



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**PRINCIPIOS DE PERMACULTURA Y DE CALIDAD DEL AGUA
APLICADOS AL USO EFICIENTE DEL AGUA PARA RIEGO EN
COMUNIDADES PEQUEÑAS**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA

PRESENTA:

ING. CHRISTOPHER SANSORES MOLINA

DIRECTOR DE TESINA: **M.I. RODRIGO TAKASHI SEPÚLVEDA HIROSE**

MÉXICO, D.F.

MAYO 2018

Dedicatorias

A Dios, por estar conmigo, cuidándome y dándome fuerza en cada paso que doy.

A mis papás, Carlos y Dolores, por todo el esfuerzo y sacrificios realizados para que yo pudiera tener una buena formación académica, por también formarme como ser humano, inculcándome valores y principios que me hicieran una persona de bien. Gracias por su cariño y apoyo incondicionales.

A mi Tita Leo, quien fue como una segunda madre para mí y que desde el cielo espero que se sienta muy orgullosa de este nuevo logro conseguido.

A mi Tita Elena, quien desde hace muchos años me ha alentado a luchar por mis sueños.

A mi novia Mayte García, por siempre motivarme a ser mejor cada día en todos los aspectos, por siempre tener una sonrisