionamiento está constituida por la precipitación pluvial, en el área en la que se localizará el SCALL, por lo que se hace imprescindible conocer su magnitud mediante el registro por un periodo de observación por lo menos de 10 años, a fin de identificar los promedios registrados en mm de lluvia media mensual, precipitación media anual, precipitación máxima en 24 hrs y la intensidad de la lluvia alcanzada en una hora. Esta información es necesaria para diseñar los componentes principales del sistema.

El material utilizado en la superficie sobre la cual se lleva a cabo la captación del agua de lluvia juega un importante papel en la eficiencia de captación, específicamente en relación con la facilidad con la que el agua fluye sobre dicha superficie, considerando un mayor o menor volumen de pérdidas. A partir de esta característica se ha definido el coeficiente de escurrimiento para diferentes materiales. En el cuadro 2.6 se indican los valores del coeficiente de escurrimiento para distintos materiales.

Cuadro 2.6.

Coefficientes de escurrimiento (Ce) de los diferentes materiales utilizados en el área de captación.

| Tipo de Captación | Ce |
|---------------------------|-------------|
| Cubiertas superficiales | |
| Concreto | 0.6 - 0.8 |
| Pavimento | 0.5 - 0.6 |
| Geomembrana de PVC | 0.85 - 0.90 |
| Azotea | |
| Azulejos, teja | 0.8-0.9 |
| Hojas de metal acanaladas | 0.7-0.9 |

Fuente: CIDECALLI, 2005

Aumento de la Oferta Hídrica

La ecuación para calcular la Precipitación Neta (PN) es la siguiente:

$$PN = P * \dots\dots\dots \text{(ec. 2.5)}$$

Donde:

PN= Precipitación Neta, (mm)

P = Precipitación, (mm)

η = Eficiencia de captación del agua de lluvia; se obtiene de multiplicar el coeficiente de escurrimiento (Ce) por el coeficiente de captación 0.85.

A continuación se presenta el cuadro 2.7 de registro de la Precipitación media mensual reportado por el Sistema Meteorológico Nacional de México, para la estación meteorológica núm. 020159 Pedro y Pablo Teposcolula, Estado de Oaxaca, México y la Precipitación Neta (PN) estimada, considerando un coeficiente de escurrimiento de 0.9, correspondiente a la geomembrana de PVC.

De esta manera se determinaron los valores de precipitación neta (PN) para cada uno de los meses que se anotan en el cuadro 2.7

$$PN_{\text{Enero}} = 5.6 \times (0.9 \times 0.85)$$

$$PN_{\text{Enero}} = 5.6 \times 0.765 = 4.284 \approx 4.3 \text{ mm}$$

Cuadro 2.7

Precipitación media mensual, para la estación meteorológica Pedro y Pablo Teposcolula, ubicada en la región de la Mixteca alta del Estado de Oaxaca, México. Con localización geográfica; Latitud: 17° 31' N; Longitud: 097° 30' W, Elevación: 1940 metros sobre el nivel del mar (msnm) y un periodo de observación de 30 años.

| Mes | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | ANUAL |
|--------------------|-----|-----|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-----|-------|
| Precipitación | 5.6 | 8.5 | 9.9 | 30.4 | 81.7 | 144.3 | 109.2 | 95.2 | 116.8 | 31.4 | 12.7 | 5.4 | 651.1 |
| P N | 4.3 | 6.5 | 7.6 | 23.3 | 62.5 | 110.4 | 83.5 | 72.8 | 89.4 | 24.0 | 9.7 | 4.1 | 498.1 |
| PN (≥ 40 mm) | | | | | 62.5 | 110.4 | 83.5 | 72.8 | 89.4 | | | | 418.6 |
| Precip Máxima | 41 | 42 | 47 | 99.5 | 190.5 | 247 | 205 | 235.2 | 226.5 | 98.1 | 52 | 40 | 247 |

Es importante destacar que el valor de PN considerado para el diseño, es el que resulta de la suma de los meses cuya precipitación media es mayor o igual a 40 mm, de manera que aquellos que no reúnen este requisito son considerados como meses secos (Figura 2.2)

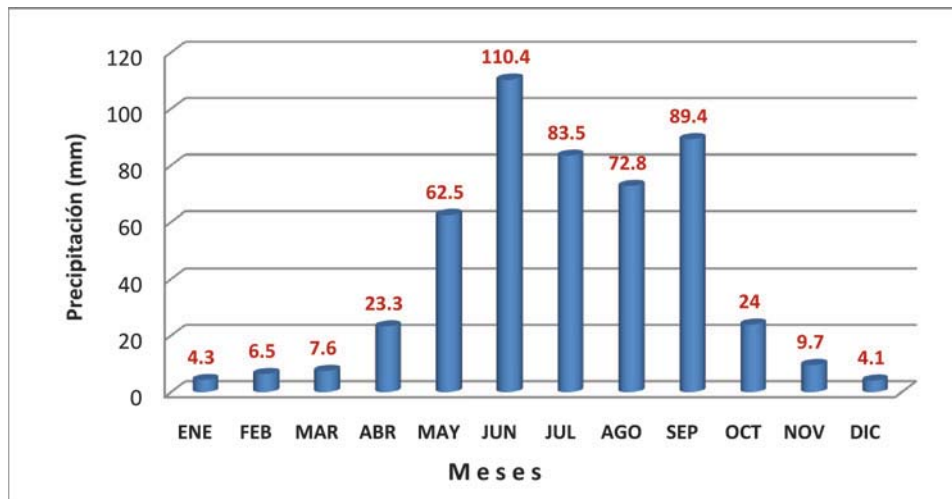


Figura 2.2. Precipitación pluvial promedio mensual histórica.

2.2.3 DETERMINACIÓN DEL ÁREA DE CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA

El área de captación es la superficie sobre la cual cae la lluvia. Se utilizan para este fin los techos de casas, escuelas, bodegas, invernaderos y laderas revestidas o tratadas con materiales que la impermeabilizan. Es importante que los materiales con que están construidas estas superficies, no desprendan olores, colores y sustancias que puedan contaminar el agua pluvial o alterar la eficiencia de los sistemas de tratamiento. La superficie debe contar con una extensión tal, que permita captar un volumen de agua igual al estimado en la demanda, y una pendiente que facilite el escurrimiento pluvial al sistema de conducción; es importante mencionar que solo se debe considerar la proyección horizontal del área de captación y expresarla en m^2 .

A continuación se describen los tipos de áreas de captación de lluvia:

Techos. En general, están contruidos de concreto, aleación de lamina galvanizada y antimonio; láminas de asbesto, lámina galvanizada y madera; también se pueden utilizar las superficies impermeables (canchas, patios, estacionamientos), que no desprendan residuos o contaminantes al contacto con el agua e incrementen el costo del tratamiento para obtener un producto de calidad. En el caso de techos de concreto deben limpiarse antes de impermeabilizar; si son de lámina galvanizada o asbesto se recomienda revisar si tienen algún deterioro y en su caso sustituirlas, antes de su impermeabilización. Además, se requiere asegurar y verificar que sus estructuras soporten el peso de las canaletas, más el agua de lluvia (Figura 2.3).



Figura 2.3. Techos de escuelas utilizados como áreas de captación del agua de lluvia.

Techos cuenca. Son estructuras diseñadas para la recolección directa del agua de lluvia compuesta básicamente de dos secciones: el techo, que funciona como área de contribución y retardador de evaporación, abajo de éste se encuentra el tanque o cisterna de almacenamiento. El techo está formado por dos superficies que convergen en un canal central lo cual permite que el agua de lluvia se conduzca directamente por gravedad a la cisterna. Para indicar el nivel de almacenamiento se instala un piezómetro en la pared externa del tanque. El sistema de conducción del agua consiste de una válvula de salida, continuada por una tubería para terminar en una llave para el uso público (Figura 2.4).



Figura 2.4. Techo de cuenca en la comunidad del Tecongo, Aguascalientes

Laderas. Cuando el área de captación de los techos es insuficiente se selecciona una superficie o ladera que requiera las mínimas actividades de movimiento de tierras (relleno, nivelación y compactación), posteriormente se recubre toda la superficie con algún material impermeable como: plástico de invernadero, geomembrana, "consolid" ó concreto (Figura 2.5).



Figura 2.5. Ladera recubierta con geomembrana de PVC acondicionada como área para captación de agua de lluvia.

Para realizar las actividades anteriormente citadas, se deben obtener características y condiciones del sitio tales como: topografía, geología, flora, historial del sitio y curvas de nivel esto con la finalidad de determinar los volúmenes de excavación, relleno y compactación.

El relleno de la cisterna debe ejecutarse en capas horizontales de espesor no mayor de 20 centímetros en toda la superficie y en longitudes adecuadas. Si el material no fuese uniforme, se debe mezclar hasta obtener la debida uniformidad y controlarse el tamaño máximo de los elementos que integren dicho material.

La compactación consiste en aplicar presión al suelo suelto para reducir espacio poroso y vacío, aumentando su densidad aparente y en consecuencia, su capacidad de soporte y estabilidad. Es importante controlar previamente el contenido de humedad del suelo, que debe corresponder a la humedad óptima que se determina en laboratorio (ensaye Proctor). En la mayor parte de los casos, es necesario el empleo de maquinaria especializada como rodillo "pata de cabra" y rodillo con "ruedas neumáticas" que ejercen presiones superiores a 9 kg/cm².

Un dato útil para el cálculo del área de captación del agua de lluvia es que por cada milímetro de agua de lluvia que cae sobre un metro cuadrado, se obtendrá un litro de agua. No obstante, existen coeficientes de ponderación que modifican el enunciado anterior debido a las pérdidas en las superficies de captación causadas por el rebote del agua al caer, la absorción, evaporación del agua y la pendiente de las superficies. En este apartado se han asignado valores a dichos coeficientes, pero dado que su influencia depende de las condiciones de cada lugar en particular, los valores pueden ser modificados a criterio del técnico según los estudios previos y experiencias con que cuente.

En el Cuadro 2.8 se muestra un análisis del volumen del agua de lluvia captado en litros, con relación al área de captación y precipitación pluvial promedio. Se han hecho algunas consideraciones para su utilización, tomando en cuenta precipitaciones

pluviales promedio de 1, 10, 100, 1000, 2000 y 3000 mm, áreas de captación de 1 hasta 1,000 m² en múltiplos de 50 m² y de 1,000 a 10,000 m² en múltiplos de 500 m².

De esta forma, se puede obtener el volumen del agua de lluvia a captar para cualquier condición, mediante las sumas correspondientes a las intersecciones de precipitación contra el área de captación. Si por ejemplo, se tiene una área de captación de 1 m² y se cuenta con una precipitación de 110 mm, el volumen de agua captado es de 100 l, que se obtiene de sumar el valor correspondiente a las intersecciones de la hilera del área de captación correspondiente a 1 m² con la precipitación de 10 mm (10 l) más la de 100 mm (100 l). Para encontrar el volumen real de agua captada, el valor que se ha determinado en el cuadro 2.8, debe ponderarse con la eficiencia en la captación del agua de lluvia.

Cuadro 2.8

Volumen de agua con relación al área de captación (Ac) en m² y la precipitación pluvial en mm.

| Área de captación m ² | Precipitación pluvial (mm) | | | | | |
|----------------------------------|----------------------------|---------|-----------|------------|------------|------------|
| | 1 | 10 | 100 | 1,000 | 2,000 | 3,000 |
| 1 | 1 | 10 | 100 | 1000 | 2000 | 3000 |
| 10 | 10 | 100 | 1,000 | 10,000 | 20,000 | 30,000 |
| 100 | 100 | 1,000 | 10,000 | 100,000 | 200,000 | 300,000 |
| 300 | 300 | 3,000 | 30,000 | 300,000 | 600,000 | 900,000 |
| 500 | 500 | 5,000 | 50,000 | 500,000 | 1,000,000 | 1,500,000 |
| 700 | 700 | 7,000 | 70,000 | 700,000 | 1,400,000 | 2,100,000 |
| 900 | 900 | 9,000 | 90,000 | 900,000 | 1,800,000 | 2,700,000 |
| 1,000 | 1,000 | 10,000 | 100,000 | 1,000,000 | 2,000,000 | 3,000,000 |
| 2,000 | 2,000 | 20,000 | 200,000 | 2,000,000 | 4,000,000 | 6,000,000 |
| 3,000 | 3,000 | 30,000 | 300,000 | 3,000,000 | 6,000,000 | 9,000,000 |
| 4,000 | 4,000 | 40,000 | 400,000 | 4,000,000 | 8,000,000 | 12,000,000 |
| 5,000 | 5,000 | 50,000 | 500,000 | 5,000,000 | 10,000,000 | 15,000,000 |
| 6,000 | 6,000 | 60,000 | 600,000 | 6,000,000 | 12,000,000 | 18,000,000 |
| 7,000 | 7,000 | 70,000 | 700,000 | 7,000,000 | 14,000,000 | 21,000,000 |
| 8,000 | 8,000 | 80,000 | 800,000 | 8,000,000 | 16,000,000 | 24,000,000 |
| 9,000 | 9,000 | 90,000 | 900,000 | 9,000,000 | 18,000,000 | 27,000,000 |
| 10,000 | 10,000 | 100,000 | 1,000,000 | 10,000,000 | 20,000,000 | 30,000,000 |

La ecuación para calcular el área de captación es la siguiente:

$$A_{ec} = \frac{D_{anual}}{\sum_{j=1}^n PN} \dots\dots\dots \text{(ec. 2.6)}$$

Donde:

Aec = Área efectiva de captación (m²)

D_{anual} = Demanda anual (m³)

PN = Precipitación Neta (m)

J...n = meses cuya precipitación media es ≥ 40 mm

La determinación del tamaño del área efectiva de captación presenta el escenario cuando ya se dispone de una superficie fija que será destinada para la captación del agua de lluvia. Tal es el caso de techos de escuelas, casas, industrias, invernaderos o cualquier edificación en la que se desea instalar el SCALL.

En este caso el razonamiento está dirigido a calcular el volumen de agua que puede ser captado en esta superficie, y definir la capacidad para cubrir la demanda. Para determinar la capacidad de captación se aplica la siguiente ecuación:

$$D_{anual} = Aec \left(\sum_{j=1}^n PN \right) \dots\dots\dots (ec. 2.7)$$

Así por ejemplo se tiene que en la subcuenca de La Concepción, La Soledad, Estado de Guanajuato. México, en una vivienda rural (Figura 2.6), que cuenta, con 118.23 m² de área superficial de captación de lluvia (Figura 2.7); tiene una demanda mensual de 4.86 m³ y una demanda anual de 58.32 m³ para 6 habitantes, con una dotación diaria de 27 litros por persona y una PN anual de 0.746 m. Aplicando la ecuación:

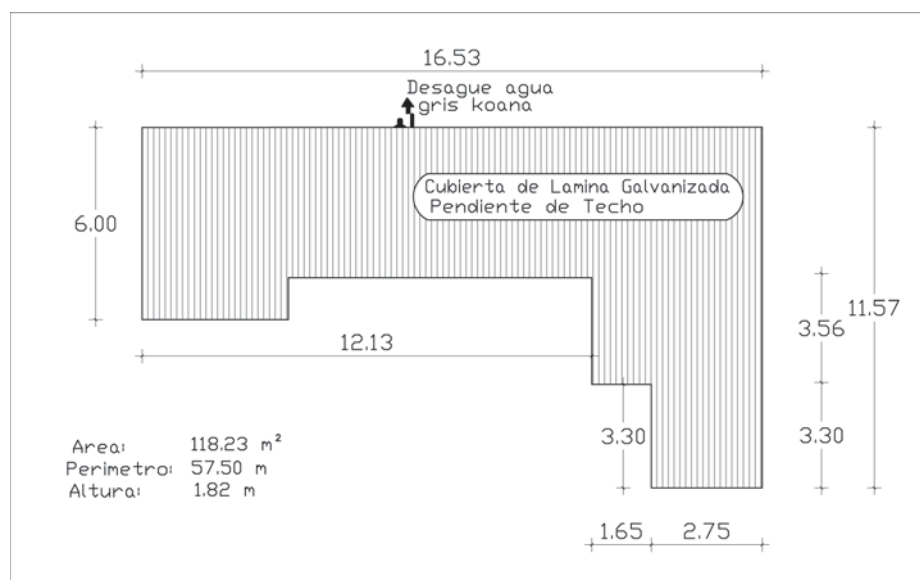
$$D_{anual} = Aec \left(\sum_{j=1}^n PN \right) \dots\dots\dots (ec. 2.8)$$

Sustituyendo los datos se tiene:

$$D_{anual} = (118.23 \text{ m}^2) * (0.746 \text{ m}) = 88.19 \text{ m}^3$$

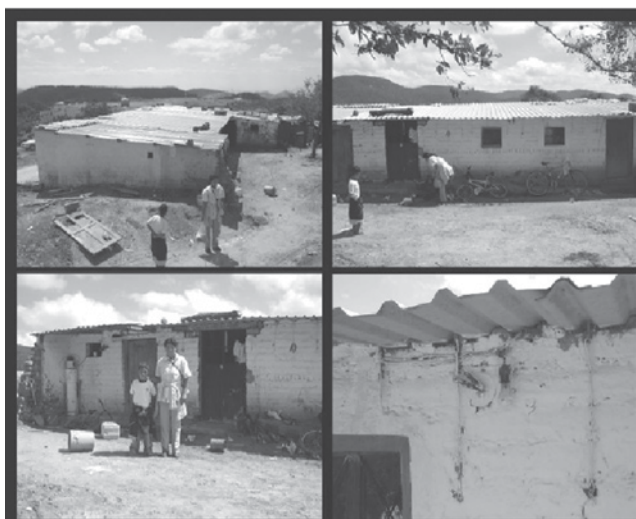
El área total de captación de agua de lluvia obtiene 88.19m³ y su demanda anual es 58.32 m³, por lo que se dispondrá de un superávit de 29.87 m³. Si el resultado hubiera dado negativo entonces la diferencia tendría que subsanarse con una fuente de agua adicional.

Figura 2.6
Croquis del área de captación del agua de lluvia en un hogar



Fuente: Gay A. L., 2008, CIDECALLI, México.

Figura 2.7
Vivienda rural donde se planteó el proyecto SCALL



Fuente: Gay A. L., 2008, CIDECALLI, México.

2.2.4. CONDUCCION DEL AGUA DE LLUVIA CAPTADA

El sistema de conducción se refiere al conjunto de canaletas o tuberías de diferentes materiales y formas (Figura 2.8) que conducen el agua de lluvia del área de captación al sistema de almacenamiento a través de bajadas con tubo de PVC.

Figura 2.8

Forma de canaletas acordes a edificaciones



Las canaletas se instalan en los bordes perimetrales del techo, en donde el agua de lluvia se acumula antes de caer al suelo; el material debe ser liviano, resistente, fácil de unir entre sí y combinar con los acabados de las instalaciones, que no contamine con compuestos orgánicos o inorgánicos por lo que se recomienda se coloquen mallas (Figura 2.9) que detengan basura, sólidos y hojas para evitar la obstrucción del flujo en la tubería de conducción; así mismo, realizar en los techos labores de limpieza al inicio de la época de lluvias.

Figura 2.9

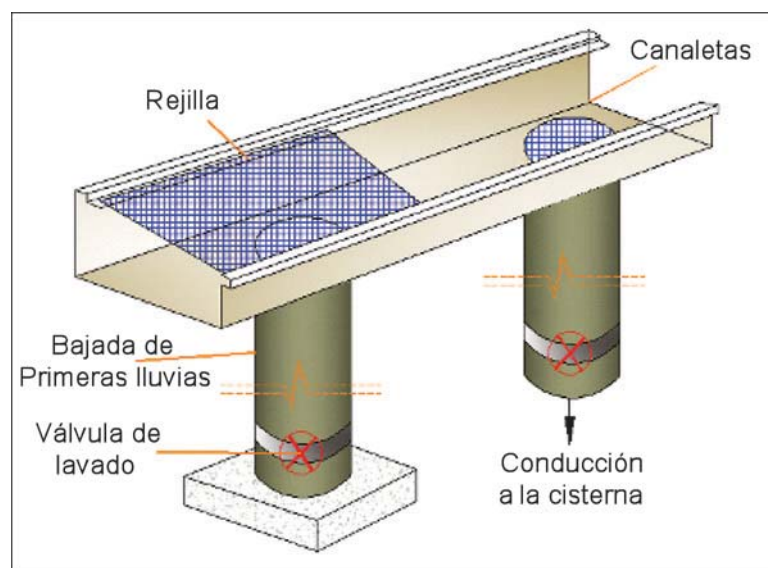
Canaletas con malla para evitar la contaminación por hojas



Los materiales utilizados son: aluminio, lámina galvanizada, polietileno de alta densidad y PVC. Actualmente se ha visto que los arquitectos, ingenieros y dueños de casas consideran estructuras diversas para la colección del agua de lluvia. En la Figura 2.10 se muestra el diagrama completo de un sistema de colección y trampa de sólidos.

Figura 2.10

Canaleta con rejilla y válvula para el lavado durante las primeras lluvias



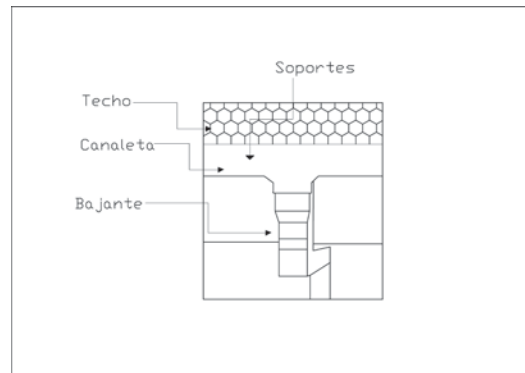
Fuente: CONAFOVI, 2005

El agua pluvial captada en techos y áreas de escurrimiento debe ser conducida al sistema de sedimentación, mediante canaletas que pueden ser de materiales como lámina galvanizada, plástico, PVC, madera, etc. de igual manera pueden tener de una sección de formas variadas como cuadrada, circular, trapezoidal y rectangular entre otras.

El sistema de conducción se define como el conjunto de conductos, accesorios y uniones utilizados para coleccionar las aguas pluviales vertidas en el área efectiva de captación, para dirigirlas hacia los puntos de tratamiento y almacenamiento para su posterior utilización.

En la ejecución de la red de recogida de agua de lluvia, las canaletas tienen como función recoger y conducir el agua pluvial vertida en el área de captación (techos) para su evacuación (Figura 2.11).

Figura 2.11.
Componentes principales del sistema de conducción en el área de captación compuesta por un techo.



(Foto; Soriano Rull. 2007)

2.2.5. CISTERNAS PARA EL ALMACENAMIENTO DEL AGUA DE LLUVIA

Tanques o cisternas de ferrocemento

Estas cisternas son rápidas de construir, los materiales se consiguen fácilmente para que los mismos usuarios las construyan. A continuación se presenta el proceso de construcción de una cisterna de ferrocemento (Figura 2.12).

Figura 2.12
Procesos de construcción y algunos tipos de cisternas



Fuente: www.dip.go.ug, www.bosquedeniebla.com.mx/html/ecocis.htm

Su proceso es a) y b) colocación de malla y aplanado, c) colocación de PVC para conducción del agua de lluvia y d) cisterna con tapa.

Ventajas:

De bajo costo, uso reducido de materiales, no se necesita molde, puede ser fabricado por personas de la localidad en poco tiempo, fácil de reparar y por lo general es aceptada por la comunidad.

Desventajas:

El agua se calienta con facilidad, la obra no puede ser interrumpida pues las capas subsecuentes del aplanado no se adhieren suficientemente entre sí, lo cual puede ocasionar pérdidas de agua por filtración, este tipo de cisterna no es recomendada para zonas sísmicas, ya que puede fracturarse, principalmente cuando está seca.

Cisterna de concreto

En Estados Unidos de América, las cisternas de concreto se fabrican bajo condiciones controladas, de ahí son trasladadas al sitio de instalación. La capacidad de almacenamiento es de 5 a 35 m³; cuando las dimensiones son mayores se construyen en el sitio seleccionado. La calidad del agua almacenada depende de los acabados realizados sobre sus paredes y el material utilizado para impermeabilizar. Las cisternas pueden estar sobre la superficie del suelo, enterradas o semienterradas; sin embargo, es una tecnología costosa para los países en desarrollo (Figura 2.13).

Figura 2.13

Transporte de cisterna de concreto:(a) 5 m³ y (b) 75,6 m³.



Fuente: www.rainwaterconnection.com (2007)

Cisternas de cemento-tabique

Son las que con mayor frecuencia se encuentran en las zonas rurales de México, construidas con arcilla horneada y arena cementada (Figura 2.14).



Figura 2.14. Cisterna de cemento tabique

Desventajas:

Son de baja flexibilidad ya que los materiales de construcción no resisten desplazamientos y movimientos sísmicos. En dimensiones mayores la construcción resulta con altos costos comparativos y mayor cantidad de material cementante; además, necesita estructuras de soporte como cadenas, mezcla de arena con cemento para el recubrimiento de las paredes para su impermeabilización, el tamaño varía de 2 a 30 m³.

Cisternas revestidas con cubierta flotante de geomembrana de PVC, polietileno de alta densidad ó polipropileno reforzado

Dentro de las nuevas tecnologías de productos geosintéticos se encuentran las geomembranas, que son impermeables a fluidos y partículas, evitan filtraciones, fugas y contaminación del agua almacenada. La geomembrana de PVC, el polietileno de alta densidad y alto peso molecular y el polipropileno reforzado ofrecen muchas ventajas: facilidad de instalación, elasticidad, resistencia a punzonamiento, de fácil colocación por ser termofusionable (cisternas, canales y otros depósitos); algunas de sus propiedades es que llegan a 25 años de vida y alcanzan una elongación del 200 %. La impermeabilización obtenida con 1 mm de espesor de geomembrana de PVC equivale a la impermeabilidad de 1 m de arcilla compactada. Una cisterna de concreto resulta de tres a cuatro veces más costosa que una recubierta con estos productos geosintéticos (Figura 2.15).

Para la instalación de las geomembrana se requieren las siguientes actividades:

Aumento de la Oferta Hídrica

- *Eliminar raíces y otros objetos punzantes que puedan dañar la geomembrana.*
- *Verificar que la tierra excavada sea apta para hacer terraplenes y compactación.*
- *Verificar la superficie sobre la cual se colocará la geomembrana.*
- *Definir qué tipo de geomembrana se va a utilizar (PVC, polietileno, poliuretano), el color y espesor dependen de la profundidad.*
- *Determinación del ancho y largo de las porciones de geomembrana.*
- *Ensamblaje o soldadura térmica con equipo y personal especializado, calificado y certificado.*
- *El perímetro superior de la geomembrana debe anclarse alrededor de la cisterna, construyendo una cepa perimetral de 50x50x40 cm para cubrirse con tierra.*
- *Proteger los taludes exteriores con vegetación ó con algún geotextil.*
- *Se debe instalar un vertedor de demasías para prevenir los desbordamientos.*

Ventajas:

- *Es de tres a cuatro veces más económica que una cisterna de ferrocemento,*
- *La geomembrana tiene una garantía de 10 años y una durabilidad de 25 años,*
- *La cisterna con cubierta flotante evita la contaminación del agua de lluvia por polvo y previene la proliferación de microbios,*
- *Las reparaciones se realizan fácilmente y en corto tiempo,*
- *Se necesita una compactación mínima con maquinaria pesada,*
- *En zonas sísmicas no ocurren desplazamientos ya que la geomembrana es flexible.*

Desventajas

En terrenos arenosos se dificulta la compactación de las paredes de la cisterna, por lo cual es necesario considerar los taludes, lo que aumenta la superficie a revestir con geomembrana y por consiguiente los costos de las cisternas.

Figura 2.15
Cisternas revestidas con geomembrana de PVC



Cisterna de metal

Es el material más utilizado en la construcción de cisternas y tanques que almacenan agua de lluvia. El acero galvanizado no es resistente a la corrosión, pero es frecuentemente más resistente a la oxidación. En los tanques nuevos podría existir un exceso de zinc el cual puede afectar el sabor del agua de lluvia almacenada. Estos tanques deben lavarse con agua antes de usarse (Figura 2.16).

Figura 2.16
(a) Lámina galvanizada con tornillos, (b) Estructura del techo (c) material impermeable para evitar las pérdidas del agua por evaporación.



Fuente: www.rainwaterconnection.com

Tanque de polietileno

Son ampliamente utilizados para el almacenamiento de agua ya que estos varían en forma, tamaño y color, pueden ser usados superficialmente ó enterrados, son fáciles de transportar e instalar, durables, flexibles, con acabados sanitarios para agua potable (Figura 2.17). Existen presentaciones de 0.5 a 25 m³ de capacidad.

Figura 2.17

Tanque de polietileno de 5 m³



Fuente: Rotoplas

Cisterna de madera

Se han utilizado estas cisternas, construidas con Secoya para almacenar agua para los diversos usos y consumo humano. Actualmente este tipo de cisternas tienen una gran presentación estética, a veces resulta una opción deseable ya que son construidos de pino, cedro y ciprés, envuelto con cables de acero de alta tensión (Figura 2.18).

Figura 2.18

Cisterna de madera de pino con tensores para almacenar 5 m³.



Fuente: www.rainwaterconnection.com

La ventaja es que mantienen el agua a una temperatura aceptable (15 a 20°C) en verano, la protege de la congelación en invierno; además, son desmontables y móviles.

Las desventajas son que deben instalarse a una altura determinada sobre el suelo para su mayor duración, deben ser construidas por técnicos expertos y son costosas.

2.3. COSTO UNITARIO POR UNIDAD DE AGUA DE LLUVIA ALMACENADA EN DIFERENTES TIPOS DE CISTERNA

En el cuadro 2.9 se presentan los costos aproximados de diferentes cisternas para el almacenamiento del agua pluvial.

Cuadro 2.9
Costos de diferentes cisternas para almacenamiento del agua pluvial

| MATERIAL | COSTOS USD/L | | TAMAÑO L. | | COMENTARIOS | COSTOS USD/1000 LTS | |
|----------------------------|--------------|------|-----------|-----------|---|---------------------|-------|
| | | | | | | | |
| Fibra de vidrio | 0.13 | 0.50 | 2,000 | 8,000 | Puede durar por varias décadas, las reparaciones son fáciles. | 130 | 500 |
| Concreto | 0.07 | 0.31 | 40,000 | | Con el tiempo pueden aparecer grietas; además, el olor y el sabor del agua cambian. | 70 | 310 |
| Metal | 0.13 | 0.38 | 600 | 10,000 | Es de peso ligero y de fácil transportación. | 130 | 380 |
| Polipropileno | 0.09 | 0.25 | 1,200 | 40,000 | Es de peso ligero; el agua se calienta al estar expuesto a la luz del sol; | 90 | 250 |
| Geomembrana* | 0.01 | | | 4,000,000 | Flexible, durable y recomendable para zonas sísmicas. | 10 | |
| Polietileno | 0.19 | 0.42 | 1,200 | 20,000 | Es de peso ligero, la radiación solar puede producirle daños. | 190 | 420 |
| Acero soldado con autógena | 0.20 | 1.00 | 120,000 | 4,000,000 | Es resistente y durable. | 200 | 1,000 |

Fuente: *The Texas Manual on Rainwater Harvesting, 2005*; *CIDECALLI, 2005

2.4. FILTRACIÓN DE AGUA DE LLUVIA

La filtración es el proceso para separar sólidos del líquido en el que están suspendidos, al hacerlos pasar, a través de un medio poroso (filtro) y por el cual el líquido puede pasar fácilmente.

Cuando el agua de lluvia es captada de los techos, se debe instalar un tanque (Figura 2.19) para almacenar temporalmente las primeras lluvias contaminadas por basura, hojas y polvo y utilizarla en el riego de frutales, hortalizas u otras aplicaciones que no requieran una alta calidad del agua.

Figura 2.19
Tanque de recepción de las primeras lluvias



Fuente: www.arcsa-usa.org

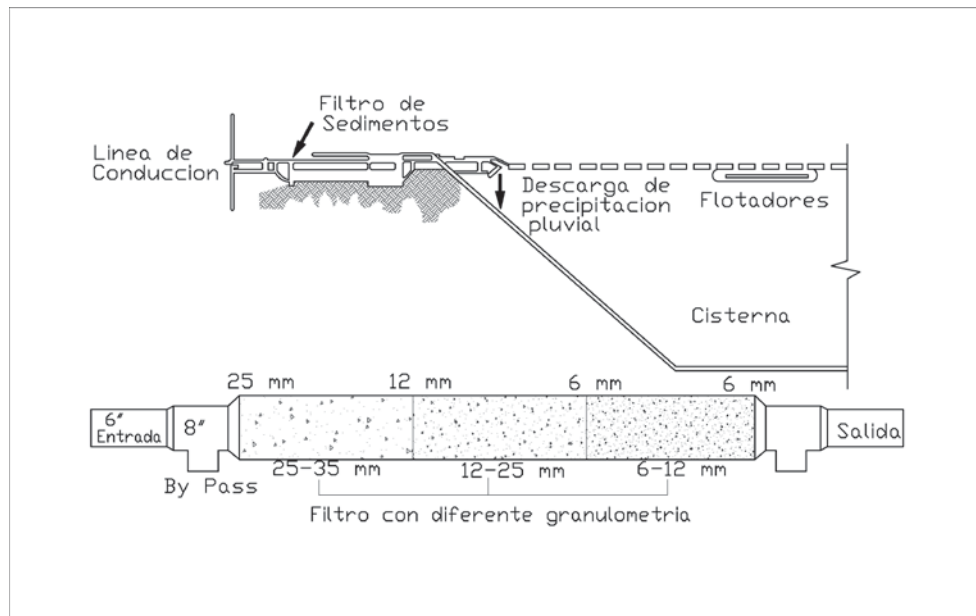
El dispositivo más sencillo consiste en colocar una malla a la mitad de un bote de 19 litros y en la parte del fondo se adapta a la tubería de la línea de conducción (Figura 2.20).

Figura 2.20
a) Trampa de basura, b) válvula para drenaje



En los sistemas de captación del agua de lluvia a nivel comunitario se puede reducir la turbidez mediante la construcción e instalación de un sedimentador o bien la instalación de un filtro modular de sedimentos (Figura 2.21); su construcción consiste en un cuerpo de PVC hidráulico, con un sistema filtrante de arenas y gravas silicas; su ubicación es en la parte superior de la cisterna cementada a la red principal, justa antes de la descarga del agua pluvial.

Figura 2.21
Instalación del filtro modular de sedimentos



El material filtrante debe estar siempre limpio y sus capas removidas y lavadas durante la época de lluvias.

Un sistema más complejo es la construcción de cortinas separadoras fijas y flotantes, dirigiendo el flujo del agua a las cortinas separadoras para incrementar el tiempo de retención del líquido y mejorar la calidad del producto resultante.

2.5 SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DEL AGUA DE LLUVIA

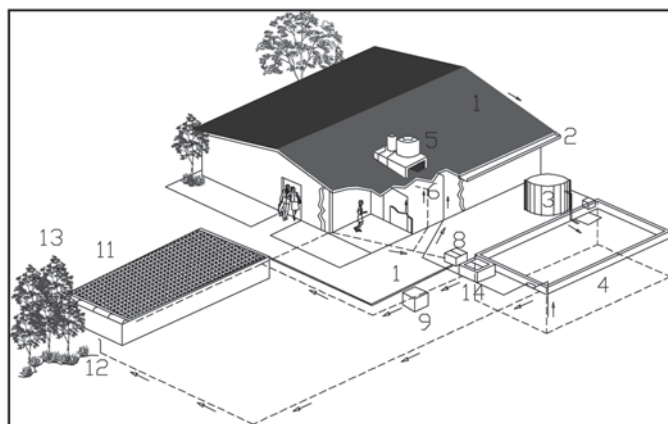
Los sistemas de distribución del agua de lluvia captada, dependen del uso que se dé al recurso agua: consumo humano, uso doméstico, agricultura, ganadería, y uso industrial; también de la situación geográfica y topografía de la localidad.

2.5.1 USO DOMÉSTICO

Elementos de un sistema convencional a nivel familiar de captación del agua lluvia (COLPOS 1)(Figura 2.22); (Aec) el área de captación (130 m²) es el techo de la casa, (Sc) el sistema de conducción con canaleta de lamina galvanizada sobre el borde del techo y (C) la cisterna revestida con geomembrana PVC (0.75 mm de espesor) y tubería de PVC de 4 pulgadas de diámetro para la bajada de agua de lluvia, que se encuentra conectada al área de captación a través de la canaleta. Se cuenta con un sistema para potabilizar y purificar el agua de lluvia, en tal forma que la familia cuente con este vital líquido durante todo el año, Además, es posible tratar y reutilizar las aguas grises y negras para los sanitarios y producción de hortalizas en el traspatio.

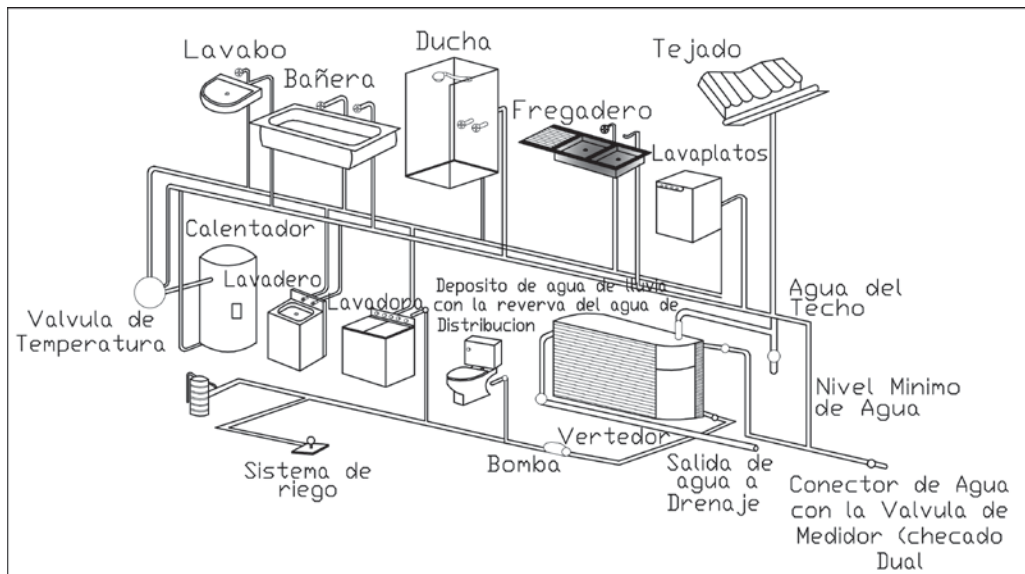
Figura 2.22

Diagrama de captación del agua de lluvia, tratamiento y reutilización de las aguas grises y negras, Fuente: COLPOS CIDECALLI-CP, 2006



En el siguiente diagrama (Figura 2.23), se observa el sistema completo de captación y distribución de agua para uso doméstico y consiste en captar el agua en el tejado (1), coleccionar en las canaletas (2), que tienen una pendiente mínima para drenar a la línea de conducción (3) para descargar a una cisterna (4) con la dimensión suficiente para abastecer en la época sin precipitaciones pluviales.

Figura 2.23
Sistema moderno de una red de distribución de agua de lluvia



Fuente: Texas Water Development Board, 2004

2.5.2 DISEÑO DEL VOLUMEN DEL SEDIMENTADOR O TRAMPA DE SOLIDOS

La sedimentación es un proceso físico que consiste en la separación, por la acción de la gravedad, de las partículas suspendidas cuyo peso específico es mayor que el del agua. Las variables de diseño de la trampa son el área efectiva de captación del agua de lluvia y la máxima lluvia registrada en un día.

$$V_{\text{sedimentador}} = Aec * Id \dots \dots \dots (2.9)$$

Donde:

- $V_{\text{sedimentador}}$ = volumen del sedimentador, (m³)
- Aec = área efectiva de captación de agua de lluvia, (m²),
- Id = es el día con máxima lluvia registrada, (m)

La sedimentación sirve para reducir la turbiedad y eliminar sustancias en suspensión que pueden separarse, en un tiempo razonable, por el efecto de la gravedad (Figura 2.24).

Cuando las partículas no logran ser retenidas por las mallas de las canaletas y se manejan áreas mayores a 1,000 m² se deben considerar procedimientos y criterios para dimensionar un sedimentador en función de las partículas suspendidas en el agua.

Si el material en suspensión se asienta rápidamente, formándose una interface sólido-líquido, se considera que el líquido contiene material silíceo de tamaño reducido pero de masa específica elevada, que es la que produce ese fenómeno.

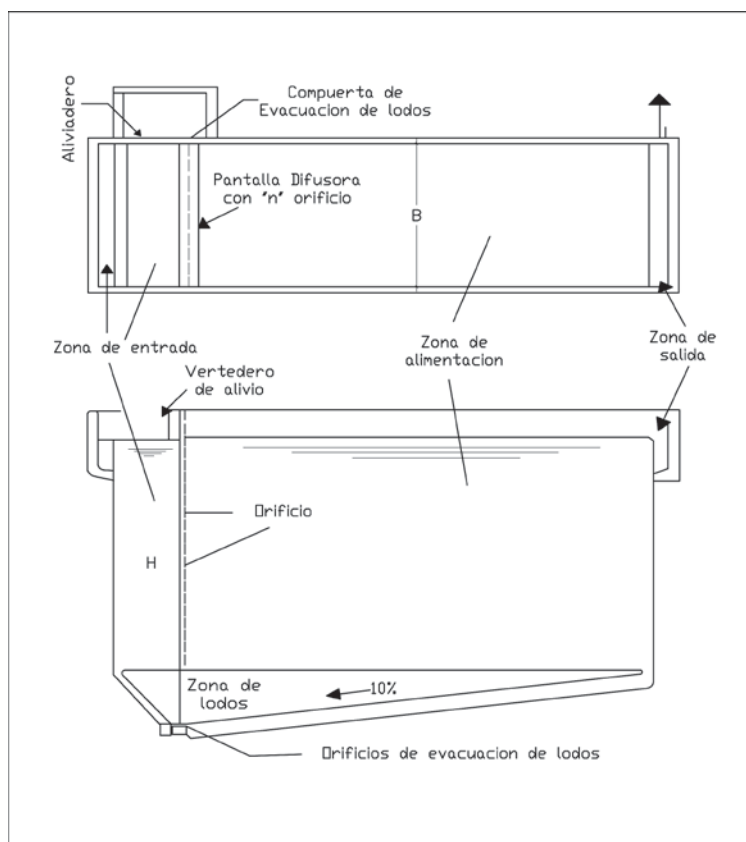
La materia inorgánica con tamaño mayor a 0.02 mm por lo general puede ser removida por sedimentación natural, sin el uso de coagulantes químicos.

Los tanques de sedimentación pueden ser de forma rectangular, cuadrada o circular, para las tareas de operación y mantenimiento se recomienda el uso de tanques rectangulares de flujo horizontal, operados en forma continua.

El tiempo de retención debe ser suficiente para permitir que los sólidos en suspensión se asienten (partículas de mayor densidad que el agua) o floten (partículas de menor densidad que el agua).

Es conveniente determinar en cada caso la velocidad de sedimentación utilizando una columna de sedimentación.

Figura 2.24
Vista en planta y longitudinal del sedimentador (CEPIS, 2005)



2.5.3 BOMBEO DEL AGUA DE LLUVIA ALMACENADA

Consiste en extraer el agua almacenada y captada en los meses con precipitación pluvial mediante un sifón o un equipo de bombeo. Los componentes son: pichan-cha, línea de conducción, motobomba y un tanque de almacenamiento previo al tren de tratamiento de purificación (Figura 2.25).

TÉRMINOS HIDRÁULICOS

En la sección anterior se han establecido los conceptos necesarios para estimar los requerimientos mínimos de agua para el abastecimiento de un grupo de personas o población. También se describieron los factores que determinan la demanda de agua. A continuación se presentarán los términos hidráulicos para estimar la potencia hidráulica de la bomba y extraer el agua almacenada.

Espejo de agua. Superficie en reposo del agua dentro de la cisterna, pozo o noria.

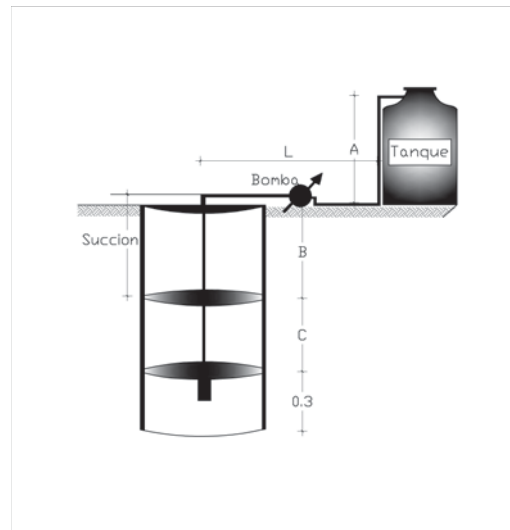
Nivel estático: Profundidad a la que se ve el espejo de agua en estado estacionario (cuando no hay extracción de agua). Es la distancia que hay desde el nivel de la superficie al espejo del agua. Está representado por **B** y se mide en metros, m.

Nivel dinámico. Profundidad a la que se ve el espejo de agua en el proceso de bombeo (durante la extracción). Es la distancia que hay desde el nivel de superficie al espejo de agua durante el proceso de bombeo, se mide en metros, m.

Nivel de descarga. Altura a la que hay que llevar el agua. Distancia que hay desde la superficie hasta el borde superior del tanque de almacenamiento. Está representado por **A** y se mide en metros, m.

Profundidad de abatimiento. Diferencia de distancia entre el nivel estático y el dinámico. Está representado por **C**, se mide en metros, m.

Figura 2.25
Diagrama de bombeo de agua almacenada



Altura de fricción. Distancia adicional que hay que agregar debido a la fuerza de fricción que oponen las paredes de la tubería, conexiones y válvulas, para el flujo de agua.

Profundidad de succión. Es la distancia que hay desde el centro de una bomba superficial al espejo de agua, se mide en metros, (m)

Los parámetros hidráulicos referidos a los términos anteriores están basados en el concepto físico asociado al trabajo que se tiene que realizar, para un volumen de agua determinado a cierta altura, en contra de la fuerza de atracción gravitacional. En hidráulica, a la fuerza que hay que realizar para efectuar este trabajo se le llama carga hidráulica.

Carga estática. Es la distancia a la que hay que llevar el agua desde el nivel estático hasta el nivel de descarga (A+B).

Carga dinámica de fricción. Carga adicional que aparece cuando el agua se desplaza dentro de la tubería, en toda su longitud, a un gasto dado. Se simboliza por CF, también se mide en metros, m. Su cuantificación depende de factores físicos como el tipo de tubería, longitud y el gasto que circula por ella.

Carga dinámica total. Es la carga hidráulica en el proceso de bombeo. Se simboliza por CDT.

$$CDT = (A + B) + CF \dots\dots\dots (\text{ec. 2.10})$$

Potencia hidráulica (PH). Es la fuerza que debe tener la bomba para realizar dicho trabajo, en watts y está dada por la expresión:

1 HP = 746 watts
 PH = 9.8 Q. CDT (ec. 2.11)

Donde:

9.8=es la aceleración de la gravedad ($m\ s^{-2}$)
 Q=es el gasto o caudal ($m^3\ s^{-1}$)

2.6 EJEMPLO CASO COMUNITARIO DE CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA

Caso comunitario Purépecha: Captación en techos de escuelas primarias y purificación del agua de lluvia para consumo humano.

Las tres purificadoras del agua de lluvia para la etnia Purépecha están ubicadas dentro del área de influencia del Municipio de Los Reyes de Salgado, Michoacán a una altura promedio de 2,500 msnm y con una precipitación promedio anual histórica de 1,309 mm.

Las comunidades son: San Antonio Tierras Blancas con una población de 690 habitantes y una infraestructura para la captación del agua de lluvia consistente en una serie de aulas con 750 m²; San Isidro tiene 1,462 habitantes y una superficie de sus aulas de 1,400m²; y Santa Rosa tiene 179 habitantes con un área de techos de escuelas de 200 m².

Para determinar la demanda de las comunidades se consideró un consumo per cápita de 2.4 litros por persona por día, utilizando la expresión 2.2 y 2.4 se tiene:

San Antonio:

$$D_1 = \frac{690 * 2.4 * 30.4}{1000} = 50.3\ m^3$$

$$D_{anual} = \sum_{j=1}^{12} D_j = 50.3\ m^3 * 12 = 604.1\ m^3$$

Los resultados para las comunidades de San Isidro y Santa Rosa, se presentan en los cuadros 2.10 y 2.11, ya que el procedimiento es similar al ejemplo 1.

Cuadro 2.10

Resumen de estimación de demanda anual, precipitación pluvial neta, área de captación, diámetro de conducción y volumen de la cisterna.

| | Unidad | San Antonio | San Isidro | Santa Rosa |
|--------------------------|------------------------------------|-------------|------------|------------|
| Población | habitantes | 690 | 1,462 | 179 |
| Dot | lpd | 2.4 | 2.4 | 2.4 |
| Ndj | días | 30.4 | 30.4 | 30.4 |
| DJ | m ³ mes ⁻¹ | 50.3 | 106.7 | 13.1 |
| D anual | m ³ anual ⁻¹ | 604.1 | 1,280 | 156.7 |
| Ce | adim | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| probabilidad | % | 90 | 90 | 90 |
| P P total | mm | 1,309 | 1309 | 1,309 |
| | Mm | 776 | 776 | 776 |
| A disponible | m ² | 750 | 1,400 | 200 |
| Aec | m ² | 779 | 1,650 | 200 |
| Qc | Lps | 11 | 23 | 3 |
| Dc | Mm | 100 | 150 | 75 |
| T comercial | In | 4 | 6 | 3 |
| V sedimentador | m ³ | 39 | 82 | 10 |
| Meses con sequia | meses | 7 | 7 | 7 |
| V cisterna | m ³ | 352 | 747 | 91 |
| Dimensiones de cisterna | M | 19x11x3 | 10x41x3 | 13x14x3 |
| Producción de garrafones | piezas/día | 84 | 178 | 22 |

Donde:

A...: disponible es el área disponible en techos de escuelas,

Dc...: es el diámetro comercial en tubería de PVC,

T...: comercial es la tubería comercial en material de PVC.

D...: demanda

P...: precipitación

A...: área

Q...: caudal

V...: volumen

2.6.1 ÁREA DE CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA

Se consideró conveniente utilizar los techos de las instituciones educativas con el objeto de fomentar y reforzar la cultura sobre la captación y el aprovechamiento eficiente del agua de lluvia, que contribuya al desarrollo rural sustentable en las comunidades de las zonas marginadas (Figura 2.26).

Figura 2.26

Techo de escuela primaria utilizado como área de captación de agua de lluvia.



2.6.2 EQUIPO DE RECOLECCIÓN DEL AGUA DE LLUVIA

El equipo instalado está integrado por seiscientos tres metros de canaletas, construidas con lamina galvanizada, grado sanitizante, calibre 26 y unidos cada 3.05 m con remaches pop y silicón de alta resistencia. Las canaletas tienen una base de 15 cm y una altura de 18 cm. El soporte para las canaletas debajo de las orillas de los techos se realizó con solera de acero de 1x1/8 de pulgada a cada metro de distancia (Cuadro 2.12 y 2.13; Figuras 2.27, 2.28 y 2.29).

Cuadro 2.11

Datos de entrada, cálculos de variables para obtener las dimensiones de canaletas rectangulares.

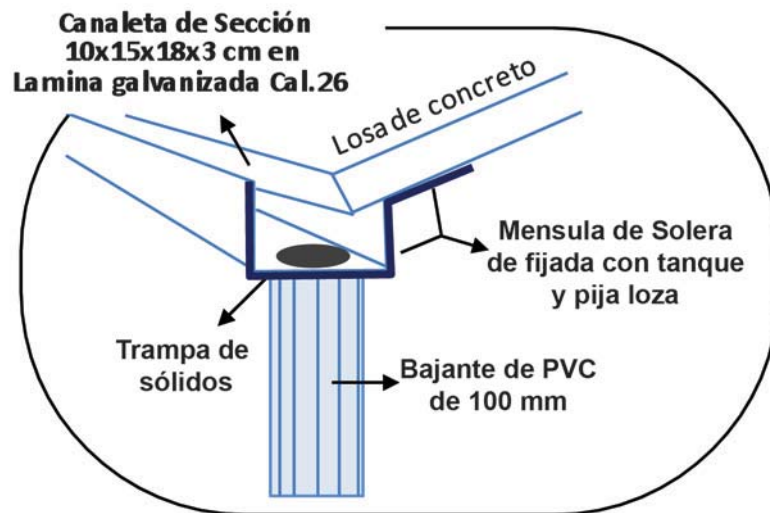
| Datos de entrada | Expresión | SANTA ROSA | SAN ISIDRO | SAN ANTONIO | UNIDAD |
|---|-----------------------------------|------------|------------|-------------|--------------------------------|
| Longitud de cauce= | Dato | 5 | 4.0 | 6.5 | m |
| Cota máxima= | Dato | 3.50 | 3.5 | 3.5 | m |
| Cota mínima= | Dato | 3.00 | 3.0 | 3 | m |
| Superficie de captación= | Dato | 0.000064 | 0.000060 | 0.000065 | km ² |
| Precipitación máxima= | Dato | 100 | 100 | 100 | mm |
| Duración de la precipitación máxima= | Dato | 0.167 | 0.167 | 0.167 | h |
| Cálculos | | | | | |
| Pendiente = | (Cota max-Cota min) Long Cause | 0.10000 | 0.1250 | 0.0769 | m m ⁻¹ |
| Velocidad = | Propuesta | 1.2 | 1.2 | 1.2 | m s ⁻¹ |
| T concentración = | | 0.0027 | 0.0021 | 0.0037 | h |
| Tiempo en que se produce el caudal máximo 1 = | | 0.106 | 0.093 | 0.1237 | h |
| Tiempo de concentración del hidrograma 1 = | | 0.283 | 0.248 | 0.3302 | h |
| Gasto máximo esperado 1 = | | 0.0168 | 0.0179 | 0.0146 | m ³ s ⁻¹ |
| Gasto máximo esperado 1 = | | 16.8 | 17.9 | 14.6 | lps |
| Tiempo en que se produce el caudal máximo 2 = | | 0.0833 | 0.083 | 0.0833 | h |
| Tiempo de concentración del hidrograma 2 = | | 0.2225 | 0.223 | 0.223 | h |
| Gasto máximo esperado 2= | | 0.0214 | 0.020 | 0.022 | m ³ s ⁻¹ |
| Área hidráulica necesaria = | | 0.0178 | 0.0167 | 0.0181 | m ² |

| CANALETA DE SECCION RECTANGULAR | | | | | |
|--|--|----------|----------|----------|----------------|
| Área hidráulica | | 0.01779 | 0.0167 | 0.0181 | m ² |
| base (b) | | 0.15 | 0.15 | 0.15 | m |
| Tirante (y) = Aj/b | | 0.12 | 0.11 | 0.12 | m |
| P. mojado = b+2y | | 0.39 | 0.37 | 0.39 | m |
| Radio hidráulico | | 0.05 | 0.044 | 0.046 | m |
| Dimensiones | | 15x12x18 | 15x11x18 | 15x12x18 | m |

Figura 2.27
Canaletas para la colección de agua de lluvia en la escuela primaria de los Reyes,
Michoacán

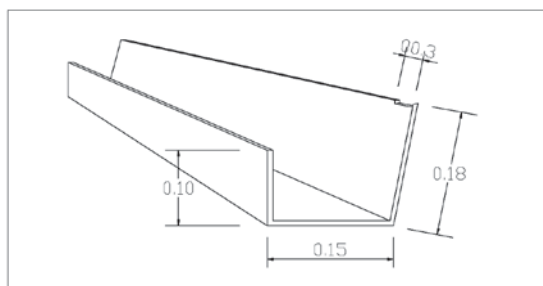


Figura 2.28
Detalle de canaleta y bajada



En cada canaleta se encuentran acondicionados los salientes metálicos para las bajadas de cuatro pulgadas.

Figura 2.29
Sección de la canaleta



Cuadro 2.12
Longitud de canaletas por población, en metros lineales

| POBLACIÓN | CANALETAS EN |
|-------------|--------------|
| SANTA ROSA | 47.90 |
| SAN ISIDRO | 375.13 |
| SAN ANTONIO | 169.79 |
| TOTALES | 592.82 |

El sistema de conducción del agua de lluvia se encuentra integrada por 66 bajantes con una altura promedio de 2.70 m, tubería de 110 mm (cuatro pulgadas de diámetro) en material de PVC sanitario (Figura 2.30).

Figura 2.30
Bajada de agua de lluvia de los techos



La red interna de conducción se encuentra integrada por 592.82 m lineales de tubería de PVC hidráulico de 100 mm tipo RD 41 clase 5, con una resistencia a la presión de 7 kg cm^{-3} la cual descarga a la red de conducción principal. Dicha red está integrada por 276 m lineales en tubería de PVC hidráulica de 150 mm (6 pulgadas) de diámetro tipo RD 41 clase 5 y con la misma resistencia a la tubería de 100 mm.

A continuación, en el cuadro 2.14 se muestra un resumen de la red de captación y conducción por población.

Cuadro 2.13

Resumen de material de PVC, bajantes, trampas de sólidos y numero de filtros de sedimentos.

| POBLACION | PVC HCO. 6" MI | PVC 4" MI | No. BAJANTES (Pieza) | No. TRAMPAS DE SOUDOS (Pieza) | No. FIL TROS DE SEDIMENTOS (pieza) |
|-------------|----------------------|-----------------|----------------------------|-------------------------------------|--|
| SANTA ROSA | 70.5 | 28.40 | 6.0 | 6.0 | 1 |
| SAN ISIDRO | 149.90 | 290.2 | 40.0 | 40.0 | 1 |
| SAN ANTONIO | 69.50 | 232.50 | 20.0 | 20.0 | 1 |
| TOTALES | 289.90 | 551.14 | 66.0 | 66.0 | 3 |

2.6.3 SISTEMA DE TRAMPAS DE SÓLIDOS

El sistema de trampas de sólidos está integrado par 66 trampas, colocadas en cada uno de los bajantes construidos con malla galvanizada, calibre 28 y pegadas a las canaletas con pegamento especial de PVC. Con estas mallas se evita la introducción a la red de basura, piedras, animales u objetos mayores (Figura 2.31).

Figura 2.31

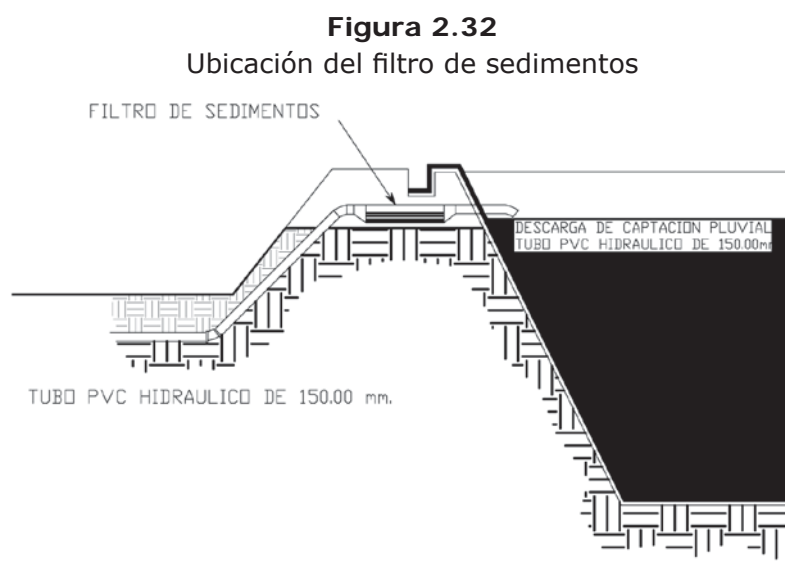
Trampas de malla galvanizada



2.6.4 SISTEMA DE FILTROS DE SEDIMENTOS

En cada uno de los sistemas de conducción se encuentra instalado un filtro modular de sólidos, su construcción es un cuerpo de PVC hidráulico de 10 pulgadas con un sistema filtrante modular de arenas y gravas sílicas; su ubicación es en la parte superior de la cisterna, cementado a la red principal justo antes de la descarga del agua pluvial (Figura 2.32).

El filtro de sedimentos cuenta con una salida con tapa roscada de sedimentos los cuales se desechan al momento de realizar el lavado correspondiente y se recomienda realizar esto al presentarse las primeras lluvias del año.



2.6.5 SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO

Las actividades fueron: excavación, acarreo, compactación y reforzamiento de muros de tierra de las cisternas para realizar el revestimiento con geomembrana de 1.5 y 1.0 mm para taludes y piso, respectivamente. Para evitar la contaminación y pérdidas por evaporación del agua almacenada, se colocó una cubierta flotante de PVC reforzada con calibre de 1.2 mm (Figura 2.33).

En la figura 2.34 se muestra el diagrama de instalación de la geomembrana de PVC en tres cisternas de las tres comunidades.

Figura 2.33

Diagrama de instalación de geomembrana en piso, taludes y cubierta flotante.

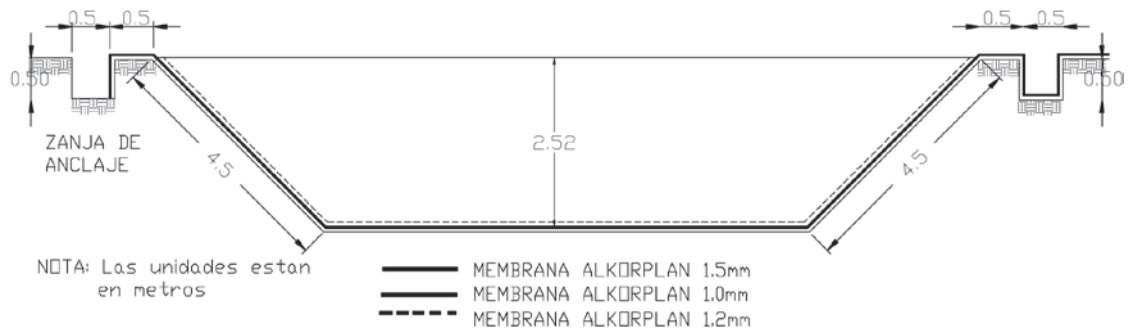


Figura 2.34

Cisterna de geomembrana de PVC con cubierta flotante en San Antonio, Los Reyes, Michoacán.



2.6.6 OBRA CIVIL

Se requirió de tres locales para las tres plantas purificadoras del agua de lluvia, con acabados sanitarios establecidos por la Secretaria de Salud, el espacio total requerido es de 30 m² para cada tren de purificación (Figura 2.35).

Figura 2.35

Local de 30 m² para el proceso de purificación de agua de lluvia.



2.6.7 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE POTABILIZACIÓN Y PURIFICACIÓN

El proceso se inicia con la colección del agua de lluvia, la cual equivale a 776 mm anuales; el almacenamiento se realizará en cisternas revestidas y con cubiertas flotantes de PVC, ahí se aplica el primer producto bactericida; filtrado (techo profundo, carbón activado y suavizador), pasa al filtro pulidor donde el agua potable es depositada en un tanque blanco; posteriormente por un equipo de luz ultravioleta para la eliminación de microorganismos y finalmente se aplica Ozono antes del lavado de garrafrones y llenado (Figura 2.36).

Figura 2.36

Tren de purificación (izquierda) y personal capacitado (derecha)



2.7 CONCLUSIONES SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA

Los Sistemas de Captación de Agua de Lluvia para uso doméstico a nivel de familia y a nivel comunitario consisten en captación, conducción, almacenamiento, potabilización, purificación y envasado del agua de lluvia representando una opción eficaz, viable y aceptable desde el punto de vista cultural, económico y ecológico por aquellas familias y poblaciones que no tienen acceso al agua entubada.

Las obras de captación del agua de lluvia son aceptadas por los habitantes de las localidades, debido a su fácil proceso constructivo, lo que permite disponer de una fuente de agua de buena calidad y cercana a sus viviendas, eliminando el enorme esfuerzo que representa el tener que acarrear agua de fuentes de abastecimientos alejadas, aspectos que en su conjunto contribuyen a mejorar la calidad de vida de los pobladores.

Además, estos sistemas son extrapolables a otras regiones y tienen repercusión a nivel internacional ya que ofrece una alta rentabilidad y mejora el bienestar social de las comunidades, sobre todo de aquellas con menos de 100 habitantes que se encuentran aisladas donde es poco probable que les llegue el agua entubada. El costo de un sistema familiar es de aproximadamente 3 500 dólares y la inversión por persona en un sistema comunitario varía de 50 a 80 USD.

2.8 CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA PARA MEJORAR LA PRODUCCION AGRÍCOLA

2.8.1 INTRODUCCIÓN

Las diversas civilizaciones humanas han luchado por su sobrevivencia durante varios milenios en ambientes áridos, semiáridos y subhúmedos, donde hay carencia de agua y de alimentos. Recientemente, los Sistemas de Captación y Aprovechamiento de Agua de Lluvia, han ayudado a resolver los problemas de abastecimiento en cantidad y calidad de agua para consumo humano, animal y de los vegetales cultivados.

En América Latina y el Caribe se cuenta con tecnología autóctona y tradicional sobre sistemas de Captación y Aprovechamiento del Agua de Lluvia; sin embargo, su utilización aún es limitada, por lo que gobiernos y comunidades buscan estrategias y unifican esfuerzos para hacer frente a esta creciente demanda de agua.

En relación con la superficie agrícola bajo condiciones de temporal, esta representa el 85% del área cultivada en el mundo, las pérdidas por sequía y por otros fenómenos meteorológicos equivalen al 25% de tal superficie, lo cual repercute severamente en la reducción de granos básicos, en la pérdida de la soberanía alimentaria,

desnutrición, miseria, migración, afectando drásticamente al bienestar social de la población.

En México la agricultura de riego produce hasta dos cosechas por año, la de temporal (secano) presenta pérdidas en un 25% del total anual sembrado debido a las sequías, lo escaso y errático de la precipitación pluvial y otros fenómenos meteorológicos como el granizo y las heladas.

La información sobre factores como cantidad y distribución de la lluvia en el año, la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, las necesidades hídricas del cultivo que se ha seleccionado para la región considerada, entre otros, constituyen aspectos de importancia para el diseño de las practicas que permitan aprovechar de manera eficiente el agua de lluvia.

Para establecer un sistema de captación del agua de lluvia, es necesario conocer la cantidad de agua disponible para los cultivos en forma de lluvia, ya que esta constituye la principal fuente de abastecimiento. En las áreas de agricultura de temporal, el uso consuntivo es mayor que la precipitación pluvial durante el ciclo vegetativo, es igual, o es menor; sin embargo predomina la primera situación, lo cual indica la necesidad de captar agua de lluvia para satisfacer el uso consuntivo de las plantas

2.8.2. TÉCNICAS PARA MODIFICAR EL MICROCLIMA Y EL MICROAMBIENTE DE LAS PLANTAS

El desarrollo tecnológico actual, permite modificar y mejorar el microclima y el microambiente de las plantas, entendiéndose por:

Microclima es el espacio, en volumen que existe entre la superficie del suelo y la parte más alta de la planta, y Microambiente es el volumen que comprende el sistema radical y la parte aérea de la planta.

2.8.3 PRINCIPALES TECNICAS DE CAPTACION Y APROVECHAMIENTO DEL AGUA DE LLUVIA

Son sistemas de escurrimientos y micro escurrimientos superficiales, son "formas especializadas de riego superficial acompañadas con estructuras de desviación y conducción de los escurrimientos de canales naturales o cauces establecidos y esparciendo el flujo en áreas relativamente niveladas. Las técnicas de microcaptación se utilizan en tres grupos de plantas: en hilera, cultivos tupidos y plantas individuales. Se adecuan a las características de las regiones áridas, semiáridas y subhúmedas secas, buscan coleccionar el escurrimiento, conducirlo y aplicarlo a terrenos de cultivos para mejorar el régimen de la humedad del suelo y aumentar la humedad aprovechable por los cultivos (Cuadro 2.14)".

Cuadro 2.14
Principales técnicas de captación de agua de lluvia
(Prácticas ancestrales de captación de suelo y agua de suelo)

| Práctica conservacionista | Sistema de Captación | Cultivos | Especificaciones | Establecimiento de cultivos | Trazo |
|--|---|--|---|---|---|
| a) Bordos de tierra al Contorno | Microcaptación (<i>In situ</i>) en áreas con Pendientes Cortas. | Arboles y Cultivos Tupidos | Bordos al Contorno con un espaciamiento menor a 20. | Para plantación de árboles y establecimientos cultivos tupidos | Sencillo |
| b) Microcaptación para cultivos individuales | Microcaptación (<i>In situ</i>) en áreas con Pendientes Cortas. | Árboles y Arbustos | En forma de cuadro o rectángulo o irregular. | Para plantación de árboles donde el terreno no es uniforme. | Sencillo |
| c) Bordos en Media Luna o Terraza Individual | Microcaptación (<i>In situ</i>) en áreas con Pendientes Cortas. | Agostadero Forrajes, Árboles, Arbustos | Bordos de Tierra semicirculares | Para resiembra de pastos, cultivos forrajeros o árboles en agostaderos degradados | Para áreas con mano de obra disponible |
| d) Microcuencas | Microcaptación (<i>In situ</i>) en áreas con Pendientes Cortas. | Cultivos Individuales tupidos y en hileras | Bordos al contorno | Para producción de cultivos en zonas con deficiencia de humedad. | A mano o con maquinaria |
| e) Bordos Trapezoidales | Manejo de escurrimientos superficiales en Pendientes Largas | Cultivos individuales Tupidos y en Hilera. | Bordos trapezoidales de tierra para almacenar escurrimientos superficiales. | Extensamente adecuado (en una variedad de diseños) para producción de cultivos en zonas áridas y semiáridas | Requiere mucha mano de obra y maquinaria ya que el escurrimiento superficial no se distribuye uniformemente |
| f) Bordos de Piedra al Contorno | Manejo de escurrimientos superficiales en Pendientes Largas | Cultivos individuales Tupidos y en Hilera | Bordos pequeños de piedra para reducir la velocidad del escurrimiento superficial. | Sistemas versátiles para producción de cultivos en una gran variedad de situaciones fáciles de construir por agricultores de escasos recursos | Es posible cuando existe abundante piedra disponible |
| g) Presas de Gaviones | Manejo de escurrimientos superficiales en Pendientes Largas | Cultivos individuales Tupidos y en Hilera. | Presas de gaviones que favorecen la distribución del agua y controlan la formación cárcavas | Adecuado para sistemas donde las pendientes son suaves | Para sitios muy específicos, necesita bastante piedra. |
| h) Bordos Esparcidos de Agua | Manejo de escurrimientos superficiales en Pendientes Largas | Cultivos individuales, Tupidos y en Hilera y Agostaderos | Bordos para esparcir los escurrimientos | Para zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas. | El mantenimiento se requiere en las primeras etapas de la construcción |

Aumento de la Oferta Hídrica

| Práctica conservacionista | Sistema de Captación | Cultivos | Especificaciones | Establecimiento de cultivos | Trazo |
|--|---|---|------------------------------|-----------------------------|---|
| i) Represar de tierra y piedra (Joyas) | Manejo de escurrimientos superficiales en Pendientes Largas y cortas. | Cultivos individuales, Tupidos y en Hilera. | Bordos de tierra y/o piedra. | Para zonas semiáridas. | Sencillo |
| j) Bodegas de agua de lluvia | Manejo de escurrimientos superficiales en Pendientes Largas y cortas. | Cultivos individuales, Tupidos y en Hilera. | Bordos de tierra | Para zonas semiáridas. | Trazo sencillo, se requiere excavación y revestimiento. |
| j) Entarquiamiento del agua | Manejo de escurrimientos superficiales en Pendientes Largas y cortas. | Cultivos individuales, Tupidos y en Hilera. | Bordos de tierra | Para zonas semiáridas. | Se requiere excavación y bordearía |



Fuente: M. Anaya.



Fuente: M. Anaya.



Fuente: M. Anaya.



Fuente: M. Anaya.

Captación in situ del agua de lluvia

Para establecer un sistema de captación *in situ* del agua de lluvia, es necesario obtener información sobre algunos factores, tales como: la cantidad y distribución de la lluvia en el año, la capacidad de almacenamiento de agua por el suelo, las necesidades hídricas de cultivo que se ha seleccionado para la zona donde se trabaje y, finalmente, con qué recursos se cuenta para establecer los diferentes sistemas de captación *in situ* que mejor pueden adaptarse a las condiciones del área de trabajo.

Reuniendo la información antes señalada se estará en capacidad: primero, de saber si es necesario establecer un sistema de captación *in situ*; y segundo, de elegir el sistema que se considere adecuado. La captación *in situ* se debe realizar cuando el uso consuntivo de las plantas es mayor que la precipitación pluvial.

Método de Anaya

Aplicación del Método de Anaya, para cultivos en hilera, cultivos tupidos y cultivos individuales.

Métodos de captación in situ utilizando la fórmula de Anaya et al., (1976).

Conociendo las cantidades de agua que necesita un cultivo y que no pueden ser satisfechas por la lluvia, se utiliza una fórmula de fácil aplicación encontrada por Anaya y colaboradores, con la que es posible determinar las superficies que deben dedicarse a escurrimientos y almacenaje dentro de un sistema de captación *in situ*.

En dicha fórmula se considera que el área de captación (A_c) es la superficie que los agricultores tradicionalmente dedican a cada cultivo en general (cuando no se ha realizado una obra de captación). Ejemplo: En Puebla acostumbran sembrar el maíz a 90 cm entre hileras y a 50 cm entre matas, lo que da una superficie de captación (A_c) de $90 \times 50 = 4500 \text{ cm}^2/\text{mata}$.

Se puede decir entonces que dentro de estos 4500 cm^2 están consideradas tanto el A_s como el A_e . Otro ejemplo es en el caso del frijol, el cual lo siembran a 70 cm

Aumento de la Oferta Hídrica

entre hileras y a 15 cm entre matas, lo que da una superficie de captación de 1050 cm², ahora bien, si a estos cultivos se les realizan obras de captación *in situ*, probablemente la distancia entre hileras aumente por ejemplo a 112 cm para el maíz y a 82 cm para el frijol; quedando la misma distancia entre matas que se tenía antes de efectuar la obra de captación.

En resumen, la distancia entre hileras para cada cultivo que los agricultores de cada zona acostumbren utilizar tradicionalmente, será para la fórmula de Anaya et al., el área de siembra (As), por otro lado el área de escurrimiento (Ae), será la superficie adicional que se agregue al As.

La fórmula es la siguiente:

$$AC = As + \frac{1}{C} \left(\frac{UC - P}{P} \right) \times As \dots\dots\dots (\text{ec. 2.12})$$

Ac = Tamaño de la microcuenca.

As = Área de siembra que los agricultores tradicionalmente utilizan según el cultivo

C = Coeficiente de escurrimiento en el Ae.

UC-P= Total de deficiencias mensuales de agua durante el ciclo vegetativo del cultivo

P = Total de la lluvia que cae durante el ciclo vegetativo del cultivo.

Dos ejemplos de aplicación de la fórmula de Anaya et al., para determinar el área de captación *in situ* son:

1º Ejemplo del procedimiento general para diagnosticar la necesidad de la obra de captación, para el caso del frijol, se tiene lo siguiente:

| Mes | Lluvia 50% Prob. (mm) | Uso Consuntivo del frijol (mm) | Balance Hídrico (mm) |
|--------|-----------------------|--------------------------------|----------------------|
| Junio | 53 | 93 | -40 |
| Julio | 47 | 97 | -50 |
| Agosto | 37 | 60 | -23 |
| TOTAL | 137 | 250 | 113 |

Sustituyendo valores en la fórmula.

$$UC-P = 113$$

$$P = 137$$

As = 40 cm de separación entre hileras para el frijol (método tradicional)

C = 0.50 (textura media con menos del 5% de pendiente y compactada)

Aplicando la fórmula se tiene:

$$AC = 40 + \frac{1}{0.5} \frac{(113)}{137} \times 40$$

$$Ac = 40 + 2.00 (0.8 \times 40)$$

$$Ac = 40 + 2.00 \times (32)$$

$$Ac = As + Ae$$

$$Ac = 40 + 64$$

$$Ac = 104 \text{ cm}$$

Esto quiere decir que en lugar de sembrar el frijol a una distancia de 70 cm entre hileras, deberá sembrarse a una distancia de 182 cm aproximadamente para satisfacer las necesidades hídricas del cultivo, es decir, el uso consuntivo. La distancia entre matas permanece inalterada.

2° El ejemplo que a continuación se detalla, es para la región de Huamantla, Tlax., con el cultivo de maíz, en el que se obtuvieron los siguientes datos:

| Mes | Lluvia 50% Prob. (mm) | Uso Consuntivo del maíz (mm) | Balance Hídrico (mm) |
|--------|-----------------------|------------------------------|----------------------|
| Abril | 33 | 67 | -34 |
| Mayo | 123 | 109 | +14 |
| Junio | 152 | 129 | +23 |
| Julio | 95 | 113 | -18 |
| Agosto | 95 | 100 | -5 |
| TOTAL | 498 | 518 | -20 |

Sustituyendo los valores en la fórmula se tiene:

$$UC-P = 20$$

$$P = 498$$

$As = 90 \text{ cm}$ de separación entre hileras para maíz

$C = 0.50$ (textura media con menos del 5% de la superficie sin compactar)

Aplicando la fórmula tenemos:

$$AC = 90 + \frac{1}{0.5} \frac{(20)}{498} \times 90$$

Aumento de la Oferta Hídrica

$$Ac = 90 + 2 (0.04 \times 90)$$

$$Ac = 90 + 2 (3.6)$$

$$Ac = 90 + 7.2$$

$$Ac = 97 \text{ cm}$$

Cuando el valor calculado del área de escurrimiento que se va agregar al área de siembra es menor que el 10% con respecto al A_s como en el caso anterior, no es recomendable considerarlo; por lo tanto, es más conveniente continuar con la distancia tradicional.

Cuando se disponga de recursos económicos y de los materiales necesarios para impermeabilizar el A_e con el objeto de aumentar el coeficiente de escurrimiento de dicha área y a la vez de reducir su tamaño, lo único que se debe hacer es sustituir en la fórmula el valor del coeficiente de escurrimiento del material empleado para tal fin.

Esta fórmula representa una importante herramienta para calcular el tamaño adecuado de la microcuenca de captación de agua de lluvia para plantas en hilera, tupidas e individuales, que satisface la demanda de agua de las plantas.

Aplicación de la fórmula de Anaya et al., para cultivos en hilera.

a) Diseño

Dentro del sistema de captación de lluvia *in situ*, para cultivos de escarda, el método más recomendable es el del distanciamiento entre hileras, el cual consiste en sembrar el cultivo seleccionado en surcos cuya separación se calcula mediante la fórmula antes mencionada, sin olvidar la topografía del terreno en que se va a trabajar ni la disponibilidad de implementos con los que cuente el agricultor (Figura 2.37).

Para utilizar la fórmula de Anaya et al., las unidades de A_s deben estar dadas en cm para que el A_c obtenido esté dado en esas mismas unidades.

b) Trazo

Para el trazo de cultivos en hilera se debe considerar, en primer término, el valor de la distancia calculada para la separación entre hileras que se debe emplear para la región y el cultivo seleccionado. Como paso inicial, se trazan sobre el terreno curvas a nivel que servirán como guía para la construcción de los surcos.

Cuando se dispone de maquinaria, la separación de los arados sobre la barra portaherramientas debe ser igual a la distancia calculada para la separación entre hileras de plantas.

Si se dispone únicamente de arados de tracción animal se debe tener cuidado de trazar los surcos sobre el terreno a la distancia calculada, siguiéndose el trazo en sentido transversal a la pendiente.

c) Construcción

Para facilitar la infiltración del agua en el área de siembra (As) se recomienda subsolar y dar un paso de arado, cinceles u otro implemento para propiciar un mejor desarrollo de las raíces.

Figura 2.37

Aplicación de la fórmula de Anaya et al. (1976) para calcular la distancia entre hileras de acuerdo a los factores suelo-planta-precipitación.



Posteriormente, con un arado de vertedera, una pequeña bordeadora o un arado modificado, se construyen los surcos, siguiendo las curvas a nivel.

Una sugerencia para la construcción es el empleo de un arado de reja modificado, esta modificación consiste en agregar una solera de metal o de madera al ala del arado, la función de este implemento es que al construir los surcos, la solera colocada al lado del ala, extienda de manera uniforme la tierra que voltea la vertedera del arado, dándole la pendiente adecuada al talud del surco superior.

El largo de la solera debe ser igual a la distancia que existe entre el fondo del surco y la parte más alta del mismo, considerando el talud más ancho del surco.

El método de siembra que se debe emplear en este sistema debe adaptarse a las condiciones de suelo y precipitación principalmente. Si las lluvias son de alta intensidad y el suelo es de textura pesada, se recomienda sembrar en el talud o en lo alto del surco para evitar el efecto de la inundación y que el sistema radical no esté bien aireado, sobre todo en las primeras etapas del cultivo. Si se trata de lluvias de

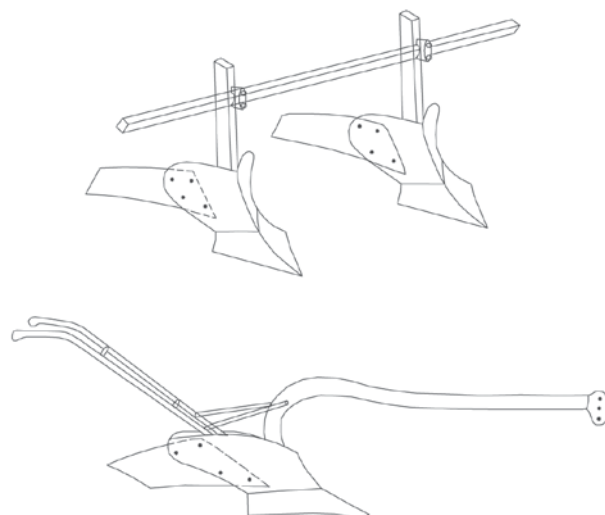
baja intensidad o bien si el suelo presenta una alta permeabilidad, se recomienda sembrar en el fondo del surco para tener la máxima concentración de agua.

Otra forma de efectuar la siembra bajo este sistema, consiste en seguir el método tradicional, o sea el de preparar el terreno mediante subsoleo, barbecho (si es que lo requiere) y uno o dos pasos de rastra; posteriormente a esta preparación, se siembra el cultivo en hileras, a la distancia calculada. Llegado el momento de la primera escarda, se utiliza una cultivadora para eliminar las malas hierbas y aflojar ligeramente la superficie del suelo entre las hileras; una vez realizada esta operación, se procede a construir el talud del surco, requiriéndose para ello de un arado de doble vertedera modificado (Figura 2.38).

Una ventaja que presenta este sistema es que se puede eliminar la hierba en forma mecánica, se propicia una mejor aireación del suelo y se da un aporque a la planta para prevenir el acame, además de que los surcos después de esta labor, están en condiciones de concentrar el agua en una zona vecina al área de raíces, lo que reduce las posibilidades de que puedan ser afectadas por efectos de inundación.

Figura 2.38

Arado de doble vertedera, modificado para la construcción de bordería.
(Tovar y Anaya, 1975)



Aplicación de la fórmula de Anaya et al., para cultivos tupidos.

a) Diseño

El diseño para cultivos tupidos se debe ajustar a las condiciones topográficas del terreno, y a la cantidad y distribución de la precipitación. El diseño puede hacerse, si la pendiente es uniforme, aplicando el principio de la terraza de Zing.

El ancho de la microcuenca se calcula mediante la fórmula de Anaya et al., considerando como área de siembra el ancho de la faja que se desee sembrar, el cual deberá ser un múltiplo del ancho de los implementos agrícolas a usar, bien sean de tracción mecánica o de tracción animal. En este caso, al aplicar la fórmula de Anaya et al., el A_s debe estar en metros para que el A_c calculada esté dada también en esas unidades. (Figura 2.39).

b) Trazo

Para el trazo de las microcuencas de captación para cultivos tupidos, se deben seguir los siguientes pasos:

- 1° Trazar curvas a nivel, cuya separación entre sí sea igual a la distancia calculada igual al ancho de la sembradora.
- 2° Delimitar el área de escurrimiento y el área de siembra.

Figura 2.39.

Aplicación experimental de la fórmula de Anaya et al. (1976) para calcular el área dedicada a escurrimiento en cultivos tupidos.



c) Construcción

La construcción se hará de acuerdo a los siguientes pasos:

- 1er. Paso: Sobre las curvas a nivel se construyen bordos, cuya altura sea capaz de retener el volumen de agua que capte la microcuenca.
- 2do. Paso: El área destinada a escurrimiento se debe localizar en la parte superior de la microcuenca, a esta área se le deben hacer las labores siguientes:

Aumento de la Oferta Hídrica

- 1) Eliminar de la superficie toda clase de objetos que impidan el libre escurrimiento, tales como piedras, ramas y arbustos.
- 2) Emparejar la superficie.
- 3) Compactar la superficie, si es necesario, con un rodillo de metal o de concreto.

Los pasos 2 y 3 pueden omitirse si no se cuenta con los recursos necesarios.

3er. Paso: El área destinada a la siembra se debe acondicionar mediante las labores siguientes:

- 1) *Preparación del suelo para la siembra.*
- 2) *Dar un paso de subsuelo o con cinceles, para propiciar la infiltración y reducir la evaporación. Esta labor se realizará siempre y cuando la textura y la estructura del suelo lo requieran.*
- 3) *Nivelación o emparejamiento de la superficie del suelo para una mejor distribución del agua.*
- 4) *Aplicar materia orgánica para aumentar la capacidad de retención de la humedad del suelo.*

Aplicación de la fórmula de Anaya et al. para frutales.

a) Diseño

El diseño de las microcuencas para frutales debe adaptarse a las condiciones topográficas del terreno, y como en los dos casos anteriores, dependerá de los factores siguientes: tipo de frutal, cantidad y distribución de la precipitación y de las características del suelo, los cuales al conjugarse en la fórmula de Anaya et al., determinan el tamaño y las características que debe tener la microcuenca.

El A_s inicial se obtiene de las recomendaciones generales dadas para frutales. Por ejemplo, las plantaciones de aguacate normalmente se realizan a distancias entre plantas de 10 m, lo que implica al utilizar la fórmula de Anaya et al., un $A_s = 100 \text{ m}^2$; con lo que el A_c calculado también estará dado en m^2 .

El A_c resultante puede acomodarse en el campo de diferentes formas de acuerdo a las necesidades de manejo del huerto. Por ejemplo, un $A_c = 25 \text{ m}^2$ puede formarse de varias maneras, 5×5 , 6×4.15 , etc. ; de modo que la disposición a seleccionar sea aquella que permita mayor facilidad en la operación del huerto.

b) Trazo

Para hacer el trazo definitivo de microcuencas para frutales, es de suma importancia considerar el uso consuntivo anual de ese frutal cuando llegue a su máximo desarrollo, y utilizar este dato en la fórmula, para calcular el tamaño de la microcuenca. Este método es aplicable a frutales aislados o bien en el establecimiento de un huerto, bajo un sistema de microcuencas.

En el trazo del huerto en áreas planas se debe seguir, de preferencia, los métodos tradicionales de distribución de árboles tales como el marco real, tresbolillo, etc., aunque en huertos en terrenos inclinados, el más conveniente es el de tresbolillo; en cualquier caso debe tenerse cuidado que la distancia entre árboles y la distancia entre hileras se ajusten a las dimensiones previamente establecidas, para que la superficie dedicada a cada frutal corresponda al tamaño de la microcuenca.

El trazo de las microcuencas deberá considerar también algunas condiciones del terreno.

Por ejemplo, si se trata de un terreno plano, el trazo se deberá hacer, de acuerdo a las características del viento o bien de la disponibilidad de luz solar.

Si se trata de un terreno con pendiente uniforme, el trazo se deberá hacer, siguiendo curvas a nivel que se deberán trazar previamente.

Si el terreno es accidentado, se deberán trazar, hasta donde sea posible, curvas a nivel y distribuir a los árboles de acuerdo al método antes mencionado, de tal forma que la construcción de las microcuencas no implique un movimiento excesivo de tierra.

Cuando el terreno presente una topografía accidentada, las microcuencas deberán adaptarse conforme se presenta el relieve.

c) Construcción

Cuando se ha delimitado el tamaño de las microcuencas y se ha hecho el trazo de las mismas sobre el terreno, se procede a su construcción.

En la construcción de la microcuenca se deben considerar tres aspectos:

1. Preparación del área de siembra.
2. Construcción de bordos.
3. Acondicionamiento del área de escurrimiento.

1) Preparación del área de siembra

Cuando se trate de suelos profundos (1 m ó más) la plantación se puede hacer en dos formas:

- *Si se dispone de maquinaria, se usa un arado zanjeador, el cual abre una zanja de 50 a 70 cm de profundidad en la hilera donde se colocarán los árboles, después se marca la distancia que deberá existir entre cada árbol y en este sitio se agregará estiércol o composta, recomendándose que cubra una longitud aproximada de 2 m, lo ancho de la zanja y una profundidad de 20 a 30 cm, sobre esta capa se coloca una capa delgada de suelo se coloca el árbol y se rellena con suelo; con el tractor se llena el resto de la zanja. Otra forma de plantación de los frutales es hacer cepas, en este caso, éstas se harán de 1 m² y de 60 cm de profundidad, el relleno se hará al igual que se explicó para la zanja. Cuando se trate de suelos superficiales o de tepetate se recomienda hacer cepas de 2 X 2 m y de 60 cm de profundidad, el relleno de la cepa se hace igual que en el caso anterior.*
- *Las cepas se deben construir en la parte más baja de la microcuenca, para facilitar el escurrimiento del agua. El relleno de la cepa se debe hacer, de preferencia, con material fino y rico en materia orgánica para que tenga una alta capacidad de retención y almacenamiento del agua (Figura 2.40).*

2) Construcción de bordos

Los bordos se pueden construir con mano de obra o bien con implementos agrícolas, tales como arados bordeadores, cuchillas niveladoras o escrepas, estos implementos pueden ser de tracción mecánica o bien de tracción animal.

Cuando la topografía es irregular, la construcción de los bordos se debe hacer, hasta donde sea posible, con la cuchilla o escrepa y después, cerrar y afinar a mano los bordos y emparejar el área de escurrimiento.

3) Acondicionamiento del área de escurrimiento

Habiéndose construido los bordos, se procede a emparejar la superficie interior para que tenga la máxima eficiencia en el escurrimiento del agua, esta labor es manual y se hace principalmente con el azadón y el rastrillo, como se observa en las figuras 2.40 y 2.41.

Figura 2.40

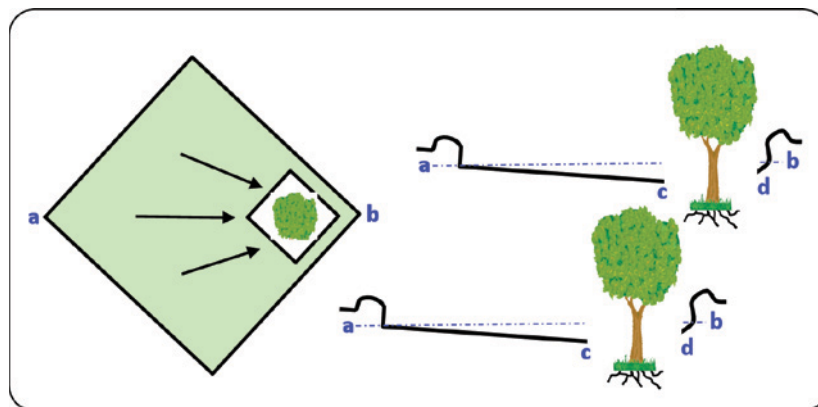
Vista del tamaño de la microcuenca para cultivos individuales calculada mediante la fórmula de Anaya et al. (1976). Chapingo, México



En el caso de la topografía irregular, para evitar el movimiento excesivo de tierra dentro de la microcuenca, se construyen en ella surcos colectores, cuya función es almacenar el agua en la zona de raíces.

Figura 2.41.

Microcuenca vista en planta y un corte seccional



Las flechas indican la dirección del escurrimiento. La sección c-d muestra el área de raíces y debe corresponder a la parte más baja de la micro- cuenco. La distancia a-b es variable y dependerá del frutal, de la precipitación y del coeficiente de escurrimiento.

Al quedar constituido un huerto bajo este sistema, se debe tomar en consideración qué algunas veces se presentan lluvias de alta intensidad, las cuales podrían causar problemas de inundaciones y llegar a romper los bordos, para ello se debe adaptar

la superficie del bordo inferior, de tal manera que ésta funcione como un vertedor de demasías. El vertedor se recubre con pasto, con piedra o con cualquier otro material. En la parte más baja del huerto se debe construir un canal que las conduzca a un almacenamiento. Además, a este almacenamiento se le puede adaptar un sistema de bombeo, para riego suplementario a los frutales en tiempo de sequía.

Para huertos en terrenos inclinados, el principio de las microcuencas puede adaptarse también a los sistemas de zanja y bordo y de terrazas.

Contreadoras ¹⁾

Una forma eficiente de retener el agua de lluvia y conservar la humedad del suelo es por medio de una práctica agrícola llamada contreo. Esta técnica involucra la construcción mecánica de bordos, contras o diques de suelo transversales a lo largo de los surcos y a intervalos regulares, convirtiendo al terreno en una serie de microrepresas, microcuencas o pequeñas presas entre las hileras del cultivo (Figura 2.42).

Figura 2.42.

- a) Contreadora para retener el agua de lluvia y
- b) Producción de frijol en un terreno donde se utilizó la contreadora



¹⁾ Tomado de: **EQUIPOS DE CONTREO Y METODOS DE APLICACIÓN**; Hipólito Ortiz Laurel hlaurel@colpos.mx, Dietmar Rössel edietmar@colpos.mx, Colegio de Postgraduados Campus San Luis Potosi



Esta práctica agronómica permite reducir la erosión hídrica y mejorar el régimen de la humedad del suelo en la agricultura de temporal.

Labranza de conservación

La labranza mecánica tradicional está contribuyendo a la degradación de suelos, sobre todo en los países tropicales y subtropicales, por lo que una opción para evitarlo es el empleo de la labranza de conservación, que devuelve fertilidad a la tierra, abate costos de producción al incrementar rendimientos, conservar agua y reducir problemas de plagas y enfermedades.

En México la labranza de conservación es una necesidad tecnológica, ya que más de 60 por ciento de nuestro territorio sufre diversos grados de desertificación que van de moderado a severo. Uno de los mayores retos se refiere a la protección y manejo en forma sostenible de los recursos agua-suelo-planta bajo condiciones de temporal, sistema de producción que presenta una creciente degradación en su productividad, lo cual pone en peligro la seguridad y la soberanía alimentarias.

El estudio La labranza de conservación en México y apoyos de FIRA para su adopción, define a este modo de cultivo como "un sistema de producción que consiste en el uso y manejo de los residuos de la cosecha anterior de tal forma que cubra al menos 30 por ciento de la superficie del suelo (mantillo), con la menor remoción posible del suelo" (Figura 2.43).

Aumento de la Oferta Hídrica

La labranza de conservación forma parte de la agricultura conservacionista y se caracteriza por lo siguiente:

- Mejoramiento paulatino de las condiciones físicas, químicas y biológicas, lo cual índice a una productividad sostenible.
- Controla la erosión del suelo con un mínimo de laboreo y la cobertura de residuos orgánicos sobre la superficie del suelo permite aumentar la eficiencia en el uso del agua.
- Aumenta los rendimientos unitarios y reduce los costos de producción de diversos cultivos, lo cual repercute favorablemente en la economía de los productores, en el bienestar social y en el mejoramiento del entorno ecológico.
- Los costos de producción al utilizar la labranza de conservación disminuyen hasta en un 40% y la producción se incrementa de un 20 a un 40%, lo cual genera un incremento en el ingreso de hasta 4 veces, comparado con lo que se obtiene al utilizar la labranza tradicional.
- El uso de la labranza de conservación y de sembradoras especializadas conlleva al desarrollo de una agricultura más sustentable y ejerce un fuerte impacto en términos de conservación de los recursos agua y suelo

Figura 2.43
Labranza de conservación



2.9 CONCLUSIONES SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA PARA MEJORAR LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

Es posible mejorar el microclima y el microambiente de las plantas bajo condiciones de temporal, lo cual permite aumentar los rendimientos unitarios de granos básicos, forrajes y plantas en general.

La labranza de conservación permite reducir los costos de producción, aumentar los rendimientos unitarios y producir más con menos agua, menos energía y menos tierra, lo cual resulta benéfico y económico para la sociedad y el estado.

2.10 RECOMENDACIONES

Contar con fábricas de maquinaria e implementos de labranza de conservación adaptados a las condiciones sociales, culturales, económicas y ecológicas de las diversas regiones agrícolas; además, deberán producirse herbicidas e insecticidas a bajo costo y amigables con el ambiente.

Reforzar los programas de capacitación y los clubes de labranza de conservación para lograr una real transferencia de tecnología, una mejor organización de los productores y la participación coordinada de las diversas instituciones involucradas.

Implementar programas regionales de labranza de conservación que sean detonadores para la producción de cultivos básicos y forrajes, que consideren al agua y la materia orgánica como ingredientes básicos para mejorar la productividad agrícola.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anaya, G.M., J. Tovar, S. y A. Macías L., 1976. Métodos de captación de Lluvia para Zona Agrícolas con Temporal Deficiente. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Anaya, G.M., 1977. Optimización del aprovechamiento del agua de lluvia para la producción agrícola bajo condiciones de temporal deficiente. Chapingo, MX. Hernández, E. ed. 45p.
- Anaya, G.M. et ál., 1977. Manual de Conservación del Suelo y del Agua. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Anaya, M., 2000. Microcaptación, cultivos anuales y perennes, México. Colegio de Postgraduados. Instituto de Recursos Naturales. Montecillo, MX.19p.
- Anaya, G-R. I., 2001. Escasez de agua en América Latina y el Medio Oriente: Estudios de caso, problemas y soluciones. Tesis de Licenciatura. Universidad de las Américas-Puebla. 148 pp.
- Anaya, G.M., y J.M. de Luna E., 2002. Evaluación del programa especial de labranza de conservación en el estado de Puebla. pp 56
- Anaya G. M., 2005. Sistemas de Captación y Aprovechamiento del Agua de Lluvia en poblaciones marginadas, 1er. Simposio Internacional de Forrajes Tropicales en la Producción Animal, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, 19 al 22 de octubre.
- Anaya G.M. y Martínez J.J., 2007. Sistemas de Captación y Aprovechamiento del Agua de Lluvia para Uso Doméstico y Consumo Humano en América Latina y el Caribe. CIDECALLI. CP. México
- Anaya G. M. y Juan M. J., 2007. Manual "Sistemas de Captación y Aprovechamiento del Agua de Lluvia para Uso Doméstico y Consumo Humano En América Latina y El Caribe". Colegio de Postgraduados, Centro Internacional de Demostración y Capacitación en Aprovechamiento del Agua de Lluvia. Montecillo, México. pp.152.
- CONAFOR. 2006. Programa nacional de acción contra la degradación de Las tierras (desertificación) y mitigación de los efectos de la sequía 2007-2030. pp. 245.

- Evaluación y seguimiento del impacto ambiental en proyectos de inversión para el desarrollo agrícola y rural: una aproximación al tema. San José, C.R., IICA, 272 p.
- Gleasón E.J .A. 2005. Manual de aprovechamiento de aguas pluviales en centros urbanos. Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño. Guadalajara, Jalisco, México.
- Jiménez, F. A. M. 2006. Agua para el desarrollo, más agua siempre para todos. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México. pp. 406.
- Juan M. J. 2006. Captación y Purificación de Agua de Lluvia para Consumo Humano. Colegio de Postgraduados, Hidrociencias, Montecillo, Texcoco, México.
- Martínez, S.F. y Gutiérrez C.N. 1995. Máquinas hidráulicas. Departamento de irrigación. Chapingo, México.
- Quispe Limaylla, Aníbal. 2006. Captación de agua de lluvia para la agricultura de traspatio, una experiencia que se extiende en Tlaxcala. En: XII Reunión Nacional y II de América y El Caribe sobre Sistemas de Captación y Aprovechamiento del Agua de Lluvia. Colegio de Postgraduados *campus Montecillo*, México. 12 p. Manzo, F. Apuntes de curso "Procesos de Adopción de Tecnologías". 2005. Colegio de Postgraduados *campus Montecillo*, Texcoco.

CAPITULO III

REUSO DE AGUA

Autor: Ing. Civil, M.Sc. Manuel Cerda Gaete

3.1 GENERALIDADES

En los países desarrollados se hace cada vez más común el uso múltiple de la misma agua, esto es el reuso del agua, como modelo de eficiencia económica y ambiental. Su utilización se está expandiendo con modalidades propias en muchos países menos desarrollados que comienzan a experimentar lo que se llama el estrés hídrico, con disponibilidades per cápita anual por debajo de los 1700 m³.

En la medida que la disponibilidad de agua es menor, se hace más acuciante la necesidad de conseguir nuevas fuentes de agua ya sea que existan en el medio natural o re-usando el agua ya usada, con aplicación de tecnología. Una disponibilidad de menos de 1000 m³ per cápita al año puede ser clasificada como de escasez hídrica crónica. La etapa de estrés hídrico es previa a la etapa de escasez hídrica crónica y a esta puede seguir una de estrés absoluto cuando se alcanza los 500 m³ per cápita al año, siendo 100 m³ per cápita al año el nivel mínimo de supervivencia para uso doméstico y comercial. Ver Cuadro 3.1.

El reuso del agua es una alternativa para enfrentar la creciente escasez de este recurso y la contaminación ambiental excesiva, en los términos que se tratan más adelante.

El desarrollo económico de una región implica la necesidad de disponer de recursos hídricos adicionales para poder cubrir las necesidades de las nuevas actividades industriales o agrícolas, y también para abastecer la demanda correspondiente a las actividades domésticas, a las del turismo y las de ocio.

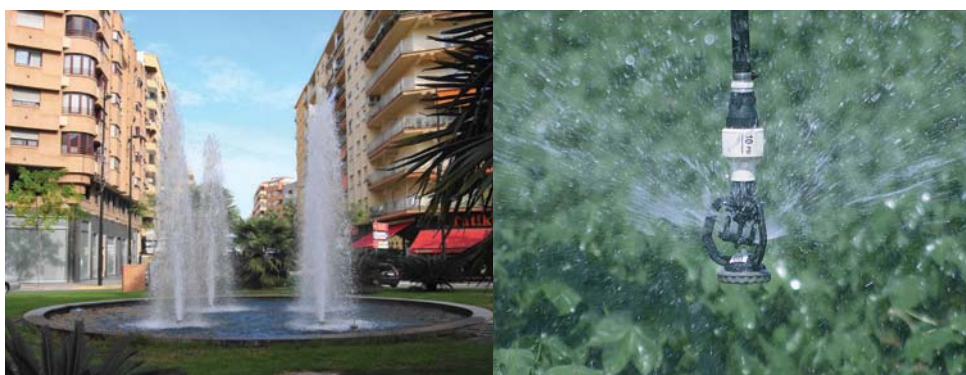
Cuadro 3.1
Límites de disponibilidad de recurso de agua renovable

| Disponibilidad M ³ /persona/año | Condición Hídrica del País |
|---|---|
| 1,700 | A este nivel, muy probablemente los países comienzan a tener estrés hídrico que impide el desarrollo económico y lesiona la salud humana. |
| 1,000 | Aparece la escasez crónica de agua. |
| 500 | Estrés hídrico absoluto. |
| 100 | Mínimo nivel de subsistencia para uso doméstico y comercial. |

Por otra parte, el desarrollo económico también tiende a generar un aumento de población, lo que resulta en definitiva en un incremento aún mayor de la demanda de agua, tanto a partir de los usos ya existentes como de nuevos usos, por ejemplo, para riego no agrícola, como es el caso de áreas destinadas a ciertas prácticas deportivas, la jardinería, fuentes y paisajes en parques urbanos y otras áreas públicas.

Ciertamente el incremento de la demanda propicia una mayor generación de aguas residuales, a las que se les debe dar tratamiento antes de retornarla al ambiente. Esta dinámica socio-económica y ambiental hace cada vez más factible un sistema de reuso del agua como medio de incremento de este recurso.

Figura 3.1.
Fuente de agua ornamental y
área de riego por aspersión



A nivel mundial, el costo de producir un m³ de agua potable crece continuamente por lo que el aprovechamiento de esa misma agua, para usos que tienen menos requerimientos de calidad que el uso humano doméstico, se vuelve más atractiva en términos de la rentabilidad y más favorable desde el punto de vista de su impacto en el medioambiente.

El reuso de agua como sistema de aprovechamiento hídrico para superar la escasez de agua dulce fresca y de mejoramiento ambiental, comenzó en los Estados Unidos en la época un poco posterior a 1920, con aplicaciones para uso agrícola primeramente y después para uso urbano. En ese país también surgió la primera normativa de reuso de agua.

Actualmente el reuso de agua se ha ampliado a muchos países del mundo que, en base a una operación de reciclaje, han logrado un elemento de desarrollo económico, social y ambiental estratégico y efectivo. Además de estados Unidos países como Israel, España y Australia llevan la delantera en el desarrollo de sistemas de reuso de agua.

El reciclaje de aguas servidas resulta más económico que la desalinización con menos gasto de energía. En relación con el tratamiento del agua dulce fresca el tratamiento de aguas servidas tiene en la mayoría de los casos un costo de entre 30 y 50 % menos, debido a los altos costos de la captación de agua fresca.

El costo del agua fresca depende en gran parte de los costos de la gran infraestructura necesaria para su captación, su conducción a largas distancias, su almacenamiento y tratamiento. El costo del agua fresca se eleva grandemente con la construcción de las presas necesarias para la captación y el almacenamiento en los embalses, y también con el mantenimiento y conservación de la cuenca aportante a la presa.

Cuando usamos agua reciclada para la agricultura estamos dando mayor oportunidad al uso consuntivo y a la evaporación de esas aguas ya usadas, con lo cual estamos limpiando el ambiente además de producir alimentos, y generar empleos fuera de los centros urbanos.



Muchos otros factores se agregan a la escasez de agua dulce disponible en el mundo, como son la contaminación de los cuerpos de agua superficial y subterránea, también influye mucho la distribución desigual de los recursos hídricos, los periodos secos prolongados de muchas regiones del mundo, y sobre todo los drásticos cambios que tenemos en el clima global. Todas estas limitantes han forzado a los organismos in-

ternacionales del agua a fomentar las investigaciones sobre nuevas e innovadoras fuentes de abastecimiento de agua, como es la alternativa del reuso del agua.

En general se puede decir que la reutilización del agua es un proceso que se produce en el planeta de manera natural desde que los seres vivos existen sobre la tierra, este proceso está claramente definido en las etapas del ciclo Hidrológico, que implica un reciclaje natural del agua. El agua evapotranspirada por las plantas se acumula en la atmósfera en forma de vapor de agua, desde donde cae posteriormente sobre el suelo en forma de lluvia, para ser utilizada de nuevo por otros seres vivos.

3.2 PROBLEMÁTICA MUNDIAL DE LA ESCASEZ DE AGUA

La escasez de agua a nivel mundial se experimenta bajo las condiciones naturales de irregularidad en la distribución geográfica de las precipitaciones y en la variabilidad de su distribución temporal, con periodos de precipitaciones exiguas y otros con precipitaciones excesivas. Existen otros factores que influyen poderosamente en la actual escasez mundial del agua que se describen a continuación:

a. Crecimiento de la Población

La población mundial se espera que aumente drásticamente durante la próxima década. Habrá una mayor necesidad de agua y un uso cada vez mayor de la misma. En consecuencia, la producción de aguas residuales aumentará inevitablemente.

La población actual del mundo se estima en cerca de 6,8 billones de personas. En términos de población humana las zonas urbanas superaron las zonas rurales hacia el 2005. Se estima que Las zonas urbanas representarán más o menos el 60 por ciento de la población global en el 2020.

Como consecuencia del crecimiento demográfico dramático que ha venido experimentado el mundo, la demanda de agua crece también dramáticamente generando una escasez progresiva. Varios autores coinciden en señalar que el año 2025, dos tercios de la población mundial estará en condiciones de estrés entre moderado y alto, en tanto que la mitad enfrentará serias restricciones en el abastecimiento de agua y para el año 2050 demasiados países, especialmente del Medio Este, alcanzarán el nivel mínimo de supervivencia de 100 m³/per cápita/año.

b. Limitación del Recurso Agua

Muchas comunidades alrededor del mundo están próximas o ya han alcanzado, los límites de su disponibilidad de suministro de agua, según la clasificación de los límites de disponibilidad de los recursos renovables de agua potable en el rango

máximo de 1700 m³/per cápita/año y un mínimo de 100 m³/per cápita/año (Cuadro 3.1).

Según las proyecciones, en el 2025, dos tercios de la población mundial puede estar bajo condiciones de moderada a alta de escasez de agua y la mitad de la población podría enfrentar reales limitaciones del suministro del recurso.

c. Cambio Climático

La ocurrencia de periodos de grandes inundaciones y también la de grandes sequías, es relevante en casi todas las regiones del mundo. Las inundaciones y las sequías son fenómenos generadores de desastres que producen impactos importantes en la economía global, regional, y el medio ambiente, y también en la calidad de vida de la población.

Las sequías son producto de la ausencia de lluvias por periodos prolongados de tiempo que afectan las reservas naturales de agua, limitando la disponibilidad para el uso humano, o agropecuario, y afectando la economía en general. En el Caribe la mayor cantidad de lluvia anual es producida por la humedad generada por los huracanes. Estos eventos extremos producen las grandes lluvias en el Caribe, las cuales incrementan los depósitos naturales de agua de la superficie y los depósitos subterráneos.

Durante el último siglo la temperatura del Mar Caribe ha aumentado en 1.5° C. Existen datos que confirman que el número máximo de días consecutivos sin lluvia está disminuyendo y el número de fuertes lluvias va en aumento. Sin embargo, hay una tendencia hacia una disminución general de las precipitaciones, con prolongados períodos de sequía que han ocurrido durante las últimas décadas (CMNUCC 2007a).

Un análisis de los datos desde finales de la década de 1950 hasta el año 2000, ha demostrado que el número de días y noches cálidas en el Caribe está aumentando dramáticamente y los días y las noches muy frescas están disminuyendo, mientras que el rango de temperatura interanual extrema es también decreciente.

El cambio climático afecta los sectores económicos claves en la región, a través cambios en la disponibilidad de los recursos naturales básicos: Menor disponibilidad de agua potable, degradación del ecosistema marino y costero, aumento del nivel del mar, intrusión salina, inundaciones, incremento del número de eventos climáticos extremos tales como tormentas tropicales, intensidad de las precipitaciones y sequías.

Es posible que el cambio climático aumente la escasez de agua debido a los cambios en los patrones de precipitación e intensidad. En particular, se espera que los subtrópicos y latitudes medias, donde habita la mayor parte de las poblaciones más pobres del mundo, estén expuestas a ser considerablemente más secas. La dismi-

nución de las precipitaciones en algunas regiones áridas podría desencadenar una significativa disminución de los niveles freáticos de las aguas subterráneas.

También los cambios globales del clima afectarán la capacidad y la fiabilidad de la infraestructura actual de abastecimiento de agua, debido a las inundaciones, las condiciones meteorológicas extremas, y la elevación del nivel del mar. La mayoría de las plantas de tratamiento de agua existentes y los sistemas de distribución no fueron construidos para soportar el incremento del nivel del mar, y el aumento de la frecuencia de tormentas severas.

d. La Sequía

Es la ausencia de lluvia en periodos prolongados. En la región del Caribe la sequía es el origen de las pérdidas en la agricultura, de muchos cultivos de secano como la caña de azúcar, frutales, y el ganado. La sequía impacta negativamente las disponibilidades de agua tanto superficial como subterránea, afecta directamente los ecosistemas y provoca la extinción de especies vegetales y animales. La sequía se convierte en un obstáculo para el desarrollo, y la calidad de vida. En las islas del Caribe las sequías provocan el incremento de la importación de los alimentos, lo que hace más pesada la carga del desarrollo.

Técnicamente el fenómeno climático de la sequía ha demostrado ser difícil de definir, no existe actualmente una definición específica universalmente aceptada. Las definiciones más comunes se basan en:

Precipitaciones en comparación con la media histórica.

- Efectos en la agricultura: Déficit de humedad del suelo en relación a las necesidades de riego.
- Efectos hidrológicos: deficiencias en el suministro de agua superficial y subterránea.
- Efectos socioeconómicos: la escasez de agua afecta a la salud, la calidad de vida o de la oferta y la demanda de un bien.

Como quiera que usted la defina la sequía implica carencia de agua, lo que dificulta la vida misma. La sequía es un problema para los humanos en cualquiera de sus acepciones.

e. Requerimientos ambientales del agua superficial.

Como principio de conservación ecológica se ha incluido en la legislación de muchos países el deber de no extraer el llamado "caudal ecológico", para que los cauces naturales nunca estén secos y se mantenga la diversidad del ecosistema.



El caudal ambiental se define entonces como el mínimo flujo requerido en los cauces, en cantidad y calidad, para mantener los ecosistemas acuáticos y los componentes ecológicos, procesos y funciones del ecosistema de los que dependen las comunidades humanas. La disponibilidad de agua puede ser afectada por esta bien justificada norma ambiental.

Un aspecto crítico es cómo definir la línea divisoria entre el agua reservada para los ecosistemas y el agua asignable para uso humano, antes de diseñar un sistema de reuso de agua.

Resumiendo, las principales causas para la implementación a nivel mundial del reuso de agua, son:

- i) **El aumento de la demanda** de agua para sostener el crecimiento de la población. Este es la causa más común e importante para las regiones secas y muy húmedas en los países desarrollados, en vías de desarrollo y países en transición;
- ii) **La escasez de agua y las sequías normales** o las creadas por los efectos del cambio climático, en particular en las zonas áridas y semi-áridas, donde el agua recuperada es vital para garantizar las actividades económicas y agrícolas;
- iii) **La protección del medio ambiente** en combinación con las necesidades de gestión de aguas residuales, representan una línea de acción emergente, incluso en zonas con más estrictas normas de descarga de aguas residuales;
- iv) **Factores socio-económicos**, tales como nuevas reglas, problemas de salud, políticas públicas e incentivos económicos son cada vez más importantes para la ejecución de proyectos de reuso de agua. Especialmente el aumento en el costo de agua potable ayudará a promover la aplicación de la reutilización de aguas residuales;
- v) **La protección de la salud pública** es el principal impulsor de los países en desarrollo donde la falta de acceso a los suministros de agua potable, junto con el alto acceso al mercado en las zonas urbanas y peri urbanas, conduce al reuso sin tratamiento en la agricultura. La protección de la salud pública y la mitigación del riesgo ambiental son componentes clave de cualquier programa de reutilización en estas condiciones.

3.3 TECNICAS DE REUSO DE AGUA

Como ya se ha dicho, el tratamiento y reuso del agua es cada vez más aceptado como

un enfoque para la conservación y ampliación del suministro de agua disponible.

De hecho, los proyectos de reuso no potables pueden ayudar a las comunidades frente a los problemas de demanda y suministro sin ningún tipo de riesgos conocidos para la salud.



Es fácil comprender, de lo presentado en el acápite anterior, que el incremento en la escasez de agua y la elaboración de nuevas políticas y reglamentaciones ambientales hayan estimulado un importante desarrollo en los programas de reuso de agua en los últimos 20 años.

Los mejores proyectos de reuso de agua, en términos de viabilidad económica y de aceptación del público, son aquellos en que el agua tratada sustituye al agua potable para uso en riego, restauración ambiental, descarga de inodoros, y usos industriales.

Los principales beneficios del uso de agua tratada en estas situaciones son la conservación de los recursos hídricos y la reducción de la contaminación.

3.3.1 SINOPSIS DE LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO USUALES

Los procesos de tratamiento para reuso pueden ser clasificados como preliminares, primarios, secundarios y avanzados o terciarios en orden creciente del grado de depuración alcanzado. (Figura 3.2)

- **Tratamiento preliminar.** Tiene por objeto la eliminación o separación de los sólidos mayores o flotantes, de los sólidos inorgánicos pesados y de las cantidades excesivas de aceites y grasas. Se utiliza para proteger los equipos de bombeo y facilitar los procesos de tratamiento que siguen al tratamiento preliminar. Nunca debe considerarse suficiente para el posterior reuso del agua.
- **Tratamiento primario.** Debe ser capaz de separar o eliminar la mayoría de los sólidos suspendidos, hasta un 60 %. Consiste en un proceso de sedimentación en estanques dimensionados para tal efecto. Al agregar ciertos químicos se logra eliminar casi todos los sólidos coloidales y los sedimentables, alcanzando hasta el 90% de los sólidos totales. El principio básico principal para lograrlo es la disminución de la velocidad de las aguas servidas hasta valores tan bajos que permita la decantación o sedimentación, en estanques de sedimentación.

El uso de productos químicos obliga al empleo de elementos auxiliares como maquinaria de alimentación de reactivos, mezcladores y floculadores. Se produce entonces un residuo en el fondo, o lodo, que debe ser retirado y dispuesto en áreas de vertido controlado. También puede ser utilizado como fertilizante previo tratamiento.

El agua que sale de un tratamiento primario generalmente no alcanza el grado de depuración requerido para el reuso.

- **Tratamiento secundario.** Se utiliza después del tratamiento primario para la eliminación de sólidos suspendidos o solución que aun se encuentra presente, que no son deseables al tipo de reuso que se aplicará.

Este tratamiento depende principalmente de los organismos aerobios que descomponen los sólidos orgánicos hasta convertirlos en sólidos inorgánicos o en sólidos orgánicos estables.

Se utilizan para ello: filtros con tanques de sedimentación secundaria; tanques de aireación ya sea por contacto o lodos activados de sedimentación simple; filtros de arena intermitente; estanques de estabilización.

En muchos casos de reuso este proceso es suficiente.

- **Tratamiento avanzado o terciario.** Para un determinado reuso del agua, la depuración lograda en un tratamiento secundario puede ser insuficiente. Se utiliza entonces un tratamiento terciario. Se trata de la eliminación de la materia orgánica que no ha sido removida en el tratamiento secundario, tal vez porque no es biodegradable, y las sales inorgánicas disueltas principalmente nitrógeno y fósforo para evitar la eutrofización en los almacenamientos de agua y en los ríos o esteros.

A menudo el tratamiento terciario y el avanzado se utilizan como sinónimos, pero en realidad no son exactamente lo mismo. La fase "avanzado" requiere de un paso adicional para eliminar los contaminantes que aún subsisten, mediante procesos que pueden eliminar más del 99% de los sólidos en suspensión y de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5).

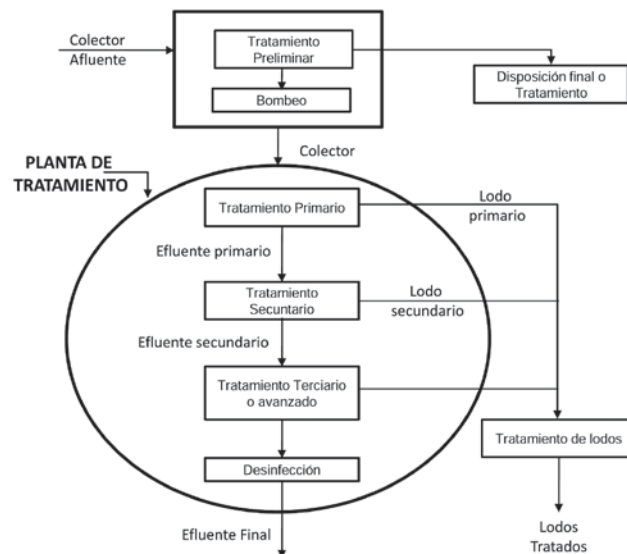
Se utilizan procesos como la osmosis inversa y la electrodiálisis. El tratamiento con ozono, no obstante, es considerado como el método más fiable de desinfección de las aguas cuando se pretende el reuso del agua residual. De hecho, el ozono actúa eficazmente frente a un gran número de micro organismos, con bajas concentraciones y en un gran rango de pH, debido a su gran potencial de oxidación.

En cada fase, primaria, secundaria, terciaria o avanzada, el efluente puede ser derivado para reuso dependiendo de la calidad requerida por el tipo de reuso. En

tal caso, el tratamiento final correspondiente ya sea primario, secundario, terciario o avanzado requerirá de la desinfección final o remoción de elementos patógenos mediante la aplicación de cloro o rayos ultravioleta u ozono. Se persigue aquí la prevención de la descomposición de las aguas negras para el control de olores y protección de las estructuras de la planta, ayuda a la sedimentación y el abatimiento de la demanda bioquímica de oxígeno.

Figura 3.2

Esquema de configuración típica de una planta de tratamiento de aguas servidas que alcanza el tratamiento terciario



3.3.2 TECNOLOGÍAS MÁS COMUNES

Para tratamiento primario

Las principales tecnologías para la remoción de sólidos son la sedimentación y la flotación. Dentro de esta última, la más común es la flotación que emplea aire disuelto (Dissolved Air Flotation, DAF).

Para tratamiento secundario

Las tecnologías más frecuentemente empleadas son los lodos activados, lagunas, sistemas de medio fijo y los lombrifiltros. Los lodos activados pueden ser conven-

cionales, de aireación extendida, de zanjas de oxidación y reactores batch secuenciales.

El lodo activado es una biomasa con algo de sólidos inorgánicos que recircula entre el fondo del sedimentador secundario y el tanque de aeración. Entre las tecnologías de lodos activados la más empleada es la de aireación extendida, seguida de la de lodos activados convencionales, las zanjas de oxidación y los reactores batch secuenciales.

Las lagunas son más simples tecnológicamente, suelen ser más económicas y fáciles de operar. Pueden tener aireación mecánica o no tenerla como las facultativas (en parte aerobias y en parte anaerobias) o de estabilización.

Los sistemas de medio fijo o cultivo fijo se caracterizan por la fijación de microorganismos a un medio sólido, no necesita recirculación de lodos. Los más conocidos son el de biodiscos o sistemas rotatorios y los filtros percoladores o filtros biológicos.

Otra tecnología utilizada como tratamiento secundario es la de "lombrifiltro", donde los residuos son transformados en humus por lombrices.

Para tratamiento terciario o avanzado

Una tecnología de punta es la de membranas. Ha tenido un gran desarrollo en el mundo durante la última década tanto para tratamiento avanzado como para tratamiento secundario. Según el tipo de membrana esta tecnología puede ser:

- **Osmosis inversa (<0,001 micras)**

Para eliminación de iones monovalentes, y compuestos orgánicos de bajo peso molecular (NaCl).

- **Nanofiltración (<0,01 micras)**

Para eliminación de color, iones polivalentes, bacterias y virus.

- **Ultrafiltración (<0,1 micras)**

Para eliminación de sólidos en suspensión, coloides, bacterias y virus.

- **Microfiltración (<1 micra)**

Para eliminación de sólidos en suspensión y coloides.

Ventajas: Seguridad de operación; Calidad máxima del agua tratada; Fiabilidad y estabilidad del proceso.

Desventajas: Mayores costos de explotación comparado con procesos menos exigentes en calidad; Complejidad de operación.

Las membranas se utilizan de diversas formas: internas y externas; en arrollamiento espiral; tubulares; presurizadas y sumergidas. En tratamientos que requieren lograr muy alta calidad del agua se utilizan las membranas en combinación con un birreactor, lo que asegura estabilidad y seguridad incluso ante fuertes variaciones de cargas de contaminantes ya sea por cambios estacionales o vertidos industriales no previstos.

Una investigación realizada por el Programa de Asistencia Ambiental de la Asociación Chilena de Seguridad (ACHS) establece la competitividad entre las tecnologías más usadas, con los siguientes resultados:

- Los lodos activados modalidad aeración extendida son muy usados en localidades pequeñas, a costos relativamente variables, y nunca en localidades de más de 40,000 habitantes.
- Los reactores secuenciales batch son de bajo costo en localidades pequeñas, pero su costo aumenta significativamente para localidades más grandes.
- Las lagunas son una tecnología de bajo costo, y usada en localidades de hasta 3,000 habitantes. Pero también se han usado con éxito en ciudades de hasta 10,000 habitantes.
- Los lombrifiltros son baratos de construir y son usados en localidades de hasta 3,000 habitantes.
- Los lodos activados convencionales son la tecnología más usada en localidades de más de 50,000 habitantes, y la única usada donde hay más de 150,000 habitantes.
- Las zanjas oxidativas son comparativamente baratas en localidades de menos de 1,000 habitantes; es una tecnología competitiva por precio hasta los 10,000 habitantes y no es usada cuando la población supera los 50,000 habitantes.
- En el rango 10,000 a 150,000 habitantes existen varias alternativas que son competitivas en cuanto a costo versus población atendida.

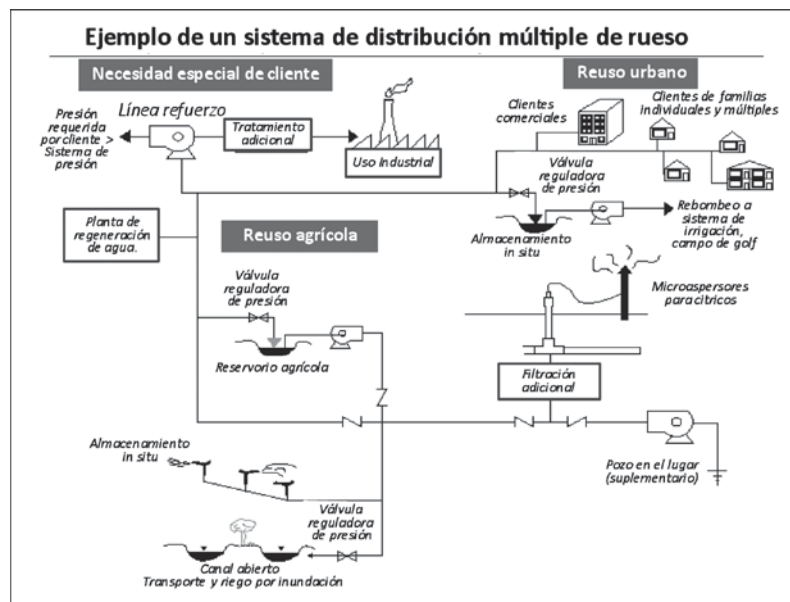
“En términos cuantitativos, la competitividad de las distintas alternativas de tratamiento secundario fue estimada en base al costo por habitante promedio, es decir, dividiendo el costo total de las plantas por el número de habitantes servidos. Estos costos por habitante promedio se consideran sólo válidos en el rango de tamaño en

el cual cada tecnología es usada, y no deben tomarse como valores de referencia para estimar el costo de una planta en situaciones en las que la tecnología considerada no sea de uso habitual". (Barañaño PA, Tapia LA., ACHS, (2004). Tratamiento de las Aguas Servidas: Situación en Chile.)

En la figura no. 3.3 se esquematiza un sistema de distribución múltiple de reuso.

Figura 3.3

Esquema de ejemplo de múltiples aplicaciones y procesos del reuso de agua, en un sistema integral de aprovechamiento hídrico.



Fuente: EPA (2004)

3.4 PRINCIPALES SECTORES DE APLICACIÓN DEL REUSO DEL AGUA

El reuso del agua se puede aplicar a casi todos los propósitos de uso común del agua. Estos pueden agruparse en tipos de reuso como: reuso urbano, reuso industrial, reuso agrícola, reuso ambiental, recarga de acuíferos, también para turismo y deporte. En casos extremos y bajo estrictas normas y controles de calidad el reuso se puede aplicar también al suministro de agua potable en regiones de mucha escasez.

Reuso urbano

Es recomendable usar el agua reciclada para los siguientes propósitos:

- *Riego de áreas urbanas como jardines y parques.*
- *Patios y jardines de escuelas y universidades.*
- *Campos de golf y estadios.*
- *Piscinas públicas y privadas.*
- *Fuentes públicas ornamentales.*
- *Control de incendios en edificios y redes de incendio en general y grifos públicos para ese efecto.*
- *Lavanderías.*
- *Construcción en general.*
- *Baños domésticos y públicos, específicamente estanques de WC.*
- *Lavado de vehículos.*
- *Control de polvo en vías públicas y privadas.*

Las principales prevenciones y cautelas recomendables en el reuso de agua urbana son:

- *Lograr la calidad del agua requerida por el propósito correspondiente.*
- *Cuidar que la operación del agua reciclada sea apropiada, evitando pérdidas volumétricas y sobrecostos por ineficiencia.*
- *Evitar conexiones con tuberías de agua potable.*

Reuso industrial

Los propósitos para el reuso de agua para industria pueden ser:

- *Enfriamiento de maquinaria.*
- *Alimentación de calderas.*
- *Agua para procesos industriales.*

Las principales prevenciones y cautelas son:

- *Controlar la corrosión, incrustaciones, residuos de origen biológico.*
- *Tener en cuenta la relación entre presión de operación y la calidad del agua. Esta puede alterarse con cambios de presión del agua.*
- *Evaluar el efecto de elementos patógenos en el agua sobre la corrosión, incrustaciones, calentamiento.*

Reuso agrícola

Propósitos del reuso agrícola:

- *Riego gravitacional a cielo abierto o por tuberías, por surcos e inundación.*
- *Riego a presión por aspersión en cualquiera de sus formas.*
- *Riego a presión por goteo.*

Principales prevenciones y cautelas para el reuso agrícola:

- *Evitar aplicaciones con baja eficiencia de riego. Si la eficiencia es baja, el esfuerzo económico debiera orientarse preferentemente a mejorar la eficiencia de aplicación del agua de riego, antes que al reuso.*
- *Programar la aplicación del agua reciclada tomando en cuenta la precipitación efectiva, la evapotranspiración, la percolación y las pérdidas por escorrentía superficial, de modo de utilizar la menor cantidad posible de agua reciclada para satisfacer la demanda.*
- *Prever el aporte e infiltración de agua salina y cloro residual.*
- *Tomar en cuenta la presencia de nutrientes en el agua de reuso y el consecuente ahorro de fertilizantes.*
- *Monitorear la calidad del agua reciclada durante la aplicación y compararla con los requerimientos del cultivo.*

- *Disponer de una red de drenaje efectiva para evitar la contaminación acumulada en el suelo.*

Reuso ambiental

Se pueden identificar propósitos directos del reuso de agua para fines ambientales y propósitos indirectos del reuso ambiental del agua destinada a otros fines:

- *Contribución al caudal ecológico de ríos y esteros (propósito ambiental directo).*
- *Mejoramiento de las condiciones medioambientales como consecuencia del aumento de la disponibilidad de agua por reciclaje con menor nivel de contaminación (indirecto).*
- *Contribución a la recreación y paisajismo (puede ser directo o indirecto).*
- *Riego de humedales naturales y artificiales con agua tratada a nivel primario, sólo suficiente para lograr que los humedales mismos mejoren la depuración de las aguas (directo).*

Previsiones y cautelas para el reuso ambiental de agua:

- *Monitorear las aguas resultantes de los humedales para controlar la contaminación acumulada debido a la evaporación del agua de reuso suministrada. Es importante que el humedal reciba también agua de lluvia u otro afluente natural con agua fresca que mejore en forma dinámica la calidad de agua almacenada.*

Reuso para recarga de acuíferos

El uso de agua reciclada para la recarga de acuíferos puede tener los siguientes propósitos:

- *Establecimiento de barreras contra la intrusión salina en los acuíferos costeros.*
- *Mejoramiento de la calidad del agua reciclada al filtrar y mezclarse con el acuífero, para reuso futuro.*
- *Mejoramiento de la calidad de agua de un acuífero contaminado.*
- *Aumento del volumen de agua en un acuífero, elevando el nivel freático o el nivel piezométrico para acuíferos libres y confinados respectivamente.*

- *Prevención de hundimiento del terreno por descenso significativo del nivel de saturación.*

Previsiones y cautelas para el reuso de agua de recarga de acuíferos:

- *Tener en cuenta que es necesario disponer de áreas extensas de terreno superficial para la infiltración hacia los acuíferos, cuando la recarga se hace gravitacionalmente desde la superficie del terreno.*
- *Comparar métodos alternativos de recarga. Por lo general, se tienen altos costos de métodos de recarga como la infiltración a presión o inyección.*
- *Evitar la contaminación del acuífero por un tratamiento previo inadecuado.*
- *El agua infiltrada en un acuífero no siempre es recuperable en un cien por ciento debido al movimiento del agua en el subsuelo y la extracción incontralada desde el acuífero.*
- *El área requerida de almacenamiento subterráneo es mayor que un depósito superficial para el mismo volumen de agua utilizable. Sin embargo, el acuífero o almacenamiento subterráneo tiene la ventaja de que no compite con los diferentes usos superficiales de la tierra.*
- *Las incertidumbres hidrogeológicas pueden reducir la efectividad de suplir el agua de origen superficial demandada.*
- *Una inadecuada institucionalidad del recurso hídrico unida a leyes de agua con muchas limitaciones podrían generar problemas legales, especialmente en cuanto a la manera como deben ejercerse los derechos de agua constituidos tanto en el acuífero como en las aguas de recarga.*

Reuso en agua potable

Si bien el propósito es aumentar la cantidad de agua suministrada al consumo humano, se puede distinguir dos modalidades:

- *Modo indirecto. Consiste en el aumento del agua disponible mediante la mezcla agua cruda con aguas residuales tratadas, para recibir un mayor tratamiento adicional, antes de entrar en el sistema de distribución.*
- *Modo directo. Consiste en la introducción directa de las aguas residuales tratadas al sistema de distribución sin previo almacenamiento.*

Prevencciones y cautelas para el reuso de agua para consumo humano:

- Se requiere un tratamiento avanzado que garantice la calidad exigible en agua potable, estable y seguro, incluso ante variaciones sustantivas del nivel de contaminación de las aguas.
- Ambas modalidades, directo e indirecto, son menos confiables que el uso de una fuente de agua fresca natural que, con el tratamiento adecuado, se convierta en un suministro de buena calidad para consumo humano.

3.5 ELEMENTOS DE PLANIFICACION DEL REUSO DE AGUA TRATADA.

En una situación de grave escasez de agua como la que ocurre en muchas partes del mundo, en que la falta del recurso limita seriamente el desarrollo y acceso a una calidad de vida razonablemente buena, el reuso del agua puede ser una solución. Sin embargo, la primera aproximación a la situación debe hacerse con la amplitud suficiente para encontrar la mejor solución al problema de escasez, en que el reuso del agua es sólo una alternativa entre varias otras.

Es ineludible entonces la realización de un estudio de factibilidad que considere el diagnóstico preciso de la situación actual y sus proyecciones, la identificación de alternativas de solución y su análisis y evaluación desde el punto de vista técnico, económico, social, cultural, ambiental y político.

Cada alternativa se debe plantear en un nivel de desarrollo que puede llamarse "de perfil", esto es que alcance a la definición de las magnitudes de las obras de ingeniería técnicamente viables, los procesos tecnológicos y la operación en el nivel suficiente para estimar los costos de inversión, operación y mantenimiento y los ingresos obtenibles, sin llegar al proyecto definitivo caracterizado por la ingeniería de detalle de obras para ser construidas y la operación y mantenimiento detallados para la puesta en marcha.

Variadas disciplinas científico tecnológicas y culturales intervienen en esta fase, integrándose de manera coherente detrás del común objetivo de lograr un conjunto de indicadores de valor económico, social y ambiental; aplicarlos para comparar las diferentes alternativas y finalmente establecer juicios de valor sobre ellas que permita a quienes tienen la responsabilidad de decidir, hacerlo con propiedad y de manera acertada.

Se requiere experticia en las áreas de hidrología, hidráulica, hidrogeología, suelos, mecánica, química, bioquímica, agronomía, ecología, economía, derecho y otras ligadas al propósito de uso de agua a suplir. Un factor clave para lograr un proyecto exitoso es el Director del Proyecto, quien debe reunir capacidades de liderazgo de

equipos humanos interdisciplinarios junto con poseer experiencia y sabiduría.

El estudio de un proyecto de reuso del agua puede hacerse en el marco de factibilidad planteado en los párrafos anteriores o como proyecto definitivo después de la decisión tomada en base al estudio de factibilidad. Ya sea en uno u otro caso es recomendable cumplir con ciertas etapas fundamentales.

Un esquema de estudio etapa por etapa se podría ordenarse de la forma que se indica a continuación.

Etapas de un estudio de reuso de agua.

- 1) **Identificación del objetivo.** El principal objetivo del proyecto no es el reciclado del agua, sino la definición de un medio tecnológico que proporcione un aumento de la disponibilidad de agua, con calidad adecuada para el uso nuevo requerido. La nueva tecnología de aumento de agua puede en si requerir tratamiento de agua intrínsecamente, pero no es su objetivo principal y predeterminado.
- 2) **Identificación y caracterización de la demanda potencial de aguas tratadas.** Es recomendable incluir una evaluación de la disposición de los clientes a aceptar y pagar por el reuso del agua.
- 3) **Identificación y caracterización de fuentes existentes de aguas tratadas.** Se estudia la fuente o las fuentes de agua disponibles, incluyendo estudios de volúmenes, historial de disponibilidad anual, calidad de agua, historial de las fuentes de contaminación.
- 4) **Determinación de los requisitos de depuración** para la producción de agua tratada segura y confiable según las aplicaciones destinadas. La calidad del agua reciclada a obtenerse con el proyecto debe coincidir con las necesidades de calidad de agua previstas.
- 5) **Definición de las instalaciones de almacenamiento** necesarias para equilibrar las fluctuaciones estacionales de la oferta con las fluctuaciones de la demanda.
- 6) **Definición de las instalaciones suplementarias requeridas para operar** un sistema de reuso de agua: transporte y red operativa en las instalaciones de almacenamiento, suministro alternativo e instalaciones alternativas de disposición.

- 7) **Evaluación del impacto ambiental** que pueda resultar de la implementación del reuso de agua.
- 8) **Identificación de capacidades técnicas y de gestión** necesarias para la operación y mantenimiento sostenible del sistema propuesto de reuso de agua.
- 9) **Determinación de los costos** para los usuarios en el área, anuales y proyectados, de agua fresca y de agua tratada para el reuso, así como también el costo de inversión.
- 10) **Determinación de los ingresos monetarios** del proyecto.

3.6 CRITERIOS PARA EL ANÁLISIS FINANCIERO Y EVALUACIÓN ECONÓMICA

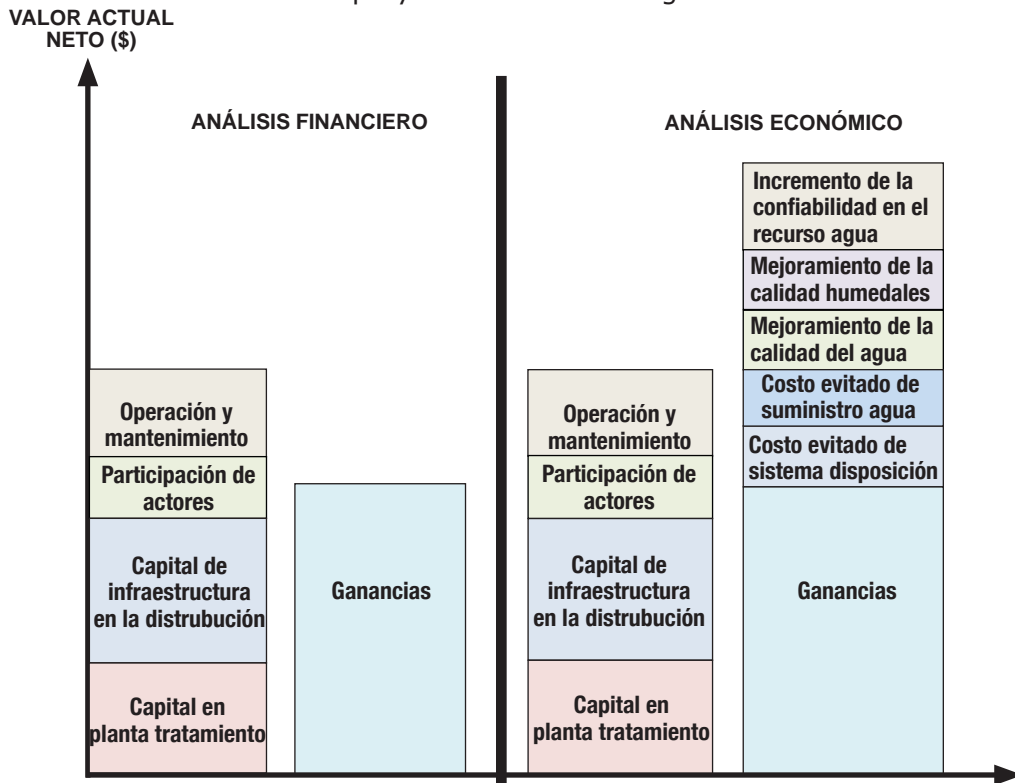
Análisis financiero y evaluación económica

Análisis financiero: Comparación de los costos y los ingresos del flujo monetario de la inversión. Si los ingresos superan los costos durante el intervalo de tiempo de análisis, el proyecto será factible.

Evaluación económica: Incluye los valores no monetarios del proyecto de reuso del agua. Incorpora costos y beneficios financieros, medioambientales y sociales.

En la figura 3.4 se aprecia la diferencia entre un enfoque financiero y uno económico en un proyecto de reuso de agua.

Figura 3.4
Esquema de comparación entre análisis financiero y económico para un proyecto de reuso de agua



Métodos de evaluación económica

Análisis Beneficio-Costo: Usado en evaluación económica formal variando los beneficios y costos financieros, medioambientales y sociales. Este método provee: i) una manera de evaluación de la equidad social. ii) satisfacción del interés público en el mejoramiento del bienestar. iii) maximización de los beneficios sociales netos.

Análisis Costo-Eficacia: Usado cuando todos los beneficios alternativos son los mismos y los valores monetarios son difíciles de determinar. Es menos comprensible y menos utilizado.

Pasos para el Análisis Beneficio-Costo:

- 1) *Desarrollar una perspectiva justificada*
- 2) *Establecer una línea base alternativa*
- 3) *Identificar alternativas al proyecto propuesto*

- 4) *Identificar beneficios y costos para las alternativas del proyecto propuesto*
- 5) *Analizar los beneficios y los costos en términos cuantitativos y cualitativos*
- 6) *Seleccionar los indicadores de comparación entre alternativas*
- 7) *Seleccionar una tasa de descuento*
- 8) *Calcular los indicadores de evaluación por proyecto y comparar*
- 9) *Realizar análisis de sensibilidad*
- 10) *Analizar resultados y emitir juicios de valor respecto de la rentabilidad económico-social de las alternativas.*

Ciertamente un evaluador experimentado puede generar sesgos en el resultado de una evaluación económica que privilegien una alternativa vinculada con determinados intereses. La experiencia indica que una evaluación económica sólo resulta validada, y por lo tanto mejor aceptada, más solvente y comprometedora, cuando hay participación en el proceso de evaluación de los actores involucrados en el proceso de evaluación. Estos son los usuarios privados y públicos del agua reciclada, los tenedores de derechos de agua en el área del proyecto, las entidades públicas reguladoras, las organizaciones públicas y privadas ligadas al medioambiente.

El involucramiento de los interesados en el proceso de evaluación es indicado en todos los pasos arriba indicados, excepto en el señalado con el número 6) "Seleccionar los indicadores de comparación entre alternativas". La selección de indicadores y criterios de evaluación aquí implícitos, debe hacerse por expertos independientes de los intereses de los usuarios. Es importante enfatizar que tales indicadores y criterios, todos ellos, se definan en el orden indicado, no después, y que se apliquen a todas las alternativas definidas, generando así una base de comparación válida.

Indicadores de evaluación

Valor Neto. En general el valor neto es: $VN = \Sigma B - \Sigma C$, (ec. 3.1)

siendo

B= Beneficios

C= Costos

Para una tasa de descuento seleccionada (i), los indicadores seleccionados para ser aplicados a todas las alternativas, esto es la línea base, el proyecto de reuso

de agua propuesto y las alternativas del proyecto, se deben ajustar o actualizar a una fecha común de referencia, generalmente la fecha actual. Todos los valores monetarios gastados o percibidos a lo largo de la vida económica del proyecto, u horizonte de evaluación, se refieren así a la misma fecha.

El valor actual es $PV = FV (1+i)^{-t}$ (ec. 3.2)

En que:

PV= Valor Presente de beneficios o costos

FV= Valor Futuro de beneficios o costos

i= Tasa de Descuento anual

t= Número de Años

Valor Actual Neto (VAN) ó valor presente neto (NPV)

El valor actual neto (VAN) de cada una de las bases de referencia del proyecto propuesto y las alternativas del mismo es la sumatoria de los valores actuales de los beneficios en un cierto plazo, menos la suma de los valores actuales de gastos en un plazo, para una efectiva comparación.

$$NPV = \frac{\left(\sum_{j=1}^n B_j - \sum_{k=1}^n C_k \right)}{(1 + i)^t} \text{ (ec. 3.3)}$$

Donde:

B = Beneficios expresados en unidades monetarias

C = Costos expresados en unidades monetarias

i = tasa de descuento anual

j = año en que se percibe el beneficio B_j

k = año en que se percibe el costo C_k

n = número total de años del horizonte de evaluación

i = tasa de descuento anual en tanto por uno

t = cantidad de años del proyecto u horizonte de evaluación

En esta fórmula, los costos de inversión están incorporados al flujo de costos, ya sea en el primer año o en los dos primeros años o más según la escala del proyecto y magnitud de la inversión.

El NPV (VAN) de la línea base, del proyecto de reuso de agua propuesto, y el de las alternativas del proyecto pueden ser comparadas.

La opción con el mayor NPV es la económicamente más conveniente.

Relación Beneficio Costo

Proporciona una dimensión relativa de la conveniencia de un proyecto. Es la siguiente:

$$\frac{B}{C} = \frac{\sum_{j=1}^n B_j * (1 + i)^t}{\sum_{k=1}^n C_k * (1 + i)^t} \quad \dots\dots\dots (\text{ec. 3.4})$$

Si la relación B/C es mayor que 1, el proyecto es aceptable. Las alternativas del proyecto con el mayor valor de B/C, son económicamente más aceptables.

Este indicador (B/C) tiene varias desventajas:

- El orden de magnitud de los beneficios y los costos se pierden, limitando la estimación de la rentabilidad a una forma relativa.
- En algunos casos la conveniencia económica, puede ser poco clara.
- La inestabilidad de la relación beneficio-costos puede conducir a la falta de credibilidad de los análisis.

Análisis de Sensibilidad

En cada etapa del proceso de evaluación el analista deberá hacer estimaciones respecto de parámetros que pueden ser muy sensibles con relación a los indicadores, por ejemplo el VAN. Los parámetros más incidentes son unos costos asumidos en base a definiciones a nivel de perfil con un desarrollo más bien escaso, unos beneficios altamente dependientes de la política de tarifas del agua de reuso o del mercado y una tasa de descuento que debiera reflejar el costo de oportunidad del inversionista que es un valor poco definido, en gran parte determinado por el propio inversionista sobre bases algo subjetivas.

Los valores asumidos de estos parámetros, entonces, necesariamente presentan incertidumbre. Los costos, los beneficios y la tasa de descuento asumidos para el proyecto de reuso de agua, para la línea base definida y las alternativas al proyecto tienen incertidumbres.

En consecuencia, el dueño del proyecto de reuso de agua, ya sea el Estado o una sociedad privada, enfrentará el riesgo de no cumplir los beneficios netos económicos y sociales esperados. De allí que es conveniente abordar el problema aplicando métodos que tomen en cuenta esta característica de los proyectos, como la teoría

de decisiones, con o sin análisis probabilístico, ó bien mediante análisis de sensibilidad.

Siendo la teoría de decisiones compleja y extensa, que escapa de las posibilidades de ser incluida en esta presentación, mientras el análisis de sensibilidad resulta más simple de comprender y fácil de relacionar con la metodología de evaluación económica, se presenta a continuación con mayor detalle.

Métodos comunes de Análisis de Sensibilidad

En general se utilizan dos métodos básicos:

- 1) El análisis Variable por variable, y
- 2) El análisis de escenarios

Método 1 Variable por variable:

Se analiza el efecto de cada variable sobre los indicadores de evaluación, variable por variable de forma independiente, modificando el valor de una variable a la vez.

Para cada variable definida se selecciona un valor optimista, uno más probable y otro pesimista, y luego se procede a calcular el valor actual neto (NPV o VAN) y la relación beneficio/costo (B/C) para los casos optimista, más probable y pesimista.

Método 2 análisis de escenarios:

Se asume que algunas variables varían conjuntamente, formando un escenario. Se toman en cuenta solamente variables y escenarios claves a objeto de evitar en exceso de cálculos y análisis.

Por ejemplo, dos variables vinculadas de un proyecto de reuso de agua podrían ser el costo de capital de la planta de tratamiento y el costo evitado por capacidad de transporte de agua fresca adicional y de aguas servidas derivadas que van al sistema de alcantarillado. Por cada escenario se seleccionan el caso optimista, más probable y pesimista y se calculan los indicadores de evaluación económica.

Los actores interesados o relacionados con el proyecto podrían ser de ayuda en la definición de escenarios.

Ambos métodos de análisis de sensibilidad indican la estabilidad, robustez y el rango de los indicadores de evaluación resultantes para cada alternativa, suficiente para orientar a quienes tomarán las decisiones hacia la alternativa que maximiza el valor actual neto para la zona de estudio o región.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Asano, Takashi, Burton, Franklin L. Water Reuse, Issues, Technologies and Applications. 2006, METCALF and EDDY, INC, and AECOM.
- Cerda Gaete, Manuel: [Powerpoint presentación].Curso- Taller III Aumento de oferta Hídrica. Tema: Reúso de Agua. Presentado por el Centro Regional de Investigación para la Gestión Sostenible de los Recursos Hídricos en los Estados Insulares del Caribe, CEHICA, Auspiciado por el Centro de Zonas Áridas y Semiáridas de América latina y el Caribe, CAZALAC, el Plan Hidrológico Internacional (PHI/LAC) de La UNESCO, y el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, INDRHI.2009.
- Organización Mundial de la Salud, OMS. Directrices Sobre el Reuso de Aguas Residuales en Agricultura y Acuicultura. Serie de Servicios Técnicos 778. Ginebra. 1989.
- U.S. Agency for International Development (U.S. AID), Washington D.C. Guidelines for Water Reuse. 2004.

CAPITULO IV

RECARGA CONTROLADA DE ACUIFEROS

Autor: M.Sc. Carlos Gutiérrez Ojeda

4.1 GENERALIDADES

Una de las mayores preocupaciones de los tomadores de decisiones en las próximas décadas es el contar con suficiente capacidad de almacenamiento de agua en un mundo con creciente demanda de agua y bajo la amenaza de un cambio climático inminente. Se espera que en los próximos 5 -10 años se requerirá multiplicar la capacidad instalada actual para contar con suficiente agua durante los periodos de sequía (Tuinhof A. and Heederik J.P., 2002).

El almacenamiento del agua superficial en presas grandes o pequeñas constituye la mayor parte de la capacidad de almacenamiento global instalada. Sin embargo, el reconocimiento de sus impactos sociales y al medio ambiente, la creciente preocupación de la seguridad de las presas y su creciente sedimentación han mostrado claramente las limitaciones de las grandes presas. En contraste al gran crecimiento del incremento en la capacidad de almacenamiento de las presas en los últimos 50 años, no ha habido un incremento significativo en el almacenamiento controlado de agua en los acuíferos. Además, no se conoce bien cuál es el potencial de almacenamiento de agua en el subsuelo.

El crecimiento de la población en la última mitad del siglo XX trajo consigo un gran incremento en la demanda de agua dulce, en muchos casos provenientes de acuíferos ubicados en regiones costeras o deltaicas. Sin embargo, el uso no sustentable del agua subterránea ha ocasionado graves problemas como el abatimiento de los niveles freáticos o piezométricos, la intrusión del agua de mar y la subsidencia del terreno entre otros. El cambio climático por su parte solo agravará estos problemas al elevar el nivel medio del mar.

La recarga controlada de los acuíferos representa una medida de mitigación a estos problemas. La recarga controlada y el almacenamiento del agua en los acuíferos y la recuperación del agua en tiempos de escasez, debe ser considerada como una seria alternativa a la construcción de grandes presas para preservar o mantener los niveles de abastecimiento de agua en el futuro.

Las actividades humanas que favorecen la recarga de los acuíferos se agrupan en tres categorías:

1. No intencional – como la infiltración profunda del agua de riego o las fugas de las tuberías de abastecimiento de agua potable y del drenaje.
2. No controlada – incluye a los pozos utilizados para el drenaje del agua de las tormentas, las filtraciones de los tanques sépticos, generalmente utilizados para la disposición de agua no requerida y generalmente son tratamiento previo.
3. Controlada – a través de estructuras como pozos de inyección, embalses de infiltración y galerías para introducir agua a los acuíferos proveniente de la lluvia, tormentas, agua residual tratada, ríos, o agua de otros acuíferos, agua que posteriormente es recuperada para todo tipo de usos.

La recarga controlada de acuíferos o RCA, en inglés “Managed aquifer recharge” o MAR, es frecuentemente la forma más económica de abastecimiento seguro de agua para pueblos y comunidades pequeñas (Gale Ian, 2005).

RCA implica el almacenamiento y el tratamiento intencional de agua dentro de los acuíferos. El término “recarga artificial” también ha sido utilizado para describir estas técnicas, pero la connotación adversa del término “artificial”, en una sociedad donde cada vez es más frecuente la participación pública en la gestión de los recursos hídricos, sugieren que es tiempo de asignarle un nuevo nombre. RCA es intencional, a diferencia de los efectos de la infiltración profunda del agua de riego o las fugas de las tuberías de abastecimiento de agua potable en donde el incremento en la recarga son incidentales.

RCA es una de las herramientas de gestión del agua subterránea; puede ser útil para restablecer la presión en acuíferos sobreexplotados, reducir la intrusión salina o fenómenos de subsidencia en suelos. Por sí sola, no es la solución de los acuíferos sobreexplotados y podría únicamente aumentar los caudales de extracción. Sin embargo, puede tener un importante papel de un conjunto de medidas de control de la extracción y del restablecimiento del balance hídrico subterráneo. Asimismo, RCA puede tener un rol central en la captación del agua de lluvia y su reutilización. Muchas ciudades drenan el agua de tormenta hacia los acuíferos a través de cuencas de infiltración, sumideros o pozos y subsecuentemente reutilizan esta agua para consumo humano o riego.

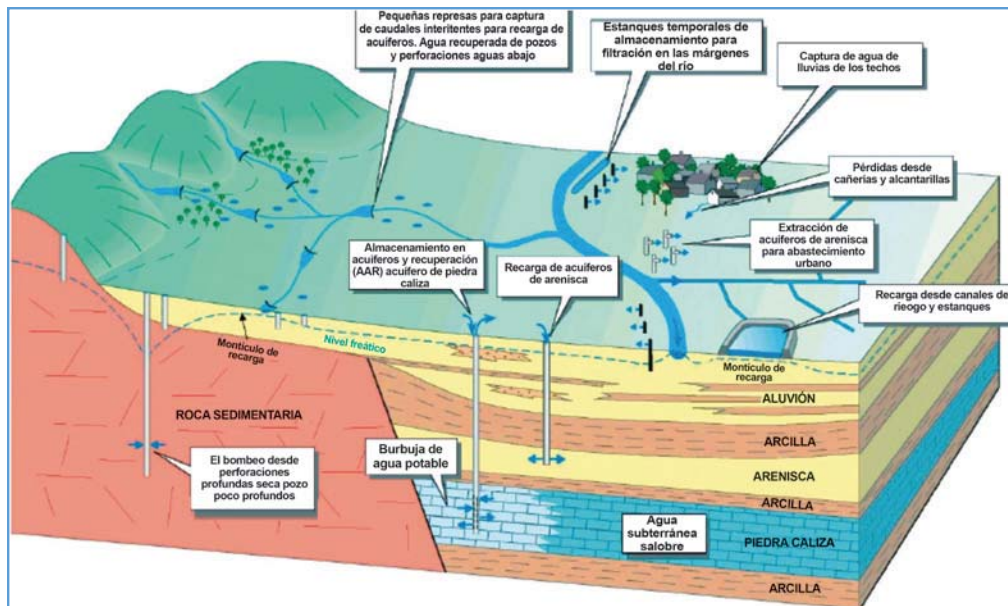
En el presente capítulo se presentan las notas del tema "Recarga Artificial de Acuíferos" del curso- Taller III Aumento de oferta Hídrica, presentado en Santo Domingo, República Dominicana, del 2 al 4 de septiembre del 2009. La mayoría de las notas fueron tomadas y adaptadas de las referencias citadas al final del capítulo, en particular de: (i) Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in semi-arid areas (Gale Ian., 2005) tanto en su versión en inglés como de la versión en español, y (ii) Management of Aquifer Recharge and Subsurface Storage (Tuinhof A., Heederik J.P., 2003).

4.2 DEFINICIÓN DE LA RECARGA CONTROLADA DE ACUÍFEROS

La recarga controlada de acuíferos o RCA se puede definir como el útil y activo proceso mediante el cual se introduce de manera controlada agua a los acuíferos para su posterior recuperación y uso o para el beneficio al medio ambiente. RCA puede proporcionar un almacenamiento efectivo al agua residual tratada y al agua de tormenta reduciendo las pérdidas por evaporación y el transporte con el consiguiente ahorro de energía. MAR puede ser utilizado en áreas urbanas y rurales y para diversos fines. En el presente capítulo nos enfocaremos a la recarga controlada de acuíferos o RCA (las principales tecnologías se muestran en la Figura 4.1):

Figura 4.1

Ilustración de las principales técnicas de recarga controlada de acuíferos (Gale, 2005).



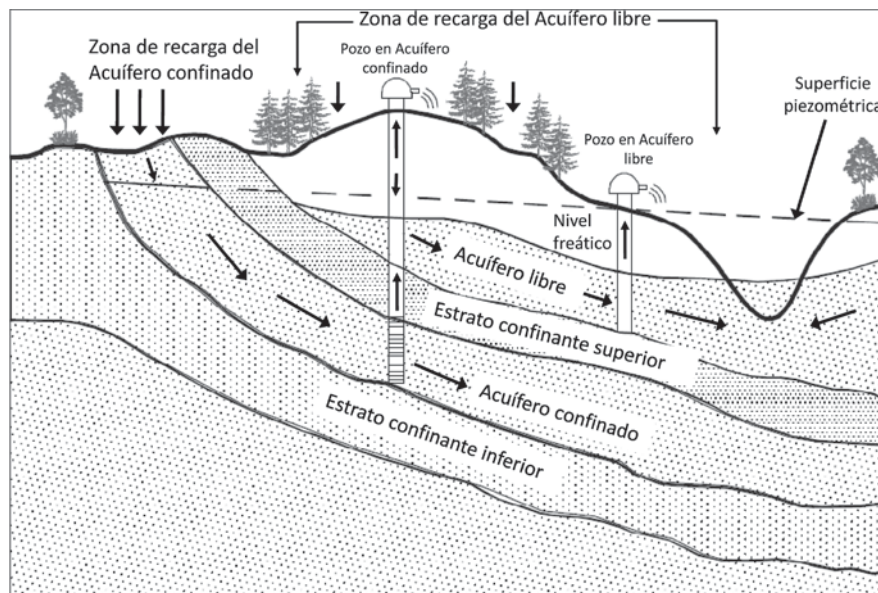
4.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS ACUÍFEROS

La geohidrología se encarga del estudio del agua subterránea, su origen, ocurrencia, movimiento y calidad. Una de las principales dificultades del estudio del agua subterránea es que ésta no se puede ver directamente en el subsuelo y en ocasiones ocurre en ambientes complejos. Por otro lado, los principios generales que gobiernan su ocurrencia, movimiento y calidad están bien fundamentados, lo cual permite al investigador desarrollar una aproximación muy razonable de lo que ocurre en el subsuelo. A continuación se describen algunos conceptos básicos referentes al tipo de acuíferos.

Acuífero: (Figura 4.2) De manera general, un acuífero es una unidad geológica saturada que contiene y transmite agua de buena calidad de tal manera que pueda extraerse en cantidades económicamente aprovechables. Existe una clasificación de acuíferos de acuerdo a las condiciones de presión que se encuentren en el subsuelo, los cuales se describen a continuación:

(Figura 4.2)

Clasificación de acuíferos de acuerdo a las condiciones de presión que se encuentren en el subsuelo



Acuífero Libre: Un acuífero libre es aquél que se encuentra limitado por una capa confinante en la base del acuífero, mientras que la porción superior está limitada por el nivel del agua (nivel freático) el cual se encuentra a presión atmosférica. El nivel superior del acuífero es libre de ascender o descender.

Acuífero Confinado: De manera más simple, un acuífero confinado es aquel que se encuentra confinado entre dos formaciones impermeables ó acuitardos. En un acuífero confinado, la presión del agua es usualmente mayor que la atmosférica. En consecuencia, si un pozo penetra un acuífero confinado, el agua se elevará por encima del nivel del acuífero, y en algunos casos por encima del nivel del terreno, a lo que se le conoce como pozo fluvente o artesiano.

Acuífero Semiconfinado: Acuífero limitado por formaciones menos permeables (acuitardo) que el mismo pero a través de las cuales puede recibir ó ceder volúmenes significativos de agua. El acuífero semiconfinado contiene agua a mayor presión que la atmósfera. El agua es libre de moverse a través de los acuitardos en sentido vertical, hacia arriba o hacia abajo.

Acuífero Colgado: Un acuífero colgado está constituido por una unidad geológica saturada con agua que descansa sobre una unidad geológica impermeable ubicada por arriba del nivel freático principal. La unidad impermeable limita el movimiento vertical descendente del agua en la zona no saturada y es capaz de retener volúmenes significativos de agua antes de que ésta llegue al nivel freático principal.

4.4 OBJETIVOS DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS

Entre los objetivos principales que se deben tener en cuenta en cualquier proyecto de recarga de acuíferos están los se describen a continuación:

- *Almacenar agua en los acuíferos para su uso futuro, especialmente en zonas de escasa disponibilidad de terreno en superficie o sin posibilidad de otras formas de almacenamiento.*
- *Suavizar las fluctuaciones en la oferta/demanda de agua*
- *Desarrollar estrategia de manejo integral del agua en una cuenca*
- *Estabilizar o aumentar los niveles del agua subterránea en acuíferos sobre-explotados.*

Aumento de la Oferta Hídrica

- *Almacenar agua en el subsuelo cuando no hay espacio superficial disponible para la construcción de presas*
- *Reducir las pérdidas por evaporación y escurrimiento*
- *Reducir el escurrimiento superficial y la erosión del suelo*
- *Mejorar la calidad del agua y suavizar sus fluctuaciones*
- *Mantener caudales ecológicos en ríos o arroyos*
- *Manejar la intrusión salina y la subsidencia del terreno*
- *Disponer/reusar el agua de desecho o de las tormentas*

4.5 FUENTES DE AGUA UTILIZABLES PARA LA RECARGA DE ACUÍFEROS

Para la recarga de acuíferos se pueden encontrar diversas fuentes de agua entre las que se ubican:

- *Arroyos y ríos perennes*
- *Arroyos intermitentes, wadis o avenidas*
- *Presas*
- *Agua de tormenta urbana*
- *Agua potable tratada*
- *Agua de lluvia recolectada en los techos*
- *Agua residual tratada*

La decisión final de la fuente depende de la disponibilidad del recurso tanto en tiempo como en espacio, así como en la calidad del agua de recarga y del acuífero.

4.6 BENEFICIOS Y PROBLEMAS DE UN PROYECTO DE RECARGA DE ACUÍFEROS

Un proyecto de recarga controlada de agua subterránea produce un alargamiento de la vida útil de un acuífero, y por lo tanto de su capacidad de producir agua para la subsistencia y el desarrollo, así como la sostenibilidad para la producción de alimentos.

En un proyecto de recarga de acuíferos no todos los beneficios van a ser cuantifi-

cables ni visibles, pero se sabe que si se hace correctamente se podrán obtener los siguientes beneficios directos:

- *Estabilización/aumento de los niveles piezométricos*
- *Aumento del flujo de base (gasto ecológico) en ríos*
- *Control de la intrusión salina*
- *Reducción de la subsidencia del terreno*
- *Fuente sostenible de agua subterránea*
- *Sostenibilidad de áreas irrigadas*
- *Estabilización de la erosión del suelo*
- *Análisis positivo de la relación costo-beneficio*
- *Mejoramiento del nivel de vida*
- *Mitigación de inundaciones*
- *Control de la contaminación*
- *Ahorro de espacio superficial para el almacenamiento del agua*

No todo en los proyectos de recarga de acuífero son ventajas, también se tienen dificultades como son: la necesidad de limpieza de las áreas de infiltración así como el manejo de obstrucciones en la superficie.

Entre los problemas a esperar está el de disponer de información básica inadecuada, la cual da lugar a un diseño pobre y limitado del sistema, como cuando se tienen conceptos erróneos de la geología y la hidrología, y como resultado se tiene un mal diseño de las estructuras de infiltración, de los pozos e inestabilidad de las estructuras; pozos en malas condiciones de funcionamiento, una mala operatividad y rendimientos por debajo de los niveles esperados.

Si no se infiltra la cantidad y la calidad del agua esperada, el agua resultante en el acuífero podrá ser de baja calidad. O puede darse el caso de que se presenten pérdidas de agua por infiltración debido a deficiencias geológicas no conocidas o mal identificadas. Siempre es necesario empezar por un proyecto piloto y después proceder a su implementación a una escala mayor. Sin embargo, se pueden tener problemas en la transición de la escala de prueba a la escala operacional. Es necesario divulgar información de los proyectos de recarga en los medios de comunicación para que la población tenga conocimiento de los trabajos realizados y sus alcances con el fin de lograr su aceptabilidad política y social. Otro problema frecuente es el no contar con personal capacitado, para lo cual se recomienda solicitar apoyo a

instituciones internacionales de reconocido prestigio como la UNESCO o IAH (Asociación Internacional de Hidrogeólogos).

4.7 EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL DEL PROYECTO DE RECARGA DE ACUÍFEROS

Para la evaluación de impacto ambiental de un proyecto de recarga de acuíferos se deben tomar en consideración una serie de factores y procesos que permitan realizar un diagnóstico preciso de la situación ambiental y de los impactos que puede producir. La siguiente lista define las principales actividades que se deben realizar:

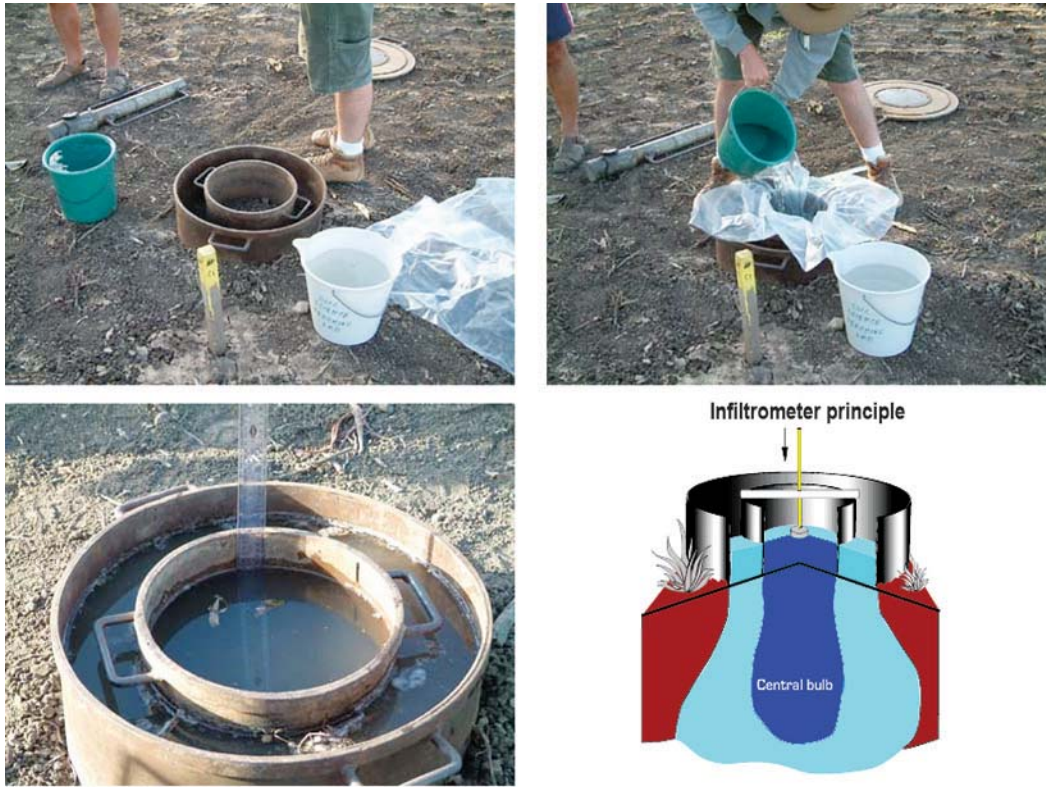
- *Desarrollar un modelo hidrogeológico conceptual (comprensible)*
- *Comprender la hidrología (incluyendo la meteorología)*
- *Estimar el espacio disponible en el acuífero para el almacenamiento del agua adicional*
- *Cuantificar los componentes del balance hídrico*
- *Evaluar la calidad del agua subterránea y de recarga*
- *Usar modelos numéricos para la evaluación del proyecto*
- *Evaluar los impactos aguas abajo de la obra de recarga*

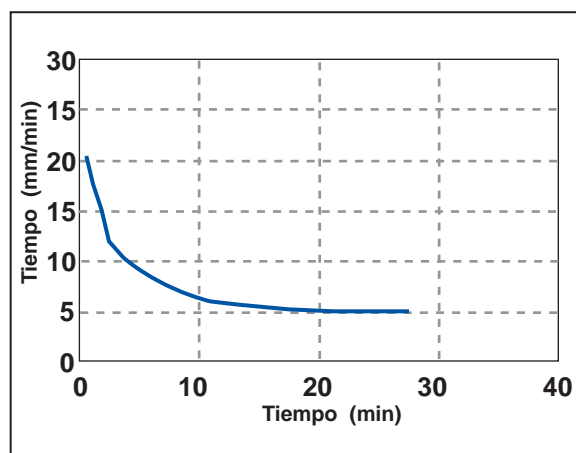
4.8 INFORMACIÓN HIDROGEOLÓGICA NECESARIA

Los principales datos hidrológicos con que se debe contar para la elaboración de un proyecto de recarga de acuíferos son:

- *Capacidad de infiltración (m/día); (Figura 4.3).*
- *La conductividad hidráulica del suelo (m/día)*
- *La porosidad y porosidad efectiva del suelo*
- *Profundidad del nivel freático o superficie piezométrica*
- *La calidad del agua (subterránea y de recarga)*
- *Disponibilidad de terreno*
- *Espesor saturado del acuífero*
- *El volumen disponible del agua de recarga (tiempo)*

Figura 4.3
Infiltrómetro de doble anillo





4.9 ESTUDIOS BÁSICOS PARA EL DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE RECARGA DE ACUÍFERO.

Los estudios básicos a desarrollar para el diseño de un proyecto de recarga de acuíferos incluyen los siguientes: Estudios de evaluación geológica de la zona, velocidad de infiltración del suelo, ubicación y evaluación de las áreas de recargas natural, áreas de descarga natural y explotación artificial, hidrología regional, topografía de la cuenca superficial, determinación del escurrimiento y la evaporación.

Se debe determinar cuál es el espacio de almacenamiento posible del acuífero, o el espacio que se puede crear en el subsuelo, determinación de la capacidad hídrica del suelo, y su porosidad efectiva, espesor de saturación, profundidad del nivel freático. El diseño implica el uso de un modelo matemático de simulación que tome en cuenta todas las variables del sistema y que de soluciones varias condiciones de situación del sistema. Un levantamiento y evaluación de las posibles fuentes contaminantes del acuífero también es de mucha importancia para prevenir y tomar las medidas de corrección o mitigación de dicho impacto.

Siempre es mejor en invertir en estudios previos, para toma de medidas de prevención, que hacer estudios para corrección de grandes males acumulados.

4.10 IMPLICACIONES DE LA CALIDAD DEL AGUA

En cuanto a calidad de agua es necesario estudiar los siguientes aspectos:

- *Remoción de sólidos en suspensión, agentes patógenos, metales pesados, compuestos orgánicos, nitratos, etc., del agua por recargar.*
- *Dilución de aguas subterráneas con mala calidad.*

- *La posible contaminación de aguas subterráneas de buena calidad.*
- *Incremento de solutos por la mezcla de aguas y disolución de los materiales del acuífero.*
- *Las reacciones geoquímicas adversas (As, F, Fe, Mn).*
- *La posible presencia de contaminantes no previstos en la normas como residuos de medicinas y hormonas, llamados contaminantes emergentes.*

4.11 ASPECTOS INSTITUCIONALES Y DE GESTION

En todo proyecto de recarga de acuíferos existen aspectos administrativos e institucionales que deben ser considerados como son los derechos de agua, la legislación hídrica, la tenencia de la tierra, los aspectos regulatorios y legales, etc. Se debe definir también quién debe pagar los proyectos de recarga y quiénes son los beneficiarios, quien lo va a operar y quien lo va a administrar, los niveles de gobierno involucrados (federal, estatal o local), etc.

En términos ambientales y sociales es necesario también evaluar el efecto del proyecto de recarga en la calidad de vida de la comunidad y el entorno.

4.12 LUGARES DONDE NO ES FACTIBLE LLEVAR A CABO PROYECTOS DE RECARGA

Hay que tener presente que no siempre es posible llevar a cabo un proyecto de recarga ya que existen diversos problemas asociados con su implementación así como sitios donde no es factible llevar a cabo proyectos de recarga de acuíferos. Dentro de éstos se encuentran los siguientes sitios (Peter Dillon, et al., 2009):

- *Acuífero libre con nivel freático muy somero.*
- *Acuífero muy delgado o conformado de materiales de grano fino, como la arcilla.*
- *Sitios adyacentes a fallas con problemas de fugas o capas semiconfinantes con agua de mala calidad.*
- *Acuíferos con agua de mala calidad y altamente heterogéneos, o con altos flujos laterales*

4.13 ELEMENTOS CRÍTICOS PARA EL ÉXITO DE UN PROYECTO DE RECARGA

En un proyecto de recarga de acuíferos podemos encontrar principalmente cinco

problemas críticos a los cuales hay que ponerles especial atención para superarlos y obtener un proyecto exitoso. Dentro de estos obstáculos se encuentran:

- Una suficiente demanda del agua recuperada
- Una fuente adecuada de agua para la recarga
- Un acuífero adecuado para almacenar y recuperar el agua
- Una buena extensión de terreno para recolectar y tratar el agua
- Disponer de una buena capacidad de gestión para la operación del proyecto

4.14 PRINCIPALES TECNOLOGÍAS PARA RECARGAR ACUÍFEROS

Las técnicas de recarga de acuíferos han sido aplicadas por milenios y varían en complejidad, desde la simple recolección de agua de lluvia hasta la inyección de agua residual tratada al interior de acuíferos salobre mediante pozos profundos. Las tecnologías aplicadas deben ser apropiadas para cumplir con los objetivos establecidos que, en el nivel más básico, son el almacenamiento y tratamiento del agua. Muchos proyectos de recarga requieren bajos niveles de tecnología y pueden ser (y han sido por siglos) implementados con poco conocimiento de ingeniería. Aquí nos enfocaremos en la recarga intencional; las tecnologías utilizadas se agrupan, a grandes rasgos, en las siguientes categorías (Cuadro 4.1):

Cuadro 4.1

Clasificación de las principales técnicas de recarga controlada de acuíferos (IGRAC)

| | Tecnología | Subtipo | |
|---|--|---|--|
| TÉCNICAS PARA INFILTRAR AGUA | Métodos de distribución | Estanques y Balsas de Infiltración | |
| | | Inundación controlada | |
| | | Zanjas, surcos y drenajes de riego | |
| | | Riego | |
| | Infiltración inducida | | |
| Pozos | Pozo de recarga profunda | ASTR | |
| | | ASR | |
| | Pozos de recarga someros | | |
| TÉCNICAS PARA INTERCEPTAR AGUA | Modificación de los cauces de los arroyos y ríos | Presas para la recarga de acuíferos | |
| | | Presas sub-superficiales | |
| | | Presas de almacenamiento de arena | |
| | | Técnicas de ampliación de los cauces | |
| | Captación de agua de lluvia | Barreras que sobresalen de la superficie de la tierra | |
| Zanjas de infiltración, surcos y tinas ciegas | | | |

4.14.1 TÉCNICAS DE DISTRIBUCION

Las técnicas de distribución de agua se encuentran entre las más simples, viejas y más ampliamente utilizadas métodos de recarga controlados. Esta técnica se aplica cuando el acuífero a recargar se encuentra cerca de la superficie del suelo. La recarga se realiza por la infiltración del agua a través del material permeable de la superficie, el debe ser verificada para mantener las tasas de infiltración. La mayoría de éstos sistemas de recarga de agua utilizan un sistema de zanjas y bancos, o de tuberías, para conducir el agua a la zona de expansión y controlar el proceso de distribución.

En situaciones donde existe una fuente de agua de recarga permanente y de buena calidad, y la infiltración se puede realizar a lo largo del año, se pueden alcanzar tasas de infiltración de 30 m/año para suelos de textura fina como arcillas y marga arenosas, 100 m/año para suelos francos, 300 m/año para arenas medianas y 500 m/año para arenas gruesas (Bouwer, 2002).

Las tasas de evaporación de superficies de aguas libres varían de 0.4 m/año en climas fríos y húmedos a 2.4 m/año en climas templados y secos, por lo que esta variable es una componente secundaria en los balances hídricos.

Cuando la fuente de agua contiene una alta carga de sólidos en suspensión, el buen manejo de la estructura de recarga es muy importante para reducir al mínimo las obstrucciones (clogging), mantener la tasa de infiltración y reducir la evaporación de las aguas abiertas al mínimo.

En general, las técnicas de distribución a menor escala son adecuadas para el suministro de agua a comunidades pequeñas y para la agricultura en zonas rurales.

Una de las ventajas bien conocidas de los sistemas de distribución es la posibilidad de infiltrar grandes cantidades de agua a un costo relativamente bajo.

Los embalses de infiltración son probablemente el método de recarga más favorecido, ya que permiten un uso eficiente del espacio, que puede ser integrado con el paisajismo de un área o espacio abierto, y sólo requieren un mantenimiento simple. Una desventaja de los sistemas de distribución es la exigencia de una gran superficie con un acuífero libre para la infiltración del agua, lo cual no siempre está disponible.

Las principales técnicas de distribución para la recarga de acuíferos incluyen los siguientes subtipos:

- i) *estanques y balsas de infiltración,*
- ii) *inundación controlada,*
- iii) *zanjas, surcos y drenajes de riego, y*
- iv) *riego*

i) Estanques y balsas de infiltración

Un estanque de infiltración se excava en el suelo o comprende un área deprimida de tierra que retiene el agua de recarga hasta que se infiltra a través del suelo (Figuras 4.4 y 4.5). Si el material del acuífero es fino ocurrirá una rápida obstrucción o clogging. En este caso se recomienda cubrir el fondo y los lados de los estanques o balsas con una capa de arena de grano medio de aproximadamente 0.5 mm de espesor, con que es posible retrasar el proceso de obstrucción y extender los períodos de recarga (Huisman & Olsthororn, 1983).

La depresión debe ser lo suficientemente superficial como para permitir el drenaje rápido en casos en que sea necesaria su limpieza mediante secado y raspado del fondo. Los niveles del agua dentro de la misma deben ser controlados para prevenir el crecimiento de la vegetación o acumulaciones de algas, y la consecuente resistencia al flujo de agua. La superficie disponible y la tasa de infiltración determinan el volumen de agua que se puede recargar. El material que se deposita en el fondo y en los lados del estanque crea una capa que actúa como filtro y que puede provocar la obstrucción del estanque impidiendo la infiltración del agua, siendo el principal problema durante la recarga.

Figura 4.4

Dibujo esquemático de un estanque de infiltración
(Gale, 2005)

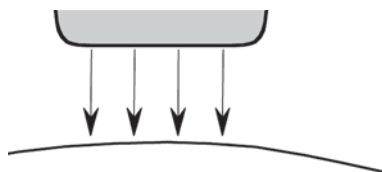
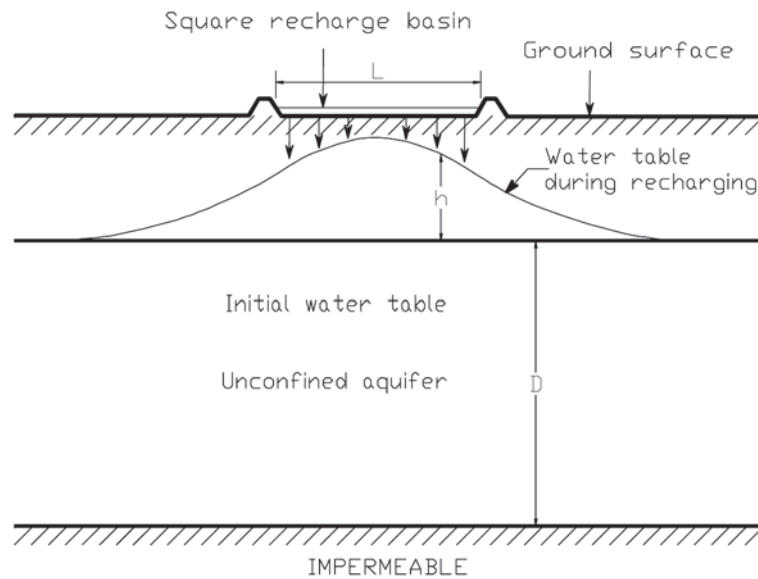


Figura 4.5

Diagrama de un domo de recarga en un acuífero libre ubicado debajo de una cuenca de infiltración (Todd, 1959)

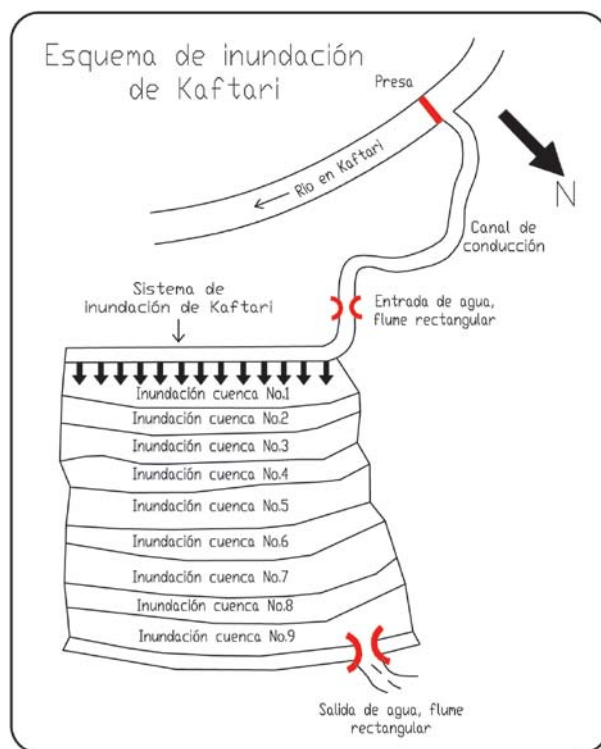


ii) Inundación controlada

Consiste en hacer pasar una capa delgada de agua sobre una superficie de terreno permeable lo cual permitirá que el agua se infiltre hacia el acuífero. El agua se desvía desde un río hacia el área de recarga mediante canales (Figura 4.6). El agua se debe mover a una velocidad mínima para evitar la alteración de la capa del suelo. Las tasas de infiltración más altas se observan en áreas con vegetación no alterada y suelo cubierto (Todd, 1959). Para controlar el proceso de inundación se recomienda rodear la planicie de inundación con bancos u zanjas.

Este método requiere una mínima preparación del terreno por lo que es sumamente efectivo, desde el punto de vista de la relación costo-beneficio comparada con otros métodos de distribución. Sin embargo, requiere grandes superficies de terreno disponibles para la operación de la recarga. Altas cargas de sedimentos se depositarán en la superficie reduciendo las tasas de recarga, y es probable que haya que tomar medidas de remediación para mantener las tasas deseables (Esfandiari-Baiat & Rahbar, 2004). Esta técnica sólo es apropiada para terrenos con topografía plana.

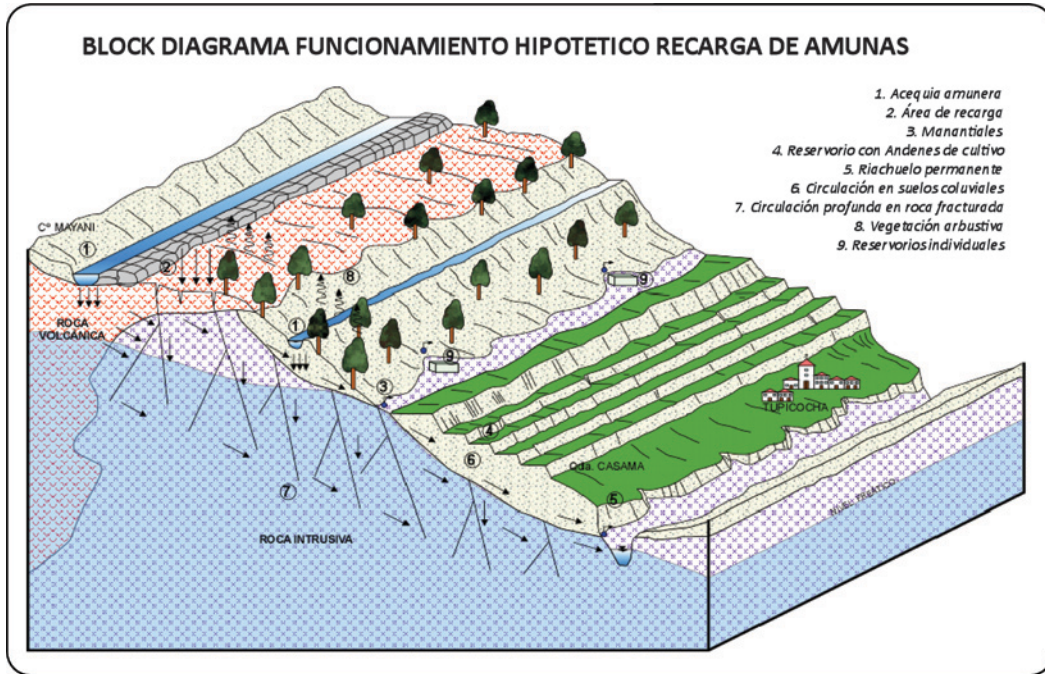
Figura 4.6
Esquema de inundación controlada en el río Kaftari
(Tood, 1959)



iii) Zanja, surcos y drenajes de riego

Consiste de un sistema de zanjas y surcos de poca profundidad que se construyen muy próximos entre sí en un terreno plano, en el cual el agua se introduce e infiltra. Esta técnica es adecuada para terrenos con topografía plana e irregular (Figura 4.7).

Figura 4.7
Diagrama del funcionamiento hipotético de la recarga mediante canales
(Apaza, 2006)



iv) Riego

En las zonas bajo riego, los excedentes de agua pueden ser aplicados en forma deliberada sobre las áreas de cultivo durante las temporadas de descanso de los mismos (Figura 4.8).

El agua excedente de riego proveniente de canales y campos ha causado históricamente problemas de salinización y saturación hídrica del suelo. Sin embargo, cuando este excedente es cuantificado y gestionado puede convertirse en una oportunidad favorable. Por ejemplo, en la Planicie Indo-Gangética los niveles del agua subterránea aumentaron 6 m aproximadamente en un período de 10 años y, cada vez en mayor medida, el agua está siendo utilizada para el riego de otras áreas. IWMI (2002) estima que únicamente 60% del agua aplicada en los cultivos de arroz es utilizada, y el 40% restante se filtra pasando a ser parte del recurso hídrico subterráneo. Estudios recientes han demostrado que sistemas de riego por canales pueden ser modificados para aumentar la recarga de agua subterránea.

Figura 4.8

El riego por inundación del arroz contribuye a la recarga de los acuíferos (IWMI, 2002)



4.14.2 INFILTRACIÓN INDUCIDA

Los sistemas de infiltración inducida comúnmente consisten en una galería o una línea de pozos colocados a una corta distancia, y paralelo a la orilla de un cuerpo de agua superficial (Figura 4.9).

El bombeo de los pozos disminuye el nivel freático adyacente al río o lago, induciendo que esta agua entre al sistema del acuífero. Para asegurar una depuración satisfactoria del agua superficial a través de su paso por el suelo, el tiempo de viaje debe exceder los 30 a 60 días (Huisman & Olsthoorn, 1983), por lo que la distancia que recorre el agua debería asegurar que esto ocurra.

Los sistemas de infiltración inducida normalmente se instalan cerca de arroyos y lagos perennes los cuales están conectados hidráulicamente con un acuífero a través de los depósitos permeables no consolidados que forman parte del lecho del río o el fondo del lago. De hecho, los factores que determinan el éxito de los proyectos de infiltración inducida son la disponibilidad de una fuente confiable de agua superficial de calidad aceptable y la permeabilidad de los depósitos del lecho del río o lago y de las formaciones adyacentes al cuerpo de agua superficial (O'Hare et al., 1982). Si la permeabilidad de los depósitos del lecho del río o lago y del acuífero es alta y el acuífero tiene el suficiente espesor, es posible extraer grandes cantidades de agua subterránea de un pozo o de una galería sin que ocurran efectos adversos serios en la capa freática tierra adentro (Huisman & Olsthoorn, 1983).

El agua de ríos y lagos suelen tener una cantidad considerable de material en suspensión, y por ende, si el agua entra en el acuífero, este material se filtra y deja una capa fina en el fondo del río o lago.

Esto provee un tratamiento útil para el agua infiltrada pero si la obstrucción es excesiva puede ser necesario el raspado del fondo del río o lago durante períodos de bajo nivel de agua.

Esta técnica se ha aplicado en Europa por más de un siglo para la producción de agua potable. La contaminación de las aguas superficiales con compuestos orgánicos persistentes desde los 1950 redujo el uso de esta técnica. Para ello se implementaron medidas de control efectivas y programas de monitoreo que lograron disminuir la contaminación por lo que la técnica de infiltración inducida ha vuelto a ser un recurso confiable para la extracción de agua cruda.

Los sistemas de infiltración inducida se aplican en diferentes escalas, pero en general son muy complejos, de gran escala y altos costos. En la cuenca del Rin, más de 20 millones de habitantes reciben agua potable que es directa o indirectamente captada del agua de río vía los sistemas de infiltración inducida.

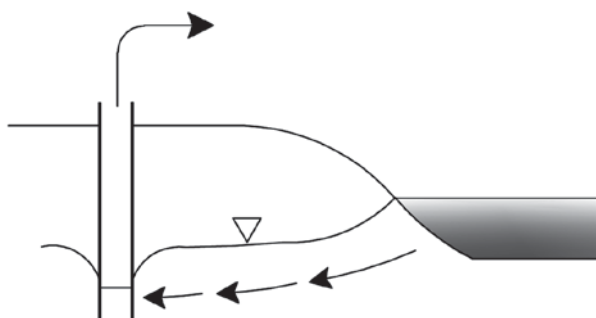
A una menor escala los sistemas de infiltración inducida se utilizan para el abastecimiento de agua a zonas rurales y pequeños poblados. Los proyectos de infiltración inducida son generalmente administrados por las autoridades municipales del agua.

Las mayores ventajas de los sistemas de infiltración inducida son las grandes cantidades de agua subterránea que puede ser extraída de pozos o galerías sin efectos adversos graves en los niveles freáticos de las aguas subterráneas. Durante el paso del agua por el fondo del lecho del río (o lago) y el acuífero, se remueven los contaminantes disueltos y suspendidos, así como los agentes patógenos debido a una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos.

La desventaja es que puede ser necesario rascar el fondo de los ríos o lagos durante los periodos de bajo nivel de agua, si la obstrucción es excesiva. La contaminación a largo plazo del agua de ríos o lagos por compuestos orgánicos persistentes (como plaguicidas y farmacéuticos) constituye en la actualidad la mayor amenaza a los sistemas de infiltración inducida.

Figura 4.9

Recarga inducida provocada por el bombeo cerca de un río (Gale, 2005)



4.14.3 POZOS

En la mayoría de los casos, los pozos están diseñados para extraer las aguas subterráneas de un acuífero. Sin embargo, estas estructuras también se pueden utilizar para recargar las aguas subterráneas, un concepto que está siendo cada vez más popular en todo el mundo.

Hay dos tipos principales de recarga de aguas subterráneas mediante pozos, que se diferencian por la profundidad del acuífero:

Pozos de recarga someros

Los pozos abiertos y de bombeo se utilizan para recargar acuíferos con niveles freáticos someros y en lugares donde las capas superficiales de baja permeabilidad y los métodos de distribución no son efectivos. Los pozos que se han secado, debido a la disminución de mantos acuíferos como consecuencia de la sobreexplotación, son cada vez más utilizados para este propósito.

Un problema asociado con el uso de estas estructuras es la posibilidad de introducir no solamente sólidos en suspensión, sino también compuestos orgánicos (nitratos, pesticidas) y bacterias contaminantes directamente al acuífero. El uso de las estructuras existentes es ventajoso porque reduce los costos.

Previamente a la recarga es necesario que los sólidos en suspensión del agua de recarga se sedimenten; lo que disminuirá el potencial de colmatación de los poros, en particular si la fuente es agua de tormenta. La extracción posterior de agua puede remover las partículas finas que se han depositado en los poros, y de esta forma recuperar parte de la capacidad de recarga. Además, puede ser necesario la remoción física del sedimento y la limpieza mediante inyección de agua a presión (jetting).

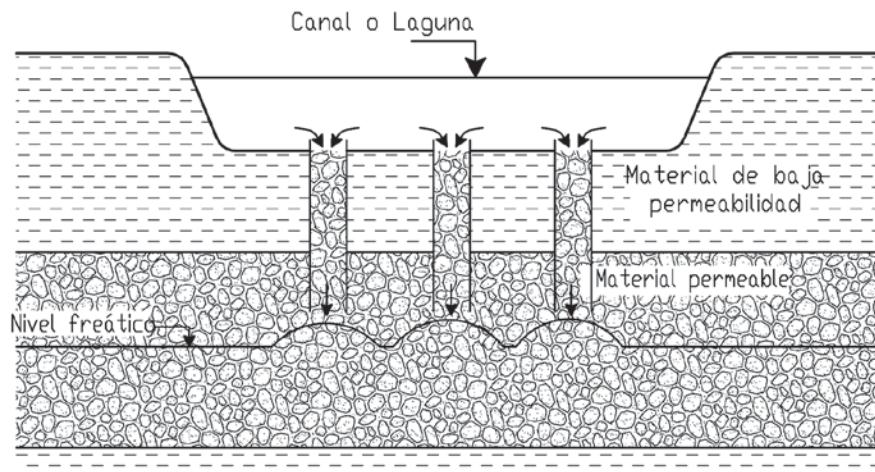
Una combinación de pozos de recarga y zanjas se utilizan para infiltrar el agua hacia formaciones de buena permeabilidad, las cuales están sobreyacidas por capas

menos permeables o que están a poca profundidad (de 5 a 15 m). Las zanjas y los pozos se rellenan de arena gruesa o grava fina la cual actúa como filtro (Figura 4.10). Este material puede ser reemplazado si el problema de obstrucción se hace severo. Es recomendable cubrir las instalaciones para mantener alejados a personas y animales, y evitar la exposición solar.

En general, los pozos y las zanjas tienen alto costo de construcción y sus volúmenes de agua de recarga son pequeños. Por lo tanto, su uso se limita principalmente a casos en los que ya están disponibles en forma de canteras abandonadas, depósitos de grava, etc.

Figura 4.10

Pozos someros utilizados para conducir el agua a través de un material de baja permeabilidad, permitiendo la recarga del acuífero

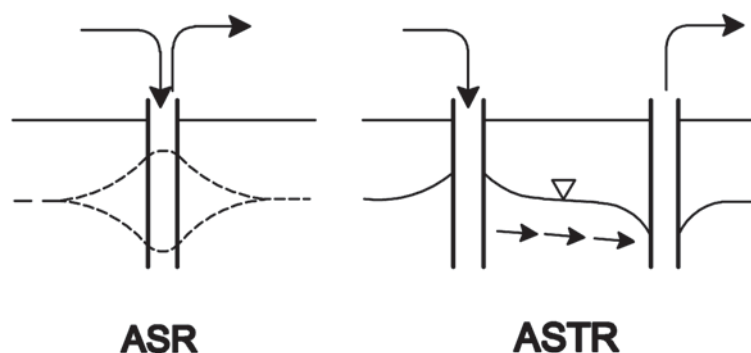


Pozos de recarga profunda

Es un desarrollo relativamente reciente que comenzó hace unos 50 años atrás cuando las primeras investigaciones de la inyección de agua potable en acuíferos salinos se llevaron a cabo. Los pozos de recarga profunda se utilizan cuando gruesos estratos de baja permeabilidad sobreyacen al acuífero por recargar. Existen dos tipos de aplicaciones (Figura 4.11):

Figura 4.11

Pozos de recarga profundos tipo ASR y ASTR (Dillon and Molloy, 2006)



Pozos de almacenamiento y recuperación (ASR)

Se caracterizan por pozos utilizados tanto para la inyección como la extracción del agua. ASR se ha convertido en una de las técnicas de recarga de pozos profundos más populares y de uso común. La mayoría de los sitios de operación de ASR almacenan agua potable tratada para proveer de agua potable a ciudades y comunidades especialmente en épocas de máxima demanda. En muchos casos, las zonas de almacenamiento están constituidas por acuíferos que han experimentado grandes abatimientos y por periodos prolongados de tiempo debido al bombeo intensivo a que han sido sometidos para satisfacer las crecientes demandas de agua urbana y agrícola. Los niveles del agua subterránea pueden ser restaurados si se recargan volúmenes adecuados de agua.

Pozos de almacenamiento, transferencia y recuperación (ASTR)

Consiste en la inyección de agua a un pozo, y la posterior extracción en otro pozo ubicado a una distancia razonable para incrementar el tiempo de viaje del agua en el acuífero y beneficiarse de la capacidad de depuración del agua en el acuífero.

El diseño de pozos de recarga puede variar considerablemente e incluye la perforación y relleno del pozo con un filtro compuesto de material granulado para restringir la entrada de sólidos en suspensión, que rápidamente colmatarían el sistema, restringiendo así la entrada de contaminantes.

Los pozos de recarga son ventajosos cuando el terreno es escaso. Sin embargo, los requerimientos de calidad del agua de inyección suelen ser significativamente mayores que para la recarga de acuíferos por medio de técnicas superficiales.

La principal ventaja de los pozos ASR es que los costos se reducen al mínimo y la colmatación se remueve durante el ciclo de recuperación. Los sistemas ASR gene-

ralmente cumplen los requerimientos del manejo de agua a menos de la mitad del costo de capital que otras alternativas de abastecimiento de agua.

Sin embargo para la correcta aplicación de un sistema ASR, se requiere de una amplia investigación y de pruebas piloto para evaluar la permeabilidad de los acuíferos, los cambios químicos en el acuífero, la calidad del agua recuperada, la eficiencia del sistema y el impacto ambiental.

La obstrucción de material del acuífero o del filtro de la perforación, ya sea por los sedimentos en suspensión, aire que ingresa en el agua de recarga, crecimiento microbiano o la precipitación química, es un problema común que provoca un aumento excesivo de los niveles de agua en el pozo de recarga. Estos procesos de obstrucción pueden ser manejados mediante el tratamiento mecánico del agua de recarga mediante la sedimentación o filtrado previo para remover los sólidos en suspensión. El agua debe ser introducida mediante una válvula para asegurar de que se obtenga una columna continua de agua hasta la superficie del agua en el acuífero.

Puede ser necesario algún pretratamiento químico del agua para prevenir la floculación de hierro, carbonatos de calcio, etc., y la cloración u otra desinfección para prevenir el crecimiento microbiano. Puede ser necesario la recuperación de pozos obstruidos de manera regular por medio del bombeo e inyección de agua para remover físicamente partículas finas y el crecimiento bacteriano, así como el uso de agentes humectantes para remover aire en el caso de pozos obstruidos con aire. Los acuíferos compuestos de carbonato tienen menos problemas de obstrucción debido a la disolución gradual de la calcita por la introducción de agua ligeramente ácida, si se observa un reflujó periódico.

4.14.4 MODIFICACIÓN DE LOS CAUCES DE LOS ARROYOS Y RÍOS

La modificación de los cauces de los arroyos y ríos consisten de estructuras que interceptan o detienen el flujo de las corrientes de agua superficial incrementando la recarga natural de los acuíferos.

Estas técnicas se encuentran entre las más antiguas de recarga de acuíferos y aún hay indicios de su larga existencia. Presas construidas con fragmentos de rocas, que se remontan hasta el tercer milenio A.C., se han descubierto en Baluchistan y Kutch en la India.

La modificación de los cursos de agua superficial se utiliza predominantemente en las regiones áridas, en los arroyos y cauces arenosos de ríos que solo llevan agua en época de lluvias. Su propósito es generalmente incrementar la recarga de los acuíferos mediante el almacenamiento o retención del agua de las avenidas con una descarga controlada, a fin de facilitar su infiltración al subsuelo.

El diseño de las estructuras requeridas para modificar los cauces de los arroyos o ríos y los materiales de construcción a utilizar son impuestos principalmente por las consideraciones económicas, ya que es técnicamente más factible construir estas estructuras con casi cualquier material.

Las estructuras requeridas para modificar los cauces de los arroyos o ríos se aplican en muy diversas escalas, desde pequeñas estructuras con longitud de un par de metros hasta grandes presas con longitud de 9 km (Omán). Debido a ello, se construyen y manejan en varios niveles: desde los agricultores individuales hasta las autoridades del agua e instituciones gubernamentales.

Una gran ventaja del almacenamiento de agua en acuíferos artificiales en regiones semi-áridas, es disponibilidad de agua para los habitantes en épocas de sequía.

Esta técnica no interfiere con el uso de la tierra y tiene un impacto mínimo en los habitantes y el ecosistema.

Existe una gran variedad de estructuras que se utilizan en todo el mundo para modificar los cursos de agua superficial.

Presas para recarga de acuíferos

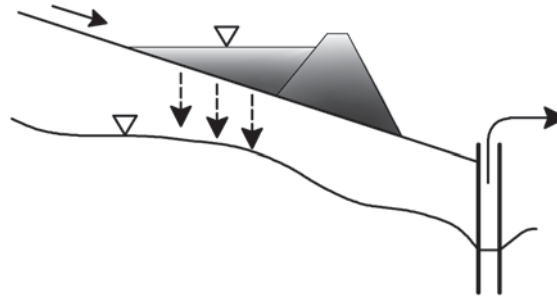
Se construyen sobre el cauce del río y se diseñan para la recolección del escurrimiento superficial. La presa actúa como estanque de infiltración o el agua se conduce a través de tuberías para que se infiltre en el lecho del río aguas abajo, lo cual facilita la recarga del acuífero (Figura 4.12). Para evitar la erosión o destrucción de estas estructuras, con frecuencia se construye un vertedor de concreto.

Debido a que estas estructuras retienen el agua únicamente por cortos períodos de tiempo, la tierra puede ser inmediatamente cultivada, permitiendo el aprovechamiento de la humedad del suelo, lo que puede resultar en una cosecha anual adicional. Labrar la tierra también mantiene la capacidad de infiltración, dejándola lista para la próxima entrada de agua.

En Kenya y en muchas partes de India represas superficiales, y en Taiwán represas inflables, han sido utilizadas para prolongar la presencia del agua e incrementar las zonas húmedas de aluviones en los ríos intermitentes.

Figura 4.12

Recarga de un acuífero libre mediante una presa; extracción y aprovechamiento del agua posterior mediante un pozo (Gale, 2005)

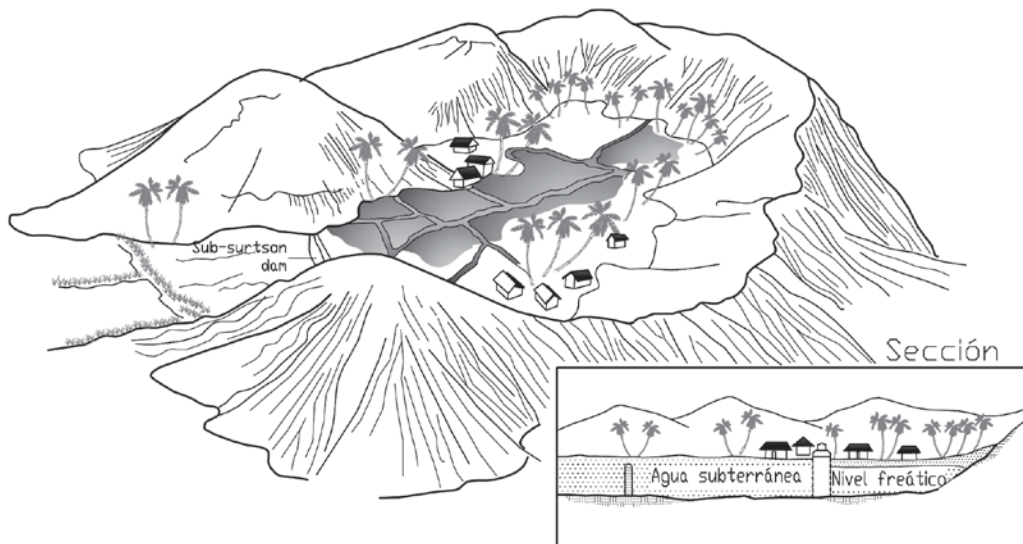


Presas sub-superficiales

Se refieren a estructuras destinadas a contener el flujo subterráneo de un acuífero natural o artificial, mediante una barrera impermeable. Se crea así un área de almacenamiento del agua subterránea aguas arriba de la presa, lo cual origina la elevación del nivel freático (Figura 4.13).

Figura 4.13

Condición topográfica óptima para la ubicación de una presa subsuperficial (Nilsson, 1988)



Presas de almacenamiento de arena

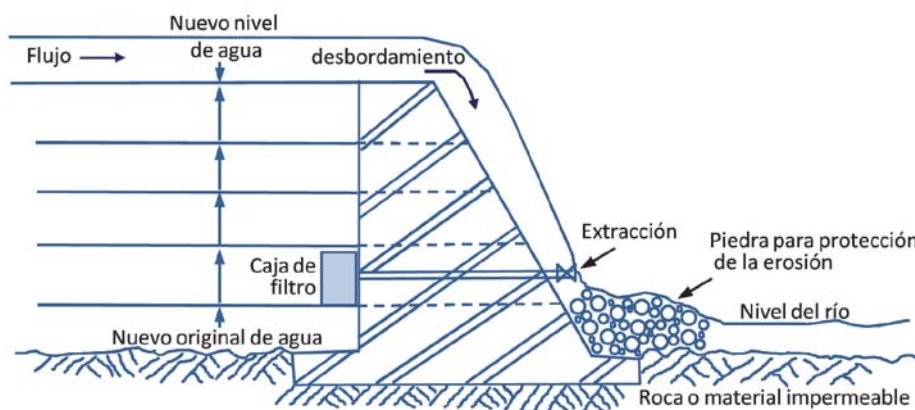
Se construyen sobre el terreno en el lecho de ríos intermitentes y arenosos en valles bien definidos. Para ello se excava en forma transversal el lecho del río hasta un estrato impermeable en donde se coloca la pared o cortina de la presa con material de baja permeabilidad (Figura 4.14). Durante los períodos de lluvia, arena y grava se acumulan en el interior de la presa. Así, luego de cada evento de inundación, la pared de la presa se eleva; la altura de la pared determinará el volumen de agua y la cantidad de material que se acumula. El agua de escorrentía puede infiltrarse fácilmente a través de los depósitos de suelo de alta permeabilidad, creándose un acuífero artificial aguas arriba de la presa. La arena conserva el agua de la evaporación y de la contaminación superficial. Este tipo de infraestructura es usual en lugares como las sabanas africanas donde hay gran competencia por el agua para uso humano y por los animales. Sin embargo, se debe permitir el desborde del agua en exceso para que el material más fino sea transportado aguas abajo (Murray & Tredoux, 1998).

El agua puede extraerse de la arena o grava depositada aguas arriba de la presa mediante un pozo o tubo. Se recomienda el uso de pozos de concreto sellados con una cubierta de losa y provista de una bomba manual. Alternativamente, se puede instalar en la cortina de la presa una tubería de extracción con válvula de control aguas abajo y caja de filtración aguas arriba.

Hay muchas ventajas en el uso de las presas sub-superficiales en comparación con las presas superficiales, entre ellas: i) menores pérdidas por evaporación, ii) se previene la cría de insectos y parásitos, iii) se reduce la contaminación del agua almacenada por las personas y los animales.

Figura 4.14

Sección transversal esquemática de una presa de arena (WaterAid)



Mini-presas de gaviones y tierra

Consisten en el aprovechamiento de los escurrimientos de agua de las barrancas y cañada con mini-presas artesanales (Figura 4.15). Las mini-presas captan los caudales temporales, para utilizarlos posteriormente y funcionan como pequeños arroyos al pie de las colinas y dividen los terrenos en segmentos. Cuando las mini-presas se construyen en cascada, unas aguas abajo de la otra, las corrientes se convierten en una serie de depósitos de agua de gran utilidad.

Figura 4.15

Presa de gavión sobre el cauce de un arroyo

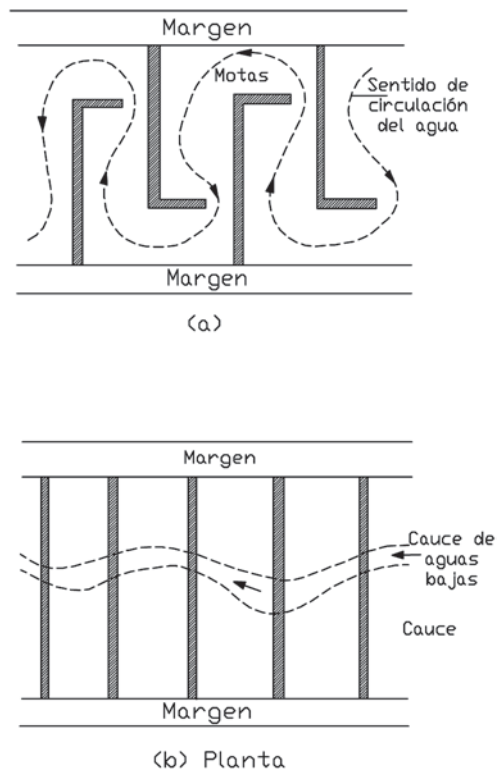


Técnicas de ampliación de los cauces

Consiste en la ampliación de los cauces actuales de los ríos o arroyos para incrementar el área mojada y la tasa de infiltración disminuyendo la velocidad del agua. La ampliación, nivelación, escarificación y el dragado de los cauces son ejemplos de esta tecnología. El uso de diques en forma de "L" hace que se modifique el patrón del flujo superficial en el cauce disminuyendo la velocidad del flujo en el río e incrementando la longitud del cauce, lo cual se traduce en más tiempo para que el agua se infiltre (Figura 4.16).

Figura 4.16

Modificación del cauce de un río para incrementar la recarga (Todd, 1959)



4.14.5 CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA

La captación del agua de lluvia, en su sentido más amplio es la recolección del escurrimiento superficial para un uso productivo. Por lo general, implica la concentración de la lluvia en un área grande para su uso en un área más pequeña, ya sea para humedecer el suelo o para la recarga de acuíferos.

En regiones semiáridas, los sistemas de cultivo utilizan entre el 15% y el 30% del agua de lluvia; la mayor parte del agua se evapora (30-50%) y el resto deriva en escorrentía superficial (10-25%) y en agua de recarga subterránea (10-30%) (van Leeuwen & Beernaerts, 2002).

Existen dos tipos principales de sistemas de captación de aguas pluviales:

Recolección de agua de lluvia en los techos

La recolección de agua de lluvia en la azotea o techos de las casas o edificios es un caso especial que se utiliza cada vez más en las zonas urbanas para el almacenamien-

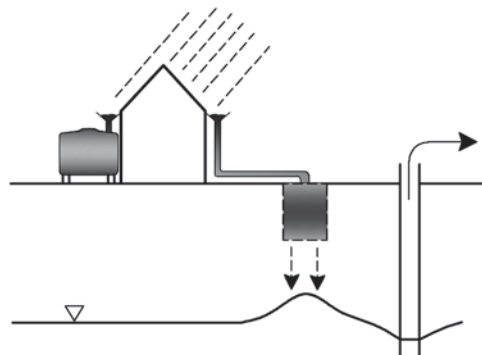
to de agua, riego urbano y la recarga de acuíferos. El agua de lluvia que cae en los techos se recolecta y conserva, ya sea para consumo directo o para la recarga. Para ello se requiere conectar el tubo de salida del desagüe del techo hacia pozos preexistentes u otras estructuras de recarga o tanques de reserva (Figura 4.17). Los tubos de desagüe, las superficies de techos y los estanques de almacenamiento deben ser construidos a partir de materiales químicos inertes, por ejemplo plástico, aluminio, hierro galvanizado o fibra de vidrio, para evitar contaminar el agua de lluvia.

Cuando el agua es utilizada para consumo directo, se deja que el agua de las primeras lluvias corra libremente a manera de remover la basura y polvo acumulados en el área de recolección y canaletas. Las fuentes más importantes de contaminación son la deposición aérea, insectos y excrementos de aves y otros animales. La contaminación bacteriana puede ser minimizada manteniendo la superficie de los techos y desagües limpios, pero no puede ser completamente eliminada.

El objetivo principal de la recarga es aumentar el almacenamiento de la agua subterránea para los momentos de necesidad. Las ventajas de recoger y almacenar agua de lluvia en zonas urbanas incluyen la reducción de la demanda en los sistemas de abastecimiento de agua, así como la reducción del escurrimiento de las tormentas y sus consiguientes inundaciones.

Figura 4.17

Dibujo esquemático de un sistema de captación de agua de lluvia en los techos de las construcciones para la recarga de los acuíferos (Gale, 2005)



Sistemas de recolección de escurrimiento superficial

Incluyen una gran variedad de técnicas, las cuales tienen el objetivo de obstruir el escurrimiento superficial de las cuencas concentrando el agua para infiltración y almacenamiento en acuíferos, logrando con ello también reducir significativamente el escurrimiento superficial y la evaporación del agua. Dentro de estas técnicas se

encuentran las barreras que sobresalen de la superficie del terreno y las zanjas de infiltración, surcos y tinas ciegas.

En muchos casos, el propósito de los sistemas de recolección del escurrimiento superficial es aumentar la producción agrícola mediante la recarga de las aguas subterráneas y, como beneficio adicional, reducir la erosión del suelo.

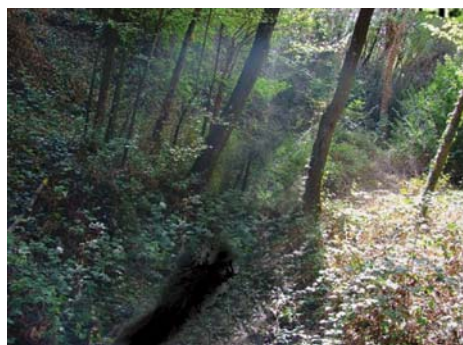
Estos sistemas son, quizás, los de más amplia aplicación de todas las técnicas de recarga:

Barreras que sobresalen de la superficie de la tierra:

Estas barreras actúan como un obstáculo para el flujo superficial de agua en las laderas. Las barreras reducen la velocidad del agua provocando su infiltración al subsuelo o acuífero y aumentando la humedad del suelo (Figura 4.18). Las barreras más comúnmente utilizados son los muros de contención y las crestas que son pequeñas paredes de piedra o tierra construidas generalmente a lo largo de las curvas de nivel. Generalmente las barreras se utilizan regiones áridas donde el escurrimiento es esporádico pero intenso, generando un alto escurrimiento superficial.

Figura 4.18

Barreras al flujo superficial para provocar la infiltración del agua.



Zanjas de infiltración, surcos y tinas ciegas:

Después de los períodos de alta precipitación, el escurrimiento en las laderas puede ser retenido en estas estructuras. Estas depresiones hecha por el hombre recolectan el agua del escurrimiento y la infiltran a través del fondo y las paredes recargando el agua subterránea y/o aumentando la humedad del suelo. Las zanjas de infiltración, surcos y tinas ciegas son muy adaptables. (Figura 4.19)

Figura 4.19
Zanjas de infiltración en Kerala, India



4.15 ASUNTOS BÁSICOS A CONSIDERAR EN UN PROYECTO DE RECARGA DE ACUÍFEROS*

* *SEGÚN LOS CRITERIOS INDICADOS EN EL MANUAL STRATEGIES FOR MANAGED AQUIFER RECHARGE (MAR) IN SEMI-ARID AREAS. EDITED BY IAN GALE*

International Association of Hydrogeologists commission on Management of Aquifer Recharge IAHR–MAR www.iah.org/recharge, International Hydrological Programme (IHP) www.unesco.org/water/ihp

La siguiente lista reúne los aspectos más importantes a considerar en la evaluación de la aplicación de un proyecto de recarga RCA, como parte de una estrategia de gestión del agua o la evaluación de la eficacia de los sistemas existentes. Mayor información, ejemplos y orientación se puede obtener en el texto completo (www.iah.org/recharge y www.unesco.org/water/) y en las referencias citadas al final de este documento.

¿Cuáles son los objetivos y los beneficios de la RCA?

- *Almacenar agua en acuíferos para su uso futuro*
- *Disminuir las fluctuaciones de la relación abastecimiento/demanda*
- *Como parte de una estrategia de gestión integrada de los recursos hídricos*
- *Para estabilizar o aumentar los niveles de agua subterránea donde existe sobreexplotación*

Aumento de la Oferta Hídrica

- *Es aplicable cuando no hay disponible un sitio adecuado de almacenamiento superficial del agua*
- *Disminuir las pérdidas de agua por evaporación y escorrentía*
- *Impedir la escorrentía de tormenta y la erosión del suelo*
- *Mejorar y disminuir las fluctuaciones de la calidad del agua*
- *Mantener los caudales ambientales en arroyos/ ríos*
- *Gestionar la intrusión salina o subsidencia de tierra*
- *Disposición/reutilización de agua residual/ de tormenta*

¿Cuáles son las fuentes de agua de recarga?

- *Arroyos, ríos o canales permanentes*
- *Arroyos intermitentes, uadis, o agua de inundación*
- *Embalse de almacenamiento*
- *Agua de tormenta urbana*
- *Agua potable tratada*
- *Agua de lluvia recolectada de los techos*
- *Agua residual o reciclada*

¿Cómo puede ser evaluado un sitio?

- *Desarrollar un modelo conceptual hidrogeológico (comprensión)*
- *Comprender la hidrología (incluyendo la meteorología)*
- *Estimar el espacio disponible adicional para almacenar agua en el acuífero*
- *Cuantificar los componentes del balance hídrico*
- *Estimar la calidad del agua subterránea y del agua de recarga*
- *Utilizar modelos numéricos para evaluar el plan*
- *Evaluar los impactos de la estructura aguas abajo*

¿Cuáles son las técnicas para recarga de acuíferos?

- *Métodos de distribución: Estanques y Balsas de Infiltración, Inundación controlada, Zanjas, surcos y drenajes de riego, Riego*
- *Sistemas de infiltración inducida*
- *Pozos, pozos de recarga profunda (ASTR), pozos de recarga someros*
- *Modificación de los cauces de los arroyos y ríos: Presas para la recarga de acuíferos, Presas sub-superficiales, Presas de almacenamiento de arena, Técnicas de ampliación de los cauces*
- *Captación de agua de lluvia: Barreras que sobresalen de la superficie de la tierra, Zanjas de infiltración, surcos y tinas ciegas*

¿Cuáles son las consecuencias para la calidad del agua?

- *Remoción de sólidos en suspensión, patógenos, metales pesados, materia orgánica, nitratos, etc. del agua de recarga*
- *Dilución del agua subterránea de baja calidad*
- *Posible contaminación del agua subterránea de alta calidad*
- *Incremento en solutos por mezcla y disolución*
- *Reacciones geoquímicas adversas (As, F, Fe, Mn)*

¿Qué aspectos institucionales y de gestión necesitan ser considerados?

- *Derechos de Agua*
- *Tenencia de tierra*
- *Aspectos legales y regulatorios*
- *¿Quién paga y quién se beneficia?*
- *¿Quién gestiona?*
- *¿Comunidad/ ONG?*
- *¿Gobierno local/ central/ empresas estatales?*
- *¿Municipalidad/ compañías?*
- *¿Sector privado/ doméstico/ empresas privadas?*
- *Gestión integrada (usuarios/ ONG/ gobierno)*

Aumento de la Oferta Hídrica

- *Uso conjunto*
- *Gestión de la demanda*

¿Cómo pueden ser evaluados los beneficios?

- *Estabilización/aumento de los niveles piezométricos*
- *Aumento de los caudales de base (ambientales) en ríos*
- *Abatimiento de la intrusión salina*
- *Reducción de la subsidencia de tierra*
- *Fuente sostenible de agua subterránea*
- *Sostenibilidad del área irrigada*
- *Estabilización de la erosión del suelo*
- *Análisis positivo de la relación costo-beneficio*
- *Mejoramiento del nivel de vida*

Problemas frecuentes que pueden surgir

- *Obstrucciones*
- *Conceptualización errónea de la geología y/ o hidrología del lugar*
- *Mal diseño de las estructuras de infiltración/ perforaciones*
- *Poca estabilidad de la estructura de infiltración o perforación bajo condiciones operativas*
- *Mala operación o gestión del plan*
- *Mala calidad del agua subterránea (mezcla difusiva)*
- *Poca protección de la calidad del agua subterránea*
- *Pérdidas de agua infiltrada/ inyectada*
- *Problemas en la transición de escala de prueba a escala operacional*
- *Aceptabilidad política, social y religiosa*
- *Disponibilidad y divulgación de información y conocimiento*
- *Disponibilidad de capacidades y recursos humanos*

4.16 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La explotación racional de las aguas subterráneas constituye un elemento clave en el desarrollo económico de un país, área o región. En muchos países del Caribe el agua subterránea tiene además un interés estratégico ya que constituye la principal fuente de agua dulce.

La explotación intensiva de las aguas subterráneas puede ocasionar el descenso del nivel freático, la subsidencia del terreno, el deterioro de la calidad del agua, y la intrusión del agua de mar, entre otros aspectos.

En este sentido, el aprovechamiento del potencial de recarga de acuíferos (en inglés, Managed aquifer recharge) constituye un importante factor para aumentar la oferta hídrica, mediante diversas técnicas como los pozos de recarga, embalses de infiltración o las presas de arena.

Para ello, es imprescindible realizar una adecuada caracterización de cada sitio así como determinar las necesidades de abastecimiento de agua así como su uso potencial.

La construcción de presas de arena como las desarrolladas en Kenia, representan una opción adecuada que puede ser aplicada en los países de la región, por ser de bajo costo y fácil construcción. Representan además, una opción viable para las regiones rurales mejorando con ello la calidad de vida de dichas poblaciones.

Se identificaron algunas acciones de recarga ya realizadas países como Cuba y Jamaica. En el primer caso se mencionó al "dique sur" el cual consiste de un bordo que retiene el escurrimiento superficial y mediante pozos se introduce el agua al acuífero cárstico. Si bien se logró la recarga al acuífero se ocasionaron impactos ambientales. En el caso de Jamaica se han realizado pequeños proyectos de recarga en acuíferos cársticos.

La recarga constituye una opción viable para solucionar los problemas de intrusión salina de acuíferos costeros de la región.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- Apaza, I.D., 2006, Huarochiri: las Amunas, Recarga Artificial de Acuíferos en los Andes, Gestión Social del Agua y el Ambiente en Cuencas, Lima, Septiembre 2006.
- Asano T., 1985, Artificial Recharge of Groundwater, Butterworth Publishers, Stoneham, USA.
- Bouwer H., 2002, Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering, Hydrogeology Journal 10: 121-142.
- Cederstrom D. J., 1957, Geology and ground-water resources of the York-James península, Virginia, US Geological Survey: 237.
- Central Groundwater Board, 2000, Guide on artificial recharge to groundwater, Ministry of water resources, New Delhi, India.
- Dillon P.J., 2002, Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Proceedings of the 4th international symposium on artificial recharge of groundwater, ISAR -4. Adelaide, South Australia, Swets & Zeitlinger B.V.
- Dillon P., and Molloy R., 2006, Developing Aquifer Storage and Recovery (ASR) Opportunities in Melbourne, Technical Guidance for ASR, CSIRO Land and Water Client Report, February 2006.
- Dillon Peter, Pavelic, Page, Beringer, Ward, 2009, Managed Aquifer Recharge, Waterlines Report No. 13, February 2009, Australian Government, National water Commission (NWC).
- Gale Ian., 2005, Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in semi-arid areas, IAH - MAR, UNESCO IHP, Paris, France. (International Association of Hydrogeologists commission on Management of Aquifer Recharge IAH-MAR), www.iah.org/recharge, International Hydrological Programme (IHP) www.unesco.org/water/ihp.
- Groundwater primer

- Gutiérrez-Ojeda Carlos, 2009, [Powerpoint presentación].Curso- Taller III Aumento de oferta Hídrica. Tema: Recarga Artificial de Acuíferos. Presentado por el Centro Regional de Investigación para la Gestión Sostenible de los Recursos Hídricos en los Estados Insulares del Caribe, CEHICA, Auspiciado por el Centro de Zonas Áridas y Semiáridas de América latina y el Caribe, CAZALAC, el Plan Hidrológico Internacional (PHI/LAC) de La UNESCO, y el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, INDRHI, 2009.
- Hofkes E.H., Visscher J.T., 1986, Artificial Groundwater Recharge for water supply of medium-size communities in developing countries, International Reference Centre for Community Water Supply and Sanitation, The Hague, The Netherlands.
- IGRAC, <http://www.igrac.net/publications/156>
- IWMI, 2002, Innovations in Groundwater Recharge, IWMI-Tata Water Policy Program.
- Lisse, The Netherlands.
- Martinez C.R., 2006, Small-scale water harvesting techniques, Vrije Universiteit, Amsterdam.
- Nilsson A., 1988, Groundwater dams for small-scale water supply, IT Publications.
- Pyne R.D.G., 1995, Groundwater recharge and wells: A guide to aquifer storage recovery, CRC Press, Inc. Boca Raton, USA.
- Recharge Wells
- U.S.EPA, 1999, Preliminary Data Summary of Urban Storm Water Best Management Practices, EPA-821-R-99-012, Sections 5 and 6, Washington, DC.
- Todd D., 1980, Groundwater hydrology, John Wiley & Sons, New York, 535pp.
- Tuinhof Albert and Heederik Jan Piet, 2002, Management of Aquifer Recharge and Subsurface Storage Making Better Use of Our Largest Reservoir, Netherlands National Committee for the IAH.

Aumento de la Oferta Hídrica

- Tuinhof A., Heederik J.P., 2003, Management of Aquifer Recharge and Sub-surface Storage: making better use of our largest reservoir, Netherlands National Committee for the IAH, Utrecht, The Netherlands, www.bankfiltration.org
- Water Encyclopedia
- WaterAid, Technology Notes, www.wateraid.org
- Weber F., Hoskins M.W., 1983, Soil Conservation technical sheets, International Training Division / Office of International Cooperation and Development of the U.S. Department of Agriculture.
- Wood A., 1990, Natural resource management and rural development in Ethiopia, In Ethiopia: Rural Development Options, Pausewang S, Cheru F, Bruene S, Chole E (eds), Zed Books: London; 187-198.

CAPITULO V

APLICACION DE INDICE DE SUSTENTABILIDAD DE CUENCAS

Autores:
Ing. M.Sc.(c) A. Elizabeth Cortés e
Ing. Magister Jorge Nuñez
CAZALAC

5.1 GENERALIDADES

En 1992 la Declaración de Río de Janeiro sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo consagró los principios para un desarrollo sostenible, con lo cual se sentaron las bases de un nuevo marco de gobernabilidad ambiental, fundado en el derecho a un desarrollo que respondiese equitativamente a las necesidades de las generaciones presentes y futuras (Machinea et al, 2005). En esta primera reunión mundial se selló la definición de Desarrollo Sostenible como el que satisface las necesidades presentes sin afectar las capacidades de futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades.

Posteriormente, se estableció que el desarrollo humano sustentable es aquel que no solo genera crecimiento sino que distribuye equitativamente sus beneficios; que regenera el ambiente en lugar de destruirlo y que otorga poder a la gente en lugar de marginarla.

Estos conceptos han ido incorporándose paulatinamente en el área de los recursos hídricos, en especial bajo el concepto de Manejo Integrado de Cuencas o en conceptos más recientes como el de caudal ambiental, éste último asociado con un criterio de integración que va más allá del mero concepto de caudal ecológico, que en algunos casos fue expresado operacionalmente en no más que expresiones estadísticas asociadas un caudal de referencia.

La sustentabilidad, en los términos descritos, asociada a los recursos hídricos, cobra mayor importancia en regiones áridas y semiáridas del planeta, en que la oferta hídrica confronta altas demandas del recurso agua, que se reflejan en importantes niveles de presión, así como a una mayor exposición a situación de déficit producto de la alta variabilidad climática que caracteriza estas zonas geográficas.

La sustentabilidad en el uso y gestión de los recursos hídricos en regiones áridas y semiáridas debiese ser un criterio permanente de monitoreo y evaluación, con el objetivo de reducir la vulnerabilidad de estos sistemas a los eventos naturales así como a las amenazas antrópicas. Se hace necesario, por lo tanto, el tener herramientas que permitan cuantificar este concepto de sustentabilidad asociado a la gestión de recursos hídricos en zonas áridas. Una de estas herramientas la constituyen los denominados indicadores, cuyo propósito es representar, de manera cuantitativa, una serie de atributos que caracterizan el sistema analizado y que, contrastados con una escala de referencia, permiten establecer por un lado en qué estado se encuentra el sistema respecto a la condición de referencia, cómo ha sido su evolución y cuál es su estado potencial futuro.

El presente trabajo presenta como una herramienta útil con estos propósitos, el denominado Índice de Sustentabilidad de Cuencas (Chaves y Alipaz, 2007) el cual es concebido como una herramienta capaz de integrar información base, de relativo fácil acceso, con el fin de apoyar a los tomadores de decisiones y stakeholders en la gestión integrada de recursos hídricos a nivel de cuenca.

5.1.1 DESCRIPCIÓN DEL WSI

El Índice de Sustentabilidad de Cuencas, en adelante WSI por sus siglas en inglés (Watershed Sustainability Index) es un indicador que estima la sustentabilidad socioeconómica de una cuenca mediante la media aritmética de 4 indicadores, conforme a la ecuación 1:

$$WSI = (H + E + L + P) / 4 \quad (1)$$

Donde:

H es el indicador de hidrología (0 -1),

E es indicador de medioambiente (0 -1),

L es el indicador de vida humana (0-1) y

P es el indicador de políticas públicas (0-1)

Cada uno de los cuatro indicadores del WSI está, a su vez, integrado por una serie de parámetros en tres niveles relativos a los que los autores denominan la presión, el estado y la respuesta del sistema hídrico. Los parámetros utilizados de manera específica para la Cuenca de Elqui se presentan en la Cuadro 5.1. Los parámetros presentan cierta especificidad, por ejemplo, al utilizar como medida de calidad la conductividad eléctrica del agua tal como es propuesto originalmente por los autores.

Cada una de los parámetros presentes en la matriz Indicadores-Parámetros del Cuadro 5.1, es clasificada en niveles, los que se asocian a puntajes entre 0 y 1, siendo el WSI el promedio global de las líneas y columnas.

Cuadro 5.1
Indicadores y parámetros del WSI para los 3 niveles

| | Presión | Estado | Respuesta |
|------------------------------------|--|--|--|
| Indicador | Parámetros | | |
| Hidrology (hidrología) | Variación de la disponibilidad de agua <i>per cápita</i> en el período | Disponibilidad per cápita de agua en la cuenca | Evolución en la eficiencia del uso del agua en el período. |
| | Variación de la conductividad eléctrica del agua en el período de análisis, con relación al promedio | DBO ₅ de la cuenca (promedio de largo plazo) | Evolución en el tratamiento/disposición de aguas servidas en el período. |
| Environmental (ambiente) | EPI de la cuenca en el período | % de la cuenca con vegetación natural | Evolución en áreas protegidas en la cuenca. |
| Life (vida) | Variación del IDH-Ingreso de la cuenca en el período | IDH de la cuenca en el período anterior (ponderado) | Evolución del IDH de la cuenca en el período. |
| Policy (políticas) | Variación del IDH-Ed. en el período | Capacidad legal e institucional en GIRH en la cuenca en el período | Evolución de los gastos en GIRH en la cuenca en el período. |

Fuente: Chaves & Alipaz (2007).

Los cuadros 5.2, 5.3 y 5.4 presentan los niveles y puntajes para cada uno de los parámetros del WSI relativos a la Presión, el Estado y la Respuesta, respectivamente.

Cuadro 5.2
Parámetros de Presión del WSI, con niveles y puntajes

| | | PRESION | | |
|------------|------------------|---|------------------|-------|
| | Indicador | Parámetro | Nivel | Rango |
| HIDROLOGIA | CANTIDAD DE AGUA | Δ1- Variación de la disponibilidad de agua , en el periodo estudiado con respecto al promedio histórico (m3/año) | Δ1 < -20% | 0.00 |
| | | | -20% < Δ1 < -10% | 0.25 |
| | | | -10% < Δ1 < 0% | 0.50 |
| | | | 0 < Δ1 < +10% | 0.75 |
| HIDROLOGIA | CALIDAD DE AGUA | Δ2- Variación de la DBO5 en la cuenca, en el período estudiado en relación al promedio histórico | Δ2 > 20% | 0.00 |
| | | | 20% > Δ2 > 10% | 0.25 |
| | | | 0 < Δ2 < 10% | 0.50 |
| | | | -10% < Δ2 < 0% | 0.75 |
| AMBIENTE | E(ambiente) | EPI (Índice de Presión Antrópica) Describe la presión ejercida por el ambiente por las actividades humanas de la cuenca en un período | EPI > 20% | 0.00 |
| | | | 20% > EPI > 10% | 0.25 |
| | | | 10% < EPI < 5% | 0.50 |
| | | | 5% < EPI < 0% | 0.75 |
| VIDA | L(vida) | Variación en del IDH ingreso per cápita en la cuenca, en el periodo estudiado | EPI < 0% | 1.00 |
| | | | Δ < -20% | 0.00 |
| | | | -20% < Δ < - 10% | 0.25 |
| | | | -10% < Δ < 0% | 0.50 |
| POLITICAS | Políticas | Variación del IDH-Ed. en el periodo | 0 < Δ < +10% | 0.75 |
| | | | Δ > +10% | 1.00 |
| | | | Δ < -20% | 0.00 |
| | | | -10% < Δ < -20% | 0.25 |
| | | | -10% < Δ < 0% | 0.50 |

Cuadro 5.3
Parámetros de Estado del WSI, con niveles y puntajes.

| | | ESTADO | | |
|------------|------------------|--|--------------------|-------|
| | Indicador | Parámetro | Nivel | Rango |
| HIDROLOGIA | CANTIDAD DE AGUA | Wa - Disponibilidad de caudal promedio histórico en la cuenca (superf.+subterr), en relación con la población existente en ella. (m ³ /persona.año) | Wa < 1700 | 0.00 |
| | | | 1,700 < Wa < 3,400 | 0.25 |
| | | | 3,400 < Wa < 5,100 | 0.50 |
| | | | 5,100 < Wa < 6,800 | 0.75 |
| | | | Wa > 6800 | 1.00 |
| | CALIDAD DE AGUA | DBO5 - Promedio de la DBO5 en la cuenca (largo plazo), en mg/l | DBO>10 | 0.00 |
| | | | 10>DBO>5 | 0.25 |
| | | | 5>DBO>3 | 0.50 |
| | | | 3>DBO>1 | 0.75 |
| | | | DBO<1 | 1.00 |
| AMBIENTE | E(ambiente) | % de la vegetación natural remanente en la cuenca (Av) | Av < 5 | 0.00 |
| | | | 5 < Av < 10 | 0.25 |
| | | | 10 < Av < 25 | 0.50 |
| | | | 25 < Av < 40 | 0.75 |
| | | | Av > 40 | 1.00 |
| VIDA | L(vida) | IDH ponderado de cuenca, en el periodo anterior (ponderado) | IDH<0.5 | 0.00 |
| | | | 0.5 < IDH < 0.6 | 0.25 |
| | | | 0.6 < IDH < 0.75 | 0.50 |
| | | | 0.75 < IDH < 0.9 | 0.75 |
| | | | IDH > 0.9 | 1.00 |
| POLITICAS | Políticas | Capacidad legal e institucional en el manejo de los recursos hídricos en la cuenca (existe marco legal, marco institucional y manejo de la o participación) | Muy pobre | 0.00 |
| | | | Pobre | 0.25 |
| | | | Regular | 0.50 |
| | | | Buena | 0.75 |
| | | | Excelente | 1.00 |

Cuadro 5.4.
Parámetros de Respuesta del WSI, con niveles y puntajes.

| | | RESPUESTA | | |
|------------|------------------|---|------------------------|-------|
| | Indicador | Parámetro | Nivel | Rango |
| HIDROLOGIA | CANTIDAD DE AGUA | Acciones o mejoras en el manejo del recurso hídrico en la cuenca del periodo estudiado con respecto al histórico. | Muy pobre | 0.00 |
| | | | Pobre | 0.25 |
| | | | Regular | 0.50 |
| | | | Buena | 0.75 |
| | | | Excelente | 1.00 |
| | CALIDAD DE AGUA | Evolución en el tratamiento y disposición de aguas servidas en la cuenca, en los últimos 5 años. | Muy pobre | 0.00 |
| | | | Pobre | 0.25 |
| | | | Regular | 0.50 |
| | | | Buena | 0.75 |
| | | | Excelente | 1.00 |
| AMBIENTE | E(ambiente) | Evolución en las áreas protegidas (áreas de reservas) en la cuenca, en el período. | $\Delta < -10\%$ | 0.00 |
| | | | $-10\% < \Delta < 0\%$ | 0.25 |
| | | | $0\% < \Delta < 10\%$ | 0.50 |
| | | | $10\% < \Delta < 20\%$ | 0.75 |
| | | | $\Delta > 20\%$ | 1.00 |
| VIDA | L(vida) | Variación en el IDH en la cuenca, en el periodo (ponderado) | $\Delta < -10\%$ | 0.00 |
| | | | $-10\% < \Delta < 0\%$ | 0.25 |
| | | | $0\% < \Delta < 10\%$ | 0.50 |
| | | | $10 < \Delta < 20\%$ | 0.75 |
| | | | $\Delta > 20\%$ | 1.00 |
| POLITICAS | Políticas | Evolución en la inversión monetaria en el manejo integrado de los recursos de agua(durante periodo anterior v/s actual)en la cuenca | $\Delta < -10\%$ | 0.00 |
| | | | $-10\% < \Delta < 0\%$ | 0.25 |
| | | | $0\% < \Delta < 10\%$ | 0.50 |
| | | | $10 < \Delta < 20\%$ | 0.75 |
| | | | $\Delta > 20\%$ | 1.00 |

El valor final del WSI surge, por tanto, de la cuantificación que haga el analista de cada uno de los atributos presentes en cada una de los cuadros presentados previamente. Una vez obtenido este valor, será contrastado respecto a una escala de referencia que indica el grado de sustentabilidad que presenta la cuenca analizada. Los rangos utilizados con este propósito se presentan en el cuadro 5.5 siguiente:

Cuadro 5.5.
Rango de Sustentabilidad

| Baja | Intermedia | Alta |
|---------|-------------|---------|
| WSI<0.5 | 0.5<WSI<0.8 | WSI>0.8 |

Para su correcta utilización, Chaves y Alipaz (007) recomiendan que el WSI sea calculado a intervalos de cada 5 años, lo cual surge de un compromiso entre disponibilidad de información, posibilidad de evaluar el efecto de políticas aplicadas en el rango habitual de gestión de los gobiernos, tasas de cambio de la tecnología, variabilidad climática, etc.

5.1.2 CONTEXTO DE LA APLICACIÓN DEL INDICE DE SUSTENTABILIDAD DE CUENCAS (WSI)

El Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO (PHI), a través de su Programa de Hidrología, Ambiente, Vida y Políticas (HELP), contempla establecer una red mundial de cuencas para mejorar los enlaces entre hidrología y las necesidades de la sociedad. En este contexto, HELP inició la búsqueda de un índice que estuviera más acorde con su estrategia de desarrollo. Es así, que con este propósito, optó por el Índice de Sustentabilidad de Cuencas –WSI de Chaves y Alipaz (2007), que considera en su formulación, los factores de hidrología, medioambiente, vida y política, con el fin de establecer una dimensión integral que refleje el estado en el cual se encuentra la gestión de una cuenca en análisis.

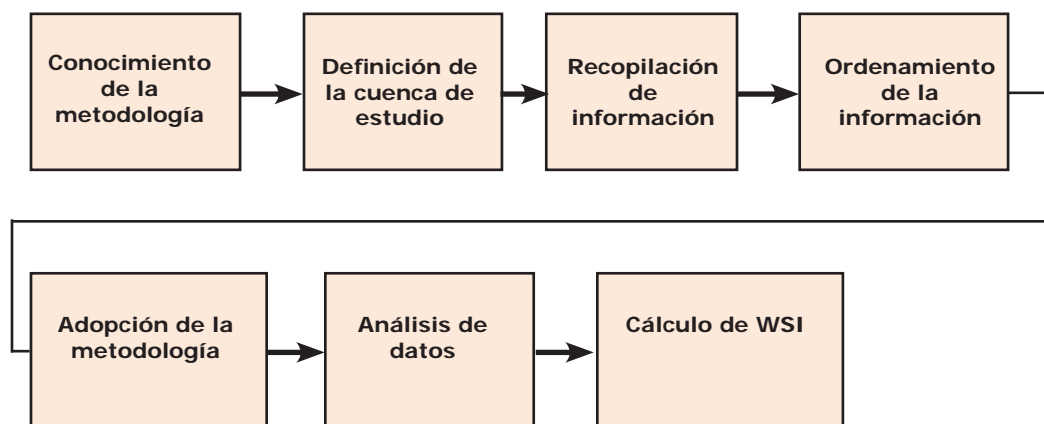
En el año 2008, la cuenca de Elqui, ubicada administrativamente en la provincia del mismo nombre, perteneciente a la Región de Coquimbo, en la zona semiárida de Chile, a la altura de la latitud 30° Sur, se constituyó en una nueva cuenca del programa HELP. En este contexto, una de las iniciativas iniciales fue la de evaluar la sustentabilidad con la cual la cuenca estaba siendo manejada, mediante el uso del WSI como medida de referencia. Su aplicación se desarrolló en el contexto de la denominada Mesa Regional del Agua de la Región de Coquimbo, iniciativa destinada a generar un espacio de expresión, discusión y consulta a todos los usuarios del agua en esta región. Por lo tanto, la determinación del WSI para la cuenca de Elqui, representa no sólo un valor numérico, sino que refleja el nivel de consenso de los usuarios de aguas en la región respecto a lo que éstos entienden sobre la sustentabilidad con la cual está siendo manejada la Cuenca de Elqui. Con fines ilustrativos a continuación se presentan algunas imágenes de la Cuenca Elqui.



5.2 METODOLOGIA PARA DETERMINAR EL WSI EN LA CUENCA DE ELQUI

Las etapas desarrolladas para la determinación del WSI en la Cuenca de Elqui se presentan en el siguiente esquema.

Figura 5.1
Esquema de Metodología



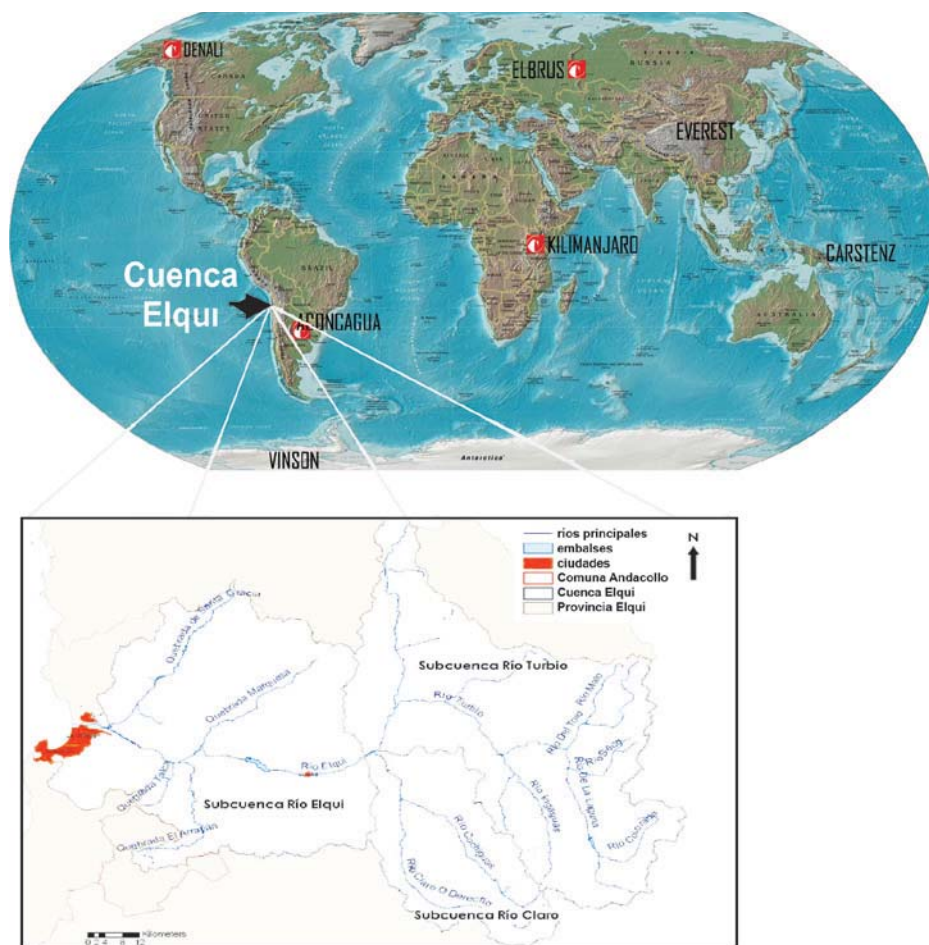
5.3 DETERMINACIÓN DEL WSI PARA LA CUENCA DE ELQUI

5.3.1. DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA DE ELQUI

El área de estudio corresponde a la cuenca hidrográfica del Río Elqui, la cual se ubica administrativamente en la Región de Coquimbo y forma parte de la Red Internacional de Cuencas HELP (Figura 5.2). La cuenca se ubica aproximadamente entre los paralelos 29°34' y 30°27' de latitud sur y meridianos 71°22' -69°52' longitud Oeste. Limita al norte con las cuencas Río Huasco, quebrada de Los Choros, Honda y Chacay, al Sur con la cuenca del Río Limarí y las cuencas costeras de las Quebradas El Culebrón y Lagunillas. Al Este limita con la Republica Argentina y al Oeste con el Océano Pacífico.

Figura 5.2.

Ubicación de la cuenca Elqui, perteneciente a la red de cuencas HELP



La cuenca tiene régimen fluvio-nival y cuenta con un área de drenaje de 9826 km². Está compuesta por tres subcuencas: la del Río Turbio, la del Río Claro y la del Río Elqui. El Río Elqui nace de la confluencia de los ríos Claro y Turbio, estos últimos de régimen nival.

5.3.2. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS EXISTENTES

La información requerida para cuantificar las variables que considera el WSI fue obtenida de referencias bibliográficas así como de instituciones públicas y privadas de la Región de Coquimbo.

5.3.3. ORDENAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Se realizó un esfuerzo sustantivo para transformar la información disponible en los formatos, unidades y magnitudes que permitieran su utilización en los procedimientos de cálculo. En algunos casos, se evaluó la posibilidad de reemplazar alguna variable no disponible por otra que pudiese ser equivalente. Por ejemplo, el cálculo del WSI en su forma original, incluye en la variable calidad del agua, el uso de la DBO5. Al no disponer de esta información para la cuenca de Elqui, se optó por reemplazarla por la Conductividad Eléctrica del agua. Esto no altera en absoluto el procedimiento, pues el WSI se basa más en cambios o diferenciales que magnitudes absolutas, facilitando este tipo de reemplazo de variables.

5.3.4. TALLER DE VALIDACIÓN DEL WSI ANTE LA MESA REGIONAL DEL AGUA DE LA REGIÓN DE COQUIMBO

Después de la recopilación y ordenamiento de la información se realizó un taller para el "Cálculo Preliminar del Índice de Sustentabilidad en la Cuenca Elqui". En dicha actividad participó el creador de esta metodología, el Dr. Henrique Chaves, quien proporcionó algunos lineamientos de acuerdo a la realidad específica de la cuenca, los que se detallan a continuación:

- En cuencas semiáridas y áridas, se realiza un análisis único, no es necesario subdividir en subcuencas. No así, en casos de cuencas húmedas donde la cuenca se divide en subcuenca de un área máxima de 2,200 km²
- Referente al indicador de calidad se recomendó la utilización de un parámetro alternativo; el más crítico según análisis de información disponible para la cuenca de Elqui, para ser utilizado como una medida de la calidad del agua.

5.4.- RESULTADOS

En función de la disponibilidad de datos y otros aspectos logísticos, el periodo de análisis, definido por la Mesa Regional del Agua para la aplicación del WSI en la Cuenca del Río Elqui, fue el comprendido entre 2001 y 2005. Se presenta a continuación los resultados para cada Indicador "HELP" según los 3 niveles de cada uno de los parámetros analizados.

5.4.1 INDICADOR DE HIDROLOGÍA

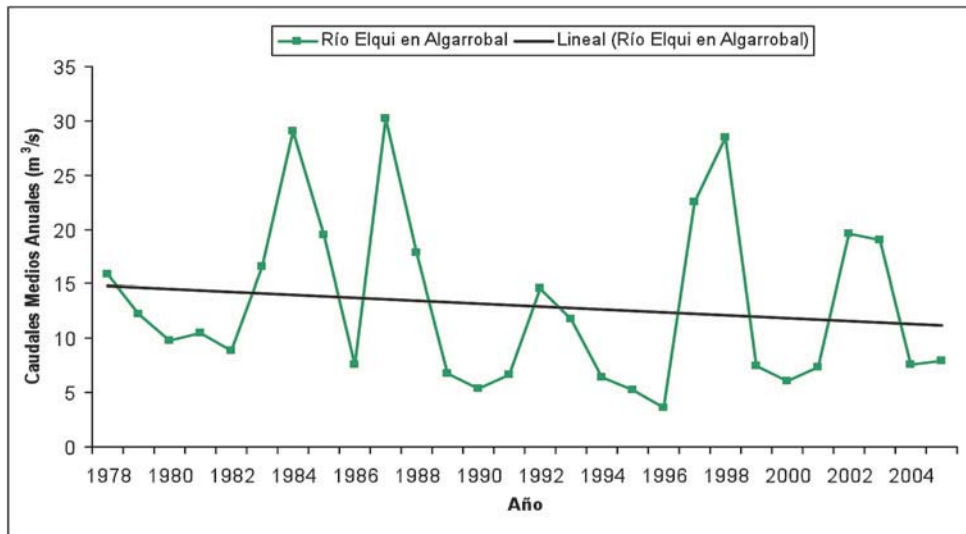
Los parámetros relativos al indicador de hidrología se refieren a cantidad y calidad.

HIDROLOGÍA- CANTIDAD

a) Presión- variación de la disponibilidad de agua

Se asumió que la disponibilidad de agua total en la Cuenca de Elqui es la suma de los aportes totales netos (aguas superficiales y subterráneas). En este caso se consideró para el cálculo los registros de caudales medios anuales de la estación Algarrobal (bajo la confluencia de los Ríos Turbio y Claro, que dan origen al Río Elqui) que corresponden a 12,9 m³/s para el periodo de largo plazo (1978-2005) presentando en la Figura 5.3 y 12,2 m³/s periodo de corto plazo (2001-2005). En el caso de aguas subterráneas se consideró los derechos inscritos de aprovechamiento los que corresponden a 7956,73 acciones, equivalentes a 7,9 m³/s.

Figura 5.3.
Caudales medios anuales de periodo de largo plazo, Cuenca Elqui



Con estos datos, se calcula el valor de la variable cantidad según se presenta en el cuadro 5.6.

Cuadro 5.6.

Caudales medios anuales netos de largo y corto plazo, aportados por la cuenca Elqui y la variación relativa entre los 2 periodos

| Caudal Medio Anual 1978-2005 (m ³ /seg.) | Caudal Medio Anual 2001-2005 (m ³ /seg.) | Variación Relativa |
|---|---|--------------------|
| 20,8 | 20,1 | -3,3% |

Remplazando:

$$\Delta_1 = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} * 100 = \left[\frac{20,1 - 20,8}{20,8} \right] * 100 = -3,3\%$$

Donde:

Δ_1 = Variación del caudal medio anual (%)

Q_2 = Caudal medio anual del periodo de largo plazo, m³/s

Q_1 = Caudal medio anual del periodo de corto plazo, m³/s

De acuerdo a la metodología del WSI, cuadro 5.2, a este valor le corresponde un puntaje de 0,5, indicando que la disponibilidad del agua ha ido disminuyendo en los últimos años, tomando como base el promedio de largo plazo.

b) Estado- disponibilidad per cápita de agua en la cuenca

La disponibilidad de agua (Wa) en la cuenca corresponde a la división entre el promedio histórico del agua disponible y la población existente de la cuenca. Se asume que la población que habita en esa área es la que consume el recurso disponible. La población proyectada el 2005 fue de 237.135 habitantes, en el área de influencia de la cuenca de Elqui, que utiliza el agua con fines de abastecimiento de agua potable, agricultura, minería y otros usos.

$$Wa = \frac{Q_i}{\text{Población de cuenca}}$$

Donde:

Wa = Disponibilidad per cápita de agua en la cuenca-Superficial- Subterránea (m³/persona/año)

Remplazando se tiene:

$$Wa = \frac{20,94\text{m}^3/\text{seg} * 3600\text{seg} * 24\text{h} * 365\text{d}}{237.135 \text{ hab}} = 2785\text{m}^3/\text{hab.año}$$

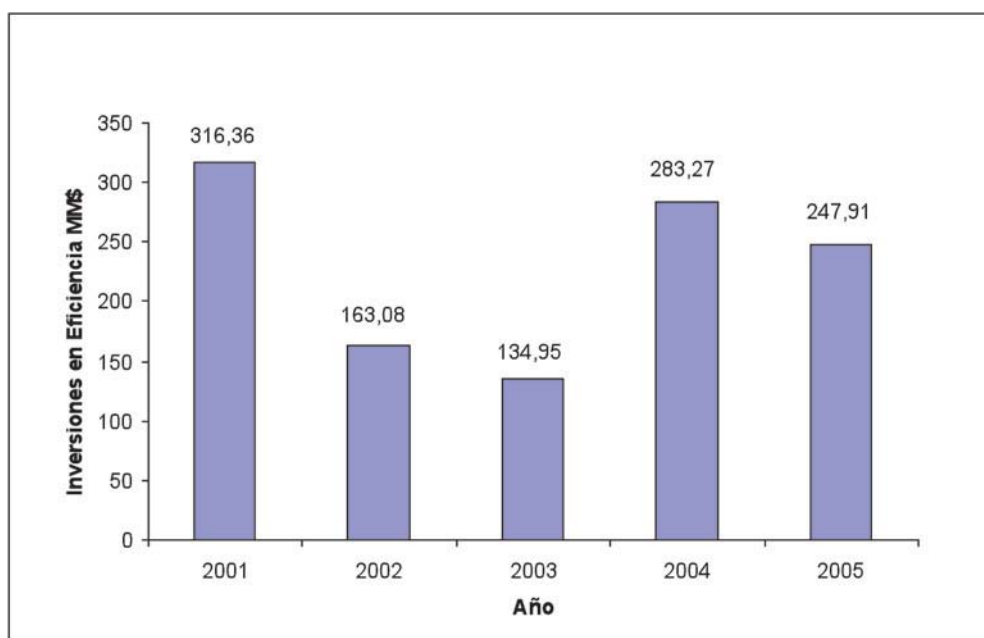
A esta disponibilidad de agua le corresponde un puntaje de 0,25, de acuerdo con la clasificación de Chaves y Alipaz (2007).

c) Respuesta- evolución en la eficiencia del uso del agua

En relación con el parámetro Cantidad- Respuesta, las inversiones en la cuenca en el periodo 2001 al 2005 fueron moderadas, considerando que entre el año 1995-2000 se construyó el embalse de acumulación interanual Puclaro, con una capacidad de 220 millones de m³. Se proyectaba que gracias a esta obra mayor se produciría un impulso a la inversión en obras mayores de regadío. Sin embargo, esto no aconteció, puesto que no aumentaron las inversiones en obras mayores de regadío en el periodo, tal como se presenta en la Figura 5.4.

Figura 5.4.

Inversiones realizadas en eficiencia hídrica en el periodo de estudio.



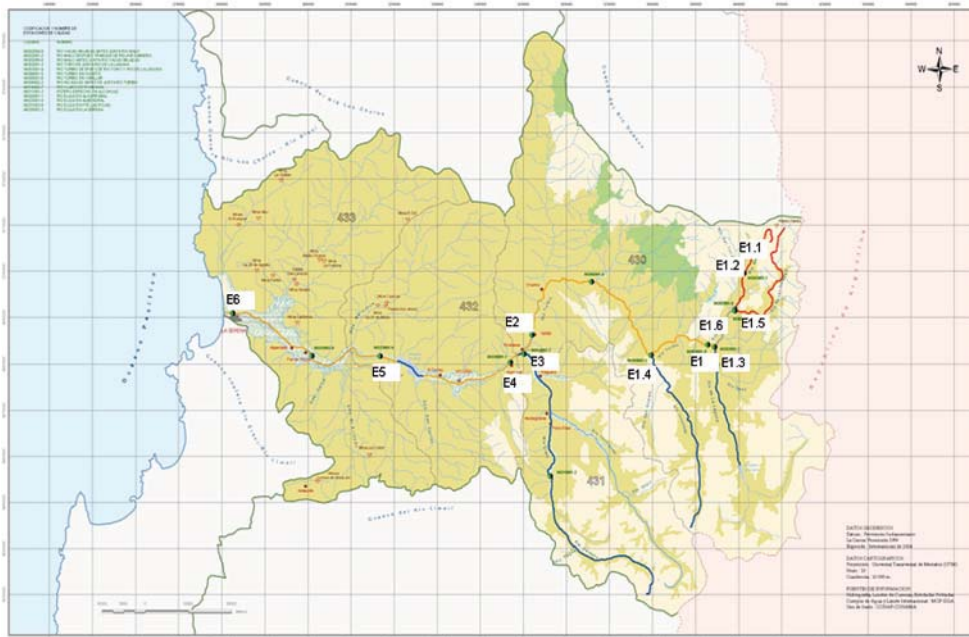
Donde sí hubo un incremento en la inversión fue en obras de tecnificación de riego a nivel predial, principalmente mediante la instalación de sistemas de riego por goteo para el sector frutícola. Donde sí hubo un aumento fue en la superficie con riego tecnificado, posibilitando un incremento en la eficiencia de riego a nivel predial. Con estos antecedentes, se supuso una clasificación de regular, equivalente a un puntaje de 0,5 para el parámetro Cantidad- Respuesta en el periodo de estudio.

HIDROLOGÍA-CALIDAD

Para el análisis de la variable calidad se utilizó información proveniente de la Dirección General de Aguas de la Región. Esta es la institución estatal encargada de la administración general de los recursos hídricos en el país, teniendo además, a atribución de monitorear parámetros relacionados con la cantidad, así como la calidad de las fuentes de agua superficial y subterránea. Se utilizó información del periodo 1981 al 2007.

Debido a la no disponibilidad de datos de demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), como se sugiere en Chaves y Alipaz (2007); se realizó un análisis de la información sobre parámetros de calidad de agua disponibles en la cuenca. Posteriormente, se seleccionó un parámetro lo suficientemente representativo para su utilización en el WSI. En la Figura 5.5 se muestran las 12 estaciones de monitoreo de calidad de la Cuenca del Río Elqui, que fueron seleccionadas para su análisis.

Figura 5.5
Ubicación de las estaciones de monitoreo seleccionadas de la cuenca del Río Elqui.



De los diagramas de stiff obtenidos en diferentes años (1999- 2001 y 2006) se pudo establecer el tipo de agua que caracteriza cada estación de monitoreo. Basado en el análisis de la información disponible, el uso de diagramas de Stiff, para las 12 estaciones en el periodo 1999-2001 y 2006, se obtuvo una caracterización de la calidad del agua a lo largo de la cuenca. Con estos antecedentes, la conductividad eléctrica del agua fue seleccionada como el parámetro de calidad representativo.

Para la designación de los niveles y puntajes del nuevo parámetro en la condición Estado del WSI, se consideró la situación límite dándole un rango de 0,5. Puntajes bajos (0-0,49) indican problemas de calidad de las aguas y puntajes altos (0,51-1) indican una mejor calidad. En este caso se consideraron los límites dispuestos en la Norma Chilena NCh N°1333 (>750umhos/cm) y en las Guías para la Calidad del Agua Potable OMS (500-160 umhos/cm) así como en Anteproyecto de Norma Secundaria Calidad de Agua C4 (>2500 umhos/cm). A continuación se presenta en el cuadro 5.7 los niveles y rangos del parámetro conductividad eléctrica.

Cuadro 5.7

Parámetro de Estado del WSI, Indicador Hidrología- Calidad de Agua

| Indicador | Parámetro | Nivel | Puntaje |
|-----------------|--|-------------------------|---------|
| CALIDAD DE AGUA | Conductividad - Eléctrica del agua, Promedio en la cuenca (largo plazo) mg/l | 2250<Conductividad | 0.00 |
| | | 1600<Conductividad<2250 | 0.25 |
| | | 750<Conductividad<1600 | 0.50 |
| | | 600<Conductividad<750 | 0.75 |
| | | Conductividad<600 | 1.00 |

a) Presión- Variación de la conductividad

Para su cálculo se consideró el promedio anual de todas las estaciones entre el periodo de largo plazo (1990-2005) y el periodo de estudio (2001-2005). En el cuadro 5.8 se presenta el promedio de la C.E. y su variación en el periodo de estudio.

Cuadro 5.8.

Promedio de la conductividad eléctrica del agua de largo y corto plazo, aportados por la cuenca Elqui y la variación relativa entre los 2 periodos

| Conductividad Promedio 1990-2005 (umhos/cm) | Conductividad Promedio 2001-2005 (umhos/cm) | Variación Relativa % |
|---|---|----------------------|
| 1524,5 | 1523,0 | -0,10 |

De donde se tiene:

$$\Delta_2 = \left[\frac{1523,1-1524,5}{1524,5} \right] * 100 = -0,13\%$$

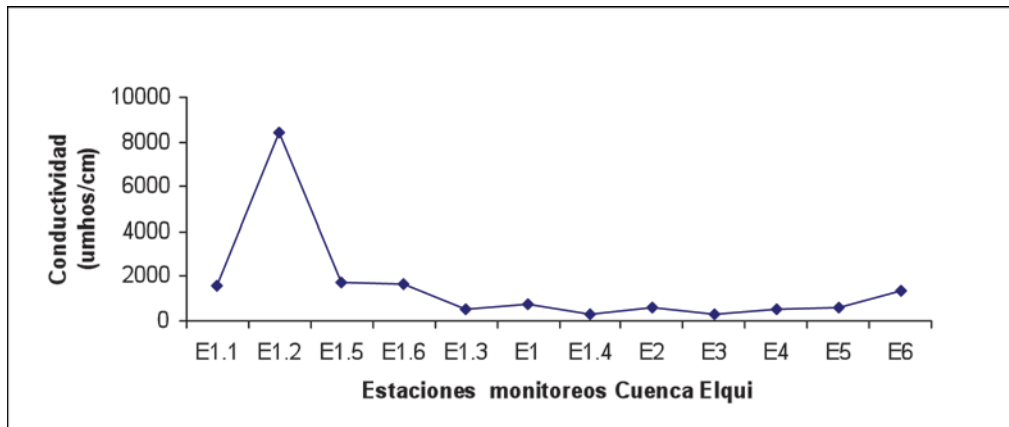
De acuerdo a la metodología del WSI, este valor es “bueno”, y le corresponde un puntaje de 0,75; indicando que la calidad del agua ha ido mejorando en los últimos años, tomando como base el promedio de largo plazo. Este resultado pudiese explicarse, en parte, por el término de faenas de la Minera El Indio en 2002, que pudo haber reducido la cantidad de metales disueltos en el agua, disminuyendo así la conductividad eléctrica de la misma.

b) Estado- Conductividad en la cuenca.

El promedio anual de conductividad de largo plazo entre 1990 y 2005 es de 1524,6 (umhos/cm), equivalente a un puntaje de 0,5 de acuerdo con el cuadro 5.7. Esto indica una condición “regular” en el periodo de largo plazo. A continuación, en la Figura 5.6, se presenta la variación de la conductividad a lo largo de la cuenca.

Figura 5.6

Variación de la conductividad eléctrica promedio de largo plazo del agua según estación de monitoreo



c) Respuesta - tratamiento y disposición de aguas servidas en la cuenca.

En relación con el parámetro de Calidad- Respuesta, las inversiones en la cuenca durante el periodo 2001 y 2005 se consideraron permanentes o regulares, ello debido a que las inversiones en sistema de alcantarillado no han cubierto la demanda total de la cuenca (solo el 70% de estas localidades han sido implementadas).

Es importante considerar que el año 2000, empezó a regir el Decreto Supremo N° 90, Normas de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales, el cual regulariza todos los vertidos que son emitidos a los cuerpos de aguas. Dicha norma costo empezar a implementarla en los años 2001-2005. A este parámetro se le asignó un puntaje de 0.5.

Resumen de los parámetros hidrológicos de la cuenca

En el cuadro 5.9 se presenta el resumen de los puntajes obtenidos por el indicador hidrología.

Cuadro 5.9.

Resumen de los parámetros hidrológicos estimados para la cuenca del río Elqui, en el periodo 2001-2005.

| Parámetro Hidrología | Presión | | Estado | | Respuesta | |
|----------------------|---------|---------|----------|---------|-----------|---------|
| | Valor | Puntaje | Valor | Puntaje | Valor | Puntaje |
| Cantidad | -3.3% | 0.5 | 2,785 | 0.25 | Regular | 0.5 |
| Calidad | 0% | 0.75 | 1,524.27 | 0.5 | Regular | 0.5 |

5.4.2 INDICADOR MEDIOAMBIENTAL

a) Presión - Índice de Presión Antrópica en la cuenca

Debido a que no se cuenta con información en el periodo de estudio y sólo se dispone de información proveniente de los Censos Agropecuarios Nacionales (INE) de los años 1997 y 2007, se utilizó esta información en el procedimiento de cálculo. El cuadro 5.10 presenta las variaciones de uso de suelo antrópico en la cuenca.

Cuadro 5.10
Usos de Suelo antrópico

| Usos de Suelo | 1997 | % | 2007 | % |
|-------------------------------|----------------|-----------|----------------|-------------|
| Cultivos anuales | 11,860 | 1,2 | 13,708 | 1,2 |
| Forrajes permanentes | 739 | 0,1 | 3,150 | 0,3 |
| En barbecho | 9,057 | 0,9 | 5,245 | 0,5 |
| Praderas Mejoradas | 1,133 | 0,1 | 170 | 0,0 |
| Plantaciones Forestales | 678 | 0,1 | 1,051 | 0,1 |
| Infraestructura | 910 | 0,1 | 704 | 0,1 |
| Terrenos estériles | 268,971 | 26,2 | 284,338 | 25,9 |
| Total Áreas Antrópicas | 293,347 | 29 | 308,367 | 28,1 |

El cálculo del Índice de Presión Antrópica en la cuenca es:

$$\%Var. Antrópica = 100 * \frac{Áreas Ant2007 - Áreas Ant1997}{Áreas Ant1997} * 100 = 5,1\%$$

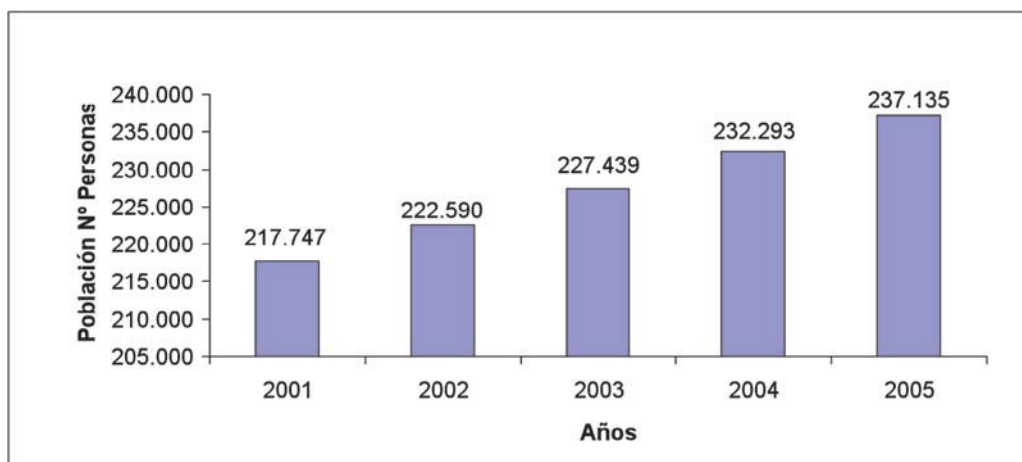
$$\%Var. Antrópica = 100 * \frac{308367 - 293347}{293347} * 100 = 5,1\%$$

O sea, una variación de 5,1% en 10 años.

Una segunda información necesaria para la estimación del Índice de Presión Antrópica es la variación de la población humana en la cuenca, en el periodo en estudio. De acuerdo con la Figura 5.7, la variación poblacional en la cuenca entre el periodo 2001-2005 fue de 19.388 habitantes, representando un incremento poblacional de 8,9%. Aplicando ambos valores se calcula el Índice de Presión Antrópica (EPI) donde se obtuvo lo siguiente:

Figura 5.7

Población en el área de influencia cuenca Elqui periodo (2001-2005)



$$EPI = \frac{\%var.AreasAgropecuarias + \%AreasPobladas}{2} = 7\%$$

El Índice de Presión Antrópica en el periodo base (2001-2005) fue de 7%, siendo este el parámetro de medioambiente – Presión.

b) Estado - Porcentaje de Vegetación Natural en la Cuenca

Se asume como “vegetación natural” la correspondiente a bosques nativos, praderas naturales y matorrales. En el cuadro 5.11 se presenta la distribución y variación de éstas coberturas entre 1997 y 2007. La vegetación natural representa en promedio un 71,5 % de la superficie de la cuenca. Este valor es mayor al 40%, lo que corresponde a un porcentaje “elevado”, indicando una buena protección a los recursos hídricos. Por este motivo, se asigna al parámetro un puntaje de 1.

Cuadro 5.11.
Usos de Suelo, vegetación natural

| Usos de Suelo | 1997 | % | 2007 | % |
|---------------------------------|----------------|-----------|----------------|-----------|
| Praderas Naturales | 730,774 | 71.07 | 790,573 | 72.0 |
| Bosque Nativo Matorrales | 935 | 0.09 | 984 | 0.1 |
| Total Vegetación Natural | 731,709 | 71 | 791,557 | 72 |

c) Respuesta-Evolución de zonas de conservación en la cuenca.

La cuenca del Río Elqui no posee áreas bajo protección oficial pertenecientes al Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado, SNASPE. Los sitios prioritarios de conservación de la biodiversidad existente en la cuenca están incluidos en el documento “Estrategia Regional y Plan de Acción de la Biodiversidad IV Región de Coquimbo”, no obstante estas áreas no son de protección oficial o legal, por lo tanto no pasan de ser solo propuestas de conservación. Debido a esto se considera un valor de 0, equivalente a una condición “regular”.

Resumen del Indicador Medioambiente.

En el cuadro 5.12 se presenta el resumen del puntaje del indicador medio ambiente.

Cuadro 5.12
Resumen Indicador de Medio- Ambiente Cuenca Elqui

| Parámetro | Presión | | Estado | | Respuesta | |
|---------------|---------|---------|--------|---------|-----------|---------|
| | Valor | Puntaje | Valor | Puntaje | Valor | Puntaje |
| Medioambiente | 7% | 0,5 | 71,5% | 1 | 0 | 0,25 |

5.4.3 INDICADOR DE VIDA HUMANA

Los parámetros del indicador de Vida Humana se obtuvieron de PNUD (1994,1998, 2004).

a) Presión - Variación Índice de Desarrollo Humano (IDH)-Ingreso

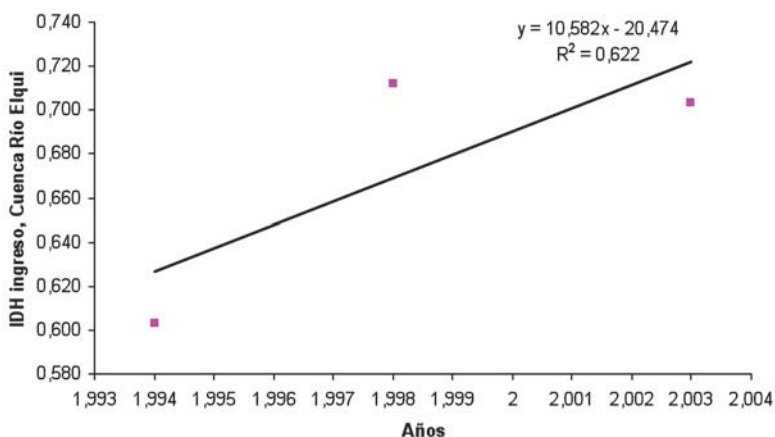
Este parámetro está representado por la variación del ingreso *per cápita* en la cuenca del Río Elqui, en el periodo de estudio (2001-2005). El cuadro 5.13 presenta el ingreso *per cápita* de cada una de las comunas consideradas en la cuenca del Río Elqui en los años 1994-1998-2003. Debido a que fueron los únicos años en que se midió, se extrapoló los valores para el resto de los años en el periodo de estudio.

Cuadro 5.13
IDH-Ingreso cuenca Elqui

| COMUNAS | 1994 | | | 1998 | | | 2003 | | |
|----------------------------|----------|--------|-----------|----------|--------|-----------|----------|---------|-----------|
| | IDH(Ing) | Pobl | IDH *Pobl | IDH(Ing) | Pobl | IDH *Pobl | IDH(Ing) | Pobl | IDH *Pobl |
| La Serena | 0,629 | 137456 | 86460 | 0,742 | 154753 | 114827 | 0,729 | 176.876 | 128943 |
| Vicuña | 0,53 | 22801 | 12085 | 0,616 | 23967 | 14764 | 0,62 | 25.129 | 15580 |
| Paiguano | 0,538 | 3961 | 2131 | 0,654 | 4153 | 2716 | 0,63 | 4.321 | 2722 |
| Coquimbo (*) | 0,588 | 8753 | 5146 | 0,66 | 9862 | 6509 | 0,631 | 11.218 | 7079 |
| Andacollo | 0,477 | 11524 | 5497 | 0,564 | 10831 | 6109 | 0,558 | 9.895 | 5521 |
| TOTAL | | 184495 | 111319 | | 203566 | 144924 | | 227.439 | 159845 |
| IDH(i) Cuenca Elqui | | | 0,603 | | | 0,712 | | | 0,703 |

Los valores de ingreso promedio para la Cuenca del Río Elqui fueron obtenidos ponderando los valores de ingreso comunal en cada año con la respectiva población comunal. Con los datos disponibles, se trazó una recta de regresión lineal simple, que se presenta en la Figura 5.8.

Figura 5.8



Línea de tendencia IDH, cuenca Elqui

Una vez ajustada, se utilizó la ecuación de la recta para proyectar los IDH de ingreso para los años 2001 y 2005 y determinar finalmente la variación en el periodo. Reemplazando en la ecuación los años 2001 y 2005 se tiene:

$$IDHi = 0,01058 * \text{año} - 20,474$$

$$IDHi_{2001} = 0,701$$

$$IDHi_{2005} = 0,743$$

$$\Delta_1 = \frac{IDHi_2 - IDHi_1}{IDHi_1} * 100 = \left[\frac{0,743 - 0,701}{0,701} \right] * 100 = 6\%$$

Donde:

Δ_1 = Variación del ingreso per capita en la cuenca en el período (%)

$IDHi_2$ = IDH-Ingreso por persona al final del periodo estudiado.

$IDHi_1$ = IDH ingreso por persona al inicio del periodo estudiado

De esta manera el ingreso promedio de la cuenca durante los años 2001-2005, represento un aumento de 6,0%. A este valor le corresponde un puntaje de 0,75 para el parámetro de Vida- Presión.

b) Estado Parámetro de Vida- Estado

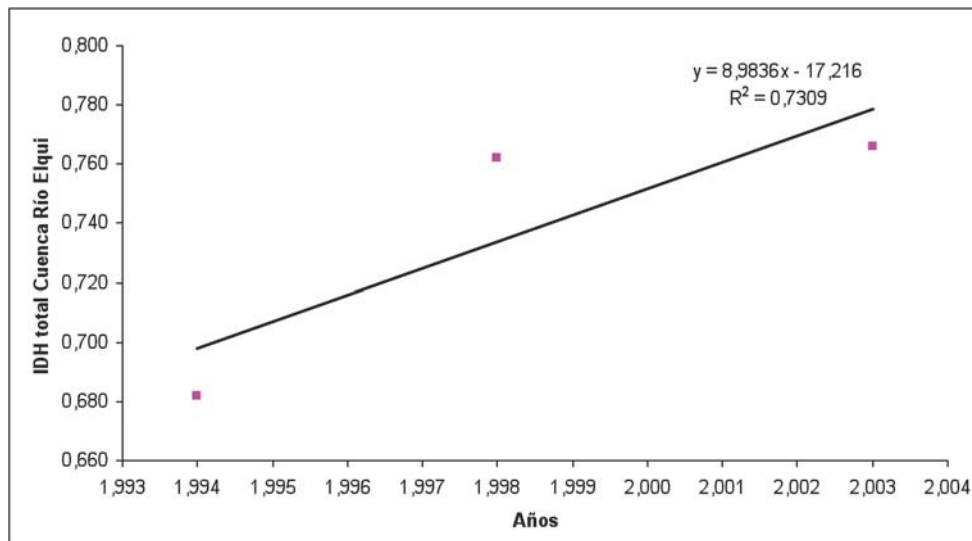
Este parámetro es el Índice de Desarrollo Humano de la cuenca en el último año del periodo de estudio (2005). A partir de la información registrada en los años 1994, 1998 y 2003 se obtuvo el IDH ponderal según la población cada comuna en el año correspondiente (Ver cuadro 5.14).

Cuadro 5.14
IDH total ponderado años 1994, 1998 y 2003 de la cuenca Elqui

| COMUNA | 1994 | | | 1998 | | | 2003 | | |
|-------------------------|-------|--------|-----------|-------|--------|-----------|-------|---------|-----------|
| | IDH | Pobl | IDH *Pobl | IDH | Pobl | IDH *Pobl | IDH | Pobl | IDH *Pobl |
| La Serena | 0,7 | 137456 | 96219 | 0,778 | 154753 | 120398 | 0,781 | 176.876 | 138140 |
| Vicuña | 0,653 | 22801 | 14889 | 0,709 | 23967 | 16993 | 0,716 | 25.129 | 17992 |
| Paiguano | 0,586 | 3961 | 2321 | 0,722 | 4153 | 2998 | 0,734 | 4.321 | 3172 |
| Coquimbo | 0,681 | 8753 | 5960 | 0,735 | 9862 | 7248 | 0,731 | 11.218 | 8201 |
| Andacollo | 0,563 | 11524 | 6488 | 0,694 | 10831 | 7517 | 0,675 | 9.895 | 6679 |
| TOTAL | | 184495 | 125878 | | 203566 | 155154 | | 227.439 | 174184 |
| IDH Cuenca Elqui | | | 0,682 | | | 0,762 | | | 0,766 |

El IDH para los años 2001 y 2005 se obtuvo mediante extrapolación a partir de la recta de regresión de mejor ajuste, presentada en la Figura 5.9.

Figura 5.9
Evolución del IDH de la Cuenca del Río Elqui entre 1994 y 2004



Aumento de la Oferta Hídrica

La ecuación obtenida para el IDH en función del tiempo es:

$$IDH = 0,00898 * \text{año} - 17,216$$

$$IDH_{2001} = 0,760$$

$$IDH_{2005} = 0,796$$

El IDH de la Cuenca del Río Elqui presenta un valor de 0,796 en el año 2005, lo que corresponde a un puntaje de 0,75 para el parámetro Vida – Estado.

c) Respuesta – Variación IDH ponderado Cuenca

La variación en el IDH de la Cuenca del Río Elqui en el periodo (2001-2005) fue:

$$\%Var.IDH = \frac{IDH_{2005} - IDH_{2001}}{IDH_{2001}} * 100$$

$$\%Var.IDH = \frac{0,796 - 0,760}{0,760} * 100 = 4,72\%$$

A esta variación le corresponde un puntaje de 0,5.

Resumen del indicador Vida del WSI

En la cuadro 5.15 se presenta el resumen de puntajes para el Indicador Vida.

Cuadro 5.15
Resumen del Indicador Vida cuenca Elqui

| Parámetro | Presión | | Estado | | Respuesta | |
|-----------|---------|---------|--------|---------|-----------|---------|
| | Valor | Puntaje | Valor | Puntaje | Valor | Puntaje |
| Vida | 6.041% | 0.75 | 0.796 | 0.75 | 4.72% | 0.5 |

5.4.4 INDICADOR DE POLÍTICAS PÚBLICAS

Para estos cálculos se dispuso de información de la PNUD, Gobierno Regional de la Región de Coquimbo y aquella proporcionada por los participantes de la Mesa Regional del Agua.

a) Presión – Variación IDH educación

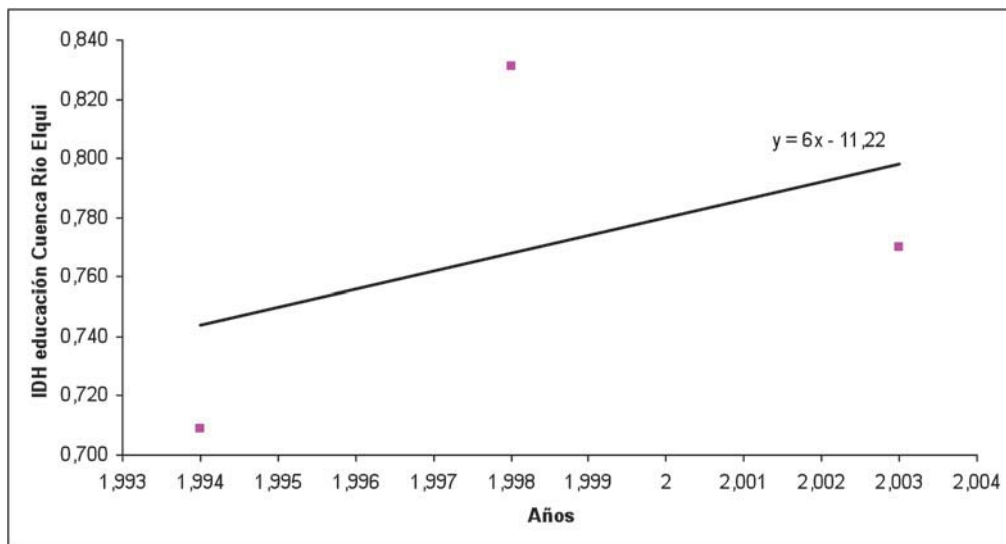
Este parámetro del WSI es la variación del sub-indicador IDH- educación en la cuenca, en el periodo de estudio (2001-2005), el cuadro 5.16 presenta los valores de IDH- Ed para las comunas de la Cuenca del Río Elqui, y los valores ponderados del IDH- Ed, para la cuenca.

Cuadro 5.16
IDH-Educación ponderado años 1994, 1998 y 2003 de la cuenca Elqui

| COMUNA | 1994 | | | 1998 | | | 2003 | | |
|----------------------------|-------|--------|-----------|-------|--------|-----------|-------|---------|-----------|
| | Educ. | Pobl | IDH *Pobl | Educ. | Pobl | IDH *Pobl | Educ. | Pobl | IDH *Pobl |
| La Serena | 0,731 | 137456 | 100480 | 0,854 | 154753 | 132159 | 0,791 | 176.876 | 139909 |
| Vicuña | 0,649 | 22801 | 14798 | 0,738 | 23967 | 17688 | 0,688 | 25.129 | 17289 |
| Paiguano | 0,585 | 3961 | 2317 | 0,761 | 4153 | 3160 | 0,693 | 4.321 | 2994 |
| Coquimbo | 0,713 | 8753 | 6241 | 0,808 | 9862 | 7968 | 0,738 | 11.218 | 8279 |
| Andacollo | 0,611 | 11524 | 7041 | 0,757 | 10831 | 8199 | 0,681 | 9.895 | 6738 |
| TOTAL | | 184495 | 130877 | | 203566 | 169174 | | 227.439 | 175210 |
| IDH(e) Cuenca Elqui | | | 0,709 | | | 0,831 | | | |

Se extrapolaron los valores para los años 2001 y 2005 mediante regresión lineal, presentada en la Figura 5.10.

Figura 5.10
Evolución del IDH-Educación de la Cuenca del Río Elqui entre 1994 y 2004



Aumento de la Oferta Hídrica

La ecuación obtenida para el IDH Educación en función del tiempo es:

$$\text{IDHe} = 0,006 * \text{año} - 11,22$$

Los valores para los años 2001 y 2005:

$$\text{IDHe}_{2001} = 0,786$$

$$\text{IDHe}_{2005} = 0,81$$

La variación resultante fue de 3.05, correspondiendo un puntaje de 0.75.

b) Estado – Capacidad Legal e Institucional en GIRH en la Cuenca

El parámetro Políticas – Estado del WSI es la capacidad institucional en gestión integrada de recursos hídricos en la cuenca del Río Elqui en el periodo de estudio (2001-2005). El parámetro es cualitativo, variando desde muy pobre hasta excelente. Para calificar este parámetro se consultó a un grupo de expertos asistentes al Taller WSI en el marco de la Mesa Regional del Agua. El procedimiento de calificación consideró los siguientes aspectos:

- ¿Existen leyes e instituciones relativas a gestión de recursos hídricos en la Cuenca del Río Elqui? ¿y nivel de efectividad estas tienen?
- ¿Existen instituciones? ¿ Nivel de efectividad de estas?
- ¿Nivel de involucramiento de la comunidad en los temas relacionados con el manejo de los recursos hídricos?

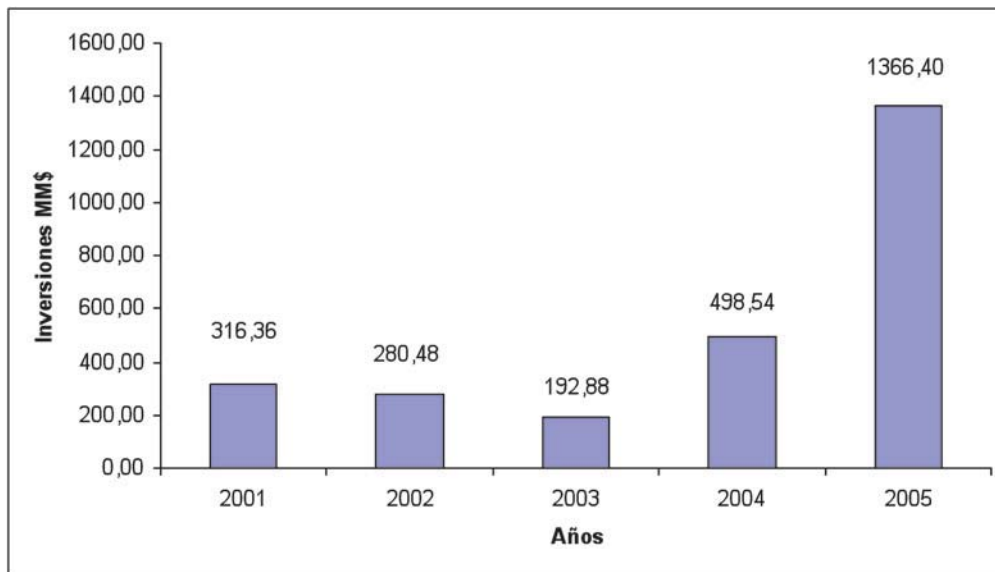
Frente a estas consideraciones, el grupo de expertos resolvió asignar al parámetro analizado una calificación de "regular". A esta calificación le corresponde un puntaje de 0,5. La justificación para esta calificación fue que, si bien en el periodo 2001-2005 existían leyes como el Código de Aguas, la Ley de Bases de Medio Ambiente y el Decreto Supremo N° 90, que regula los residuos líquidos que se descargan en fuentes de agua superficial, entre otras, faltaba una mayor fiscalización en el cumplimiento de las leyes y normas. También se valoró positivamente una adecuada formalización de organizaciones de usuarios de agua a nivel de cuenca, como la Junta de Vigilancia del Río Elqui y sus Afluentes. Pero lamentablemente hubo una apreciación negativa respecto a la integración de la ciudadanía en materia de recursos hídricos.

c) Respuesta – Evolución en las inversiones en GIRH en la cuenca

Este parámetro considera la evolución de gastos anuales en las comunas de La Serena, Vicuña, Paihuano, Andacollo y Coquimbo entre el periodo 2001-2005. Esta evolución fue de 331 %, correspondiendo a un puntaje de 1. En la Figura 5.11 se presentan, a manera de ejemplo, las inversiones realizadas en estudios fortalecimiento de comunidades de aguas, obras de infraestructura de alcantarillado, agua potable y riego.

Figura 5.11

Inversiones en Proyecto Hídricos en la Cuenca de Elqui, periodo 2001-2005



Resumen del Indicador de Políticas.

En el cuadro 5.17 se presenta el resumen de cálculo del Indicador Políticas para la Cuenca de Elqui.

Cuadro 5.17

Resumen Indicador de políticas cuenca Elqui

| Parámetro | Presión | | Estado | | Respuesta | |
|-----------|---------|---------|---------|---------|-----------|---------|
| | Valor | Puntaje | Valor | Puntaje | Valor | Puntaje |
| Políticas | 3.05% | 0.75 | Regular | 0.5 | >20% | 1 |

5.5 DETERMINACIÓN DE ÍNDICE DE SUSTENTABILIDAD CUENCA ELQUI (WSI)

En el cuadro 5.18 se presenta el cálculo final del WSI para la Cuenca del Río Elqui.

Cuadro 5.18.

IDH educación ponderado años 1994, 1998 y 2003 de la cuenca Elqui

| Indicador | Presión | | Estado | | Respuesta | | WSI |
|------------------|---------|-------------|----------|-------------|-----------|-------------|-------------|
| | Valor | Puntaje | Valor | Puntaje | Valor | Puntaje | Resultado |
| Hidro - C | -3.32% | 0.50 | 2,785 | 0.25 | Regular | 0.50 | 0.50 |
| Hidro - Q | -0.10% | 0.75 | 1,524.27 | 0.5 | Regular | 0.50 | |
| Ambiente | 7.00% | 0.50 | 72% | 1.00 | 0% | 0.25 | 0.58 |
| Vida | 6 | 0.75 | 0.8 | 0.75 | 4.73% | 0.50 | 0.67 |
| Políticas | 3.05% | 0.75 | Regular | 0.50 | >20% | 1.00 | 0.75 |
| Resultado | | 0.70 | | 0.66 | | 0.56 | 0.63 |

De acuerdo con el cuadro, el WSI fue de 0,63, considerado como un nivel de sustentabilidad intermedio. En la matriz, se presentan, en amarillo, aquellas combinaciones de indicadores y parámetros considerados como "cuellos de botella", es decir, aquellos elementos relevantes en el análisis que deben ser abordados con el fin de mejorar la sustentabilidad de la cuenca.

Se aprecia, por ejemplo, que un gran cuello de botella se relaciona con la disponibilidad de agua en la cuenca. Este valor no sorprende, entendiendo que se ajusta al patrón general de cuencas ubicadas en regiones semiáridas, donde existe una fuerte demanda por recursos hídricos escasos. Además, las tendencias en crecimiento de la población, sobre todo en los países de América Latina, pero particularmente en la Cuenca de Elqui, donde se ubica la ciudad de La Serena, uno de los mayores polos de atracción de población en la zona centro norte de Chile, explican los puntajes obtenidos.

Otro cuello de botella se asocia al Indicador Ambiente. El aumento en el uso antrópico del suelo, así como la inexistencia de áreas consideradas como protegidas explican el bajo puntaje en este indicador. Sin embargo, pudiese ser discutible la relevancia de áreas protegidas en una región donde más del 70% de su superficie corresponde a terrenos con vegetación natural. Si bien la tasa de cambio de uso de suelo antrópico afecta el puntaje del indicador, no se considera la relación entre el área de uso antrópico y el área no utilizada. Es decir, podría haberse llegado al mismo resultado ya sea con un 5 como con un 95% del área regional con uso antrópico del suelo. Esta situación podría propiciar alguna modificación respecto a la ponderación de este indicador a nivel de la Cuenca de Elqui para el cálculo final del WSI.

5.6.- CONCLUSIONES

Se aplica el WSI a la Cuenca del Río Elqui, una cuenca ubicada en la región semiárida de Chile y recientemente incorporada a la Red de Cuencas del programa HELP de UNESCO.

Mediante un proceso participativo, en el marco de las actividades operativas de la Mesa Regional del Agua de la Región de Coquimbo, se evalúan los parámetros e indicadores para el cálculo del WSI. El Índice obtenido presenta un valor de 0,63. Este implica que la cuenca se ubica en un nivel de sustentabilidad intermedio. Se detectan, como cuellos de botella, principalmente los indicadores relacionados con la disponibilidad hídrica, explicados por la situación de cuenca semiárida, y especialmente, con una presión creciente por los recursos hídricos, asociados a un aumento de la población permanente. También, el Indicador de Ambiente es destacado como cuello de botella, aunque sin embargo pudiesen considerarse algunos ajustes para el caso específico de la cuenca de Elqui respecto a la ponderación de éste último en el valor final del WSI, que podría contribuir a incrementar el puntaje final.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- CADE-IDEPE. 2004b. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Río Elqui. 136pp.
- CAZALAC. 2006. Aplicación De metodologías para determinar la eficiencia de uso de agua estudio de caso en la Región de Coquimbo, 896 p.
- Chaves, H. & S. Alipaz. 2007. An integrated indicator based on basin hydrology, environment, life, and policy: The watershed sustainability index. *Water Resources Management*, 21(5), 883-895.
- CONAMA. 2006. Anteproyecto norma secundaria de calidad ambiental para la protección de las aguas continentales de la Cuenca del Río Elqui. Santiago. 10 p.
- CONAMA. 2009. Informe Técnico Normas Secundarias de calidad ambiental para la protección de las aguas continentales de la Cuenca del Río Elqui.
- Dattwyler, E. 2008. Minería, agricultura y recursos hídricos en la cuenca del Río Elqui; aspectos económicos, sociales y ambientales. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Ambiental, Universidad de La Serena, 163 p.
- Galleguillos, G. 2004. Efectos de la Actividad Minera y de las obras hidráulicas en la calidad de las aguas del Río Elqui y de sus afluentes. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Ambiental, Universidad de La Serena, 247 p.
- Guevara, S., Oyarzun, J. & Maturana, H. 2006. Geoquímica de las aguas del río Elqui y de sus tributarios en el periodo 1975-1995: Factores naturales y efecto de las explotaciones mineras en sus contenidos de Fe, Cu, y As. *Agricultura Técnica (Chile)* 66(1): 57-69
- Helsel D. & Hirsch R. 1993 *Statistical methods in water resources*, Elsevier, 539 p.
- INN. 1987. NCh 1333 Of. 87. Requisitos de calidad del agua para diferentes usos. Instituto Nacional de Normalización, Santiago Chile.
- INE. 2009. Estadística demográficas. Instituto Nacional de Estadística, Disponible en: www.ine.cl. Consultado en noviembre, 2009

- Machinea, J., Bárcena, A. & León, A. Objetivos de Desarrollo del Milenio: una mirada desde América Latina y el Caribe. CEPAL, junio de 2005.
- M.O.P. 1999. Política Nacional de Recursos Hídricos. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Diciembre de 1999. Santiago, Chile.
- Orrego, J. 2002. El estado de las aguas terrestres en Chile: cursos y aguas subterráneas. Fundación Terram. Santiago, Chile.
- Squeo, F; Arancio, G & Gutiérrez, J. 2002. Libro rojo de la flora nativa y de los sitios prioritarios para su conservación: Región de Coquimbo Universidad de La Serena, Corporación Nacional Forestal y Gobierno Regional de Coquimbo. 372 p.

ÍNDICE DE CUADROS

| | | |
|-------------------|--|----|
| Cuadro 2.1 | Demanda de agua diaria y anual por especie animal, información base para la determinación del volumen de diseño del SCALL. | 12 |
| Cuadro 2.2 | Demanda de agua diaria y anual para diferentes especies animales de explotación comercial, en diferentes estadios. | 12 |
| Cuadro 2.3 | Demanda de agua para las comunidades de Jiñicao y Terrero, de Honduras C.A. Para la población de 356 habitantes en ambas comunidades, la demanda diaria de agua para uso domestico, alimentación y consumo humano es de 23.14m ³ | 13 |
| Cuadro 2.4 | Coefficientes de escurrimiento (Ce) de los diferentes materiales en el área de captación. | 14 |
| Cuadro 2.5 | Estimación de la demanda y el costo de inversión por persona para un sistema familiar y cuatro sistemas comunitarios. | 15 |
| Cuadro 2.6 | Coefficientes de escurrimiento (Ce) de los diferentes materiales utilizados en el área de captación. | 15 |
| Cuadro 2.7 | Precipitación media mensual, para la estación meteorológica Pedro y Pablo Teposcolula, ubicada en la región de la Mixteca alta del Estado de Oaxaca, México. Con localización geográfica; Latitud: 17° 31' N; Longitud: 097° 30' W, Elevación: 1940 metros sobre el nivel del mar (msnm) y un periodo de observación de 30 años. | 16 |

| | | |
|--------------------|---|-----|
| Cuadro 2.8 | Volumen de agua con relación al área de captación (Ac) en m ² y la precipitación pluvial en mm. | 20 |
| Cuadro 2.9 | Costos de diferentes cisternas para almacenamiento del agua pluvial | 31 |
| Cuadro 2.10 | Resumen de estimación de demanda anual, precipitación pluvial neta, área de captación, diámetro de conducción y volumen de la cisterna. | 40 |
| Cuadro 2.11 | Datos de entrada, cálculos de variables para obtener las dimensiones de canaletas rectangulares.. | 42 |
| Cuadro 2.12 | Longitud de canaletas por población, en metros lineales. | 44 |
| Cuadro 2.13 | Resumen de material de PVC, bajantes, trampas de sólidos y número de filtros de sedimentos. | 45 |
| Cuadro 2.14 | Principales técnicas de captación de agua de lluvia (Prácticas ancestrales de captación de suelo y agua de suelo). | 51 |
| Cuadro 3.1 | Límites de disponibilidad de recurso de agua renovable | 72 |
| Cuadro 4.1 | Clasificación de las principales técnicas de recarga controlada de acuíferos (IGRAC). | 108 |
| Cuadro 5.1 | Indicadores y parámetros del WSI para los 3 niveles | 137 |
| Cuadro 5.2 | Parámetros de Presión del WSI, con niveles y puntajes | 138 |
| Cuadro 5.3 | Parámetros de Estado del WSI, con niveles y puntajes | 139 |
| Cuadro 5.4 | Parámetros de Respuesta del WSI, con niveles y puntajes | 140 |
| Cuadro 5.5 | Rango de Sustentabilidad. | 140 |

| | | |
|--------------------|---|-----|
| Cuadro 5.6 | Caudales medios anuales netos de largo y corto plazo, aportados por la cuenca Elqui y la variación relativa entre los 2 periodos | 146 |
| Cuadro 5.7 | Parámetro de Estado del WSI, Indicador Hidrología- Calidad de Agua | 150 |
| Cuadro 5.8 | Promedio de la conductividad eléctrica del agua de largo y corto plazo, aportados por la cuenca Elqui y la variación relativa entre los 2 periodos. | 150 |
| Cuadro 5.9 | Resumen de los parámetros hidrológicos estimados para la cuenca del río Elqui, en el periodo 2001-2005 | 152 |
| Cuadro 5.10 | Usos de Suelo antrópico. | 153 |
| Cuadro 5.11 | Usos de Suelo, vegetación natural. | 154 |
| Cuadro 5.12 | Resumen Indicador de Medio- Ambiente Cuenca Elqui | 155 |
| Cuadro 5.13 | IDH-Ingreso cuenca Elqui. | 155 |
| Cuadro 5.14 | IDH total ponderado años 1994, 1998 y 2003 de la cuenca Elqui | 157 |
| Cuadro 5.15 | Resumen del Indicador Vida cuenca Elqui. | 158 |
| Cuadro 5.16 | IDH-Educación ponderado años 1994, 1998 y 2003 de la cuenca Elqui | 159 |
| Cuadro 5.17 | Resumen Indicador de políticas cuenca Elqui | 161 |
| Cuadro 5.18 | IDH educación ponderado años 1994, 1998 y 2003 de la cuenca Elqui | 162 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|--------------------|--|----|
| Figura 2.1 | Demanda para diferentes usos del agua de acuerdo con los criterios planteados | 11 |
| Figura 2.2 | Precipitación pluvial promedio mensual histórica. | 17 |
| Figura 2.3 | Techos de escuelas utilizados como áreas de captación del agua de lluvia | 18 |
| Figura 2.4 | Techo de cuenca en la comunidad del Tecongo, Aguascalientes. | 18 |
| Figura 2.5 | Ladera recubierta con geomembrana de PVC acondicionada como área para captación de agua de lluvia. | 19 |
| Figura 2.6 | Croquis del área de captación del agua de lluvia en un hogar. | 22 |
| Figura 2.7 | Vivienda rural donde se planteó el proyecto SCALL | 22 |
| Figura 2.8 | Forma de canaletas acordes a edificaciones | 23 |
| Figura 2.9 | Canaletas con malla para evitar la contaminación por hojas. | 23 |
| Figura 2.10 | Canaleta con rejilla y válvula para el lavado durante las primeras lluvias | 24 |
| Figura 2.11 | Componentes principales del sistema de conducción en el área de captación compuesta por un techo. | 25 |
| Figura 2.12 | Procesos de construcción y algunos tipos de cisternas. | 25 |

| | | |
|--------------------|--|----|
| Figura 2.13 | Transporte de cisterna de concreto: (a) 5 m ³ y (b) 75,6 m ³ | 26 |
| Figura 2.14 | (a) Cisterna de cemento tabique (b) Tapa de protección. | 27 |
| Figura 2.15 | Cisternas revestidas con geomembrana de PVC | 29 |
| Figura 2.16 | (a) Lámina galvanizada con tornillos, (b) Estructura del techo (c) material impermeable para evitar las pérdidas del agua por evaporación. | 29 |
| Figura 2.17 | Tanque de polietileno de 5 m ³ | 30 |
| Figura 2.18 | Cisterna de madera de pino con tensores para almacenar 5 m ³ | 30 |
| Figura 2.19 | Tanque de recepción de las primeras lluvias | 32 |
| Figura 2.20 | a) Trampa de basura, b) válvula para drenaje | 32 |
| Figura 2.21 | Instalación del filtro modular de sedimentos. | 33 |
| Figura 2.22 | Diagrama de captación del agua de lluvia, tratamiento y reutilización de las aguas grises y negras | 34 |
| Figura 2.23 | Sistema moderno de una red de distribución de agua de lluvia. | 35 |
| Figura 2.24 | Vista en planta y longitudinal del sedimentador (CEPIS, 2005) | 36 |
| Figura 2.25 | Diagrama de bombeo de agua almacenada | 38 |
| Figura 2.26 | Techo de escuela primaria utilizado como área de captación de agua de lluvia. | 41 |
| Figura 2.27 | Canaletas para la colección de agua de lluvia en la escuela primaria de los Reyes, Michoacán. | 43 |
| Figura 2.28 | Detalle de canaleta y bajada | 43 |

| | | |
|--------------------|---|----|
| Figura 2.29 | Sección de la canaleta | 44 |
| Figura 2.30 | Bajada de agua de lluvia de los techos | 44 |
| Figura 2.31 | Trampas de malla galvanizada | 45 |
| Figura 2.32 | Ubicación del filtro de sedimentos | 46 |
| Figura 2.33 | Diagrama de instalación de geomembrana en piso, taludes y cubierta flotante | 47 |
| Figura 2.34 | Cisterna de geomembrana de PVC con cubierta flotante en San Antonio, Los Reyes, Michoacán. | 47 |
| Figura 2.35 | Local de 30 m ² para el proceso de purificación de agua de lluvia | 48 |
| Figura 2.36 | Tren de purificación (izquierda) y personal capacitado (derecha). | 48 |
| Figura 2.37 | Aplicación de la fórmula de Anaya et al. (1976) para calcular la distancia entre hileras de acuerdo a los factores suelo-planta-precipitación | 57 |
| Figura 2.38 | Arado de doble vertedera, modificado para la construcción de bordería. (Tovar y Anaya, 1975) | 58 |
| Figura 2.39 | Aplicación experimental de la fórmula de Anaya et al. (1976) para calcular el área dedicada a escurrimiento en cultivos tupidos | 59 |
| Figura 2.40 | Vista del tamaño de la microcuenca para cultivos individuales calculada mediante la fórmula de Anaya et al. (1976). Chapingo, México. | 63 |
| Figura 2.41 | Microcuenca vista en planta y un corte seccional. | 63 |
| Figura 2.42 | a) Contreadora para retener el agua de lluvia y b) Producción de frijol en un terreno donde se utilizó la contreadora. | 64 |
| Figura 2.43 | Labranza de conservación | 66 |

| | | |
|-------------------|--|-----|
| Figura 3.1 | Fuente de agua ornamental y área de riego por aspersión | 72 |
| Figura 3.2 | Esquema de configuración típica de una planta de tratamiento de aguas servidas que alcanza el tratamiento terciario. | 80 |
| Figura 3.3 | Esquema de ejemplo de múltiples aplicaciones y procesos del reuso de agua, en un sistema integral de aprovechamiento hídrico | 83 |
| Figura 3.4 | Esquema de comparación entre análisis financiero y económico para un proyecto de reuso de agua | 91 |
| Figura 4.1 | Ilustración de las principales técnicas de recarga controlada de acuíferos (Gale, 2005). | 99 |
| Figura 4.2 | Clasificación de acuíferos de acuerdo a las condiciones de presión que se encuentren en el subsuelo | 100 |
| Figura 4.3 | Infiltrómetro de doble anillo | 105 |
| Figura 4.4 | Dibujo esquemático de un estanque de infiltración (Gale, 2005). | 110 |
| Figura 4.5 | Diagrama de un domo de recarga en un acuífero libre ubicado debajo de una cuenca de infiltración (Todd, 1959) | 111 |
| Figura 4.6 | Esquema de inundación controlada en el río Kaftari (Tood, 1959) | 112 |
| Figura 4.7 | Diagrama del funcionamiento hipotético de la recarga mediante canales (Apaza, 2006) | 113 |
| Figura 4.8 | El riego por inundación del arroz contribuye a la recarga de los acuíferos (IWMI, 2002). | 114 |
| Figura 4.9 | Recarga inducida provocada por el bombeo cerca de un río (Gale, 2005). | 116 |

| | | |
|--------------------|---|-----|
| Figura 4.10 | Pozos someros utilizados para conducir el agua a través de un material de baja permeabilidad, permitiendo la recarga del acuífero | 117 |
| Figura 4.11 | Pozos de recarga profundos tipo ASR y ASTR (Dillon and Molloy, 2006) | 118 |
| Figura 4.12 | Recarga de un acuífero libre mediante una presa; extracción y aprovechamiento del agua posterior mediante un pozo (Gale, 2005) | 121 |
| Figura 4.13 | Condición topográfica óptima para la ubicación de una presa subsuperficial (Nilsson, 1988) | 121 |
| Figura 4.14 | Sección transversal esquemática de una presa de arena (WaterAid) | 122 |
| Figura 4.15 | Presa de gavión sobre el cauce de un arroyo | 123 |
| Figura 4.16 | Modificación del cauce de un río para incrementar la recarga (Todd, 1959) | 124 |
| Figura 4.17 | Dibujo esquemático de un sistema de captación de agua de lluvia en los techos de las construcciones para la recarga de los acuíferos (Gale, 2005) | 125 |
| Figura 4.18 | Barreras al flujo superficial para provocar la infiltración del agua. | 126 |
| Figura 4.19 | Zanjas de infiltración en Kerala, India | 127 |
| Figura 5.1 | Esquema de Metodología | 138 |
| Figura 5.2 | Ubicación de la cuenca Elqui, perteneciente a la red de cuencas HELP | 144 |
| Figura 5.3 | Caudales medios anuales de periodo de largo plazo, Cuenca Elqui. | 146 |
| Figura 5.4 | Inversiones realizadas en eficiencia hídrica en el periodo de estudio. | 148 |

Aumento de la Oferta Hídrica

| | | |
|--------------------|--|-----|
| Figura 5.5 | Ubicación de las estaciones de monitoreo seleccionadas de la cuenca del Río Elqui | 149 |
| Figura 5.6 | Variación de la conductividad eléctrica promedio de largo plazo del agua según estación de monitoreo | 151 |
| Figura 5.7 | Población en el área de influencia cuenca Elqui periodo (2001-2005) | 153 |
| Figura 5.8 | Línea de tendencia IDH, cuenca Elqui | 156 |
| Figura 5.9 | Evolución del IDH de la Cuenca del Río Elqui entre 1994 y 2004 | 157 |
| Figura 5.10 | Evolución del IDH-Educación de la Cuenca del Río Elqui entre 1994 y 2004 | 159 |
| Figura 5.11 | Inversiones en Proyecto Hídricos en la Cuenca de Elqui, periodo 2001-2005 | 161 |

GLOSARIO

Acuífero: cualquier formación geológica por la que circulan o se almacenan aguas subterráneas que puedan ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento.

Acuífero confinado: acuífero limitado arriba y abajo por capas de menor permeabilidad que restringen el movimiento del agua hacia afuera del acuífero.

Acuífero libre: acuífero cuya superficie superior es el nivel freático el cual se encuentra sujeto a presión atmosférica.

Aguas subterráneas: agua almacenada en rocas permeables, como la caliza o sedimentos no consolidados del tipo de la arena y la grava.

Balance hídrico: comparación entre los volúmenes de agua que entran y que salen de un acuífero, así como de los cambios en el almacenamiento de agua.

BPM: Buenas prácticas de manejo.

Carga piezométrica: nivel que las aguas subterráneas alcanzarían en acuíferos confinados o semiconfinados.

CONAPHI: Comisión Nacional de Programas Hidrológicos Internacionales

Conductividad hidráulica: volumen de agua que circula por un área de ancho unitario bajo un gradiente hidráulica unitario y por unidad de tiempo.

EPI: Índice de Presión Antrópica.

Extracción de aguas subterráneas: Volumen de agua que es sacada de un acuífero, generalmente por bombeo, para el suministro agrícola, industrial o público.

GIRH: Gestión integrada de recursos hídricos.

HELP: Programa de Hidrología, Ambiente, Vida y Políticas de la UNESCO.

IDH: Índice de Desarrollo Humano.

IDH-Ed: Parámetro de nivel de educación del IDH.

IDH-Ing: Parámetro de ingreso del IDH.

Infiltración inducida. Sistema que capta agua superficial para inducir su infiltración al subsuelo con el fin de que se extraiga posteriormente mediante pozos o galerías filtrantes ubicadas a cierta distancia de las fuentes superficiales.

Nivel freático- Nivel superior de los acuíferos libres los cuales se encuentran sujetos a presión igual a la atmosférica.

Permeabilidad: facilidad con que el agua subterránea puede moverse a través de las rocas o sedimentos.

PHI: Programa Hidrológico Internacional de la Unesco.

Piezómetro: pozo diseñando y construido expresamente para medir periódicamente de forma automática o manual, las variaciones del nivel estático y la calidad del agua subterránea.

PNUD: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo

Pozo: obra de ingeniería construida para extraer agua del subsuelo.

Recarga de aguas subterráneas: Volumen de agua que entra al acuífero, como la filtración descendente del agua de lluvia.

Sobreexplotación: Volumen de agua subterránea que se extrae de los acuíferos por arriba de su recarga natural y que produce efectos indeseables como el hundimiento del terreno y el abatimiento del nivel freático o piezométrico.

Rendimiento sostenible: Volumen de agua que se puede extraer de un acuífero sin ocasionar efectos perjudiciales a largo plazo.

UNESCO: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, Ciencia y Cultura.

WSI: "Watershed Sustainability Index" o Índice de Sostenibilidad de Cuencas.

Zona no saturada: zona comprendida entre la superficie del terreno y la superficie freática en donde los poros están parcialmente ocupados por agua bajo presión menor a la atmosférica.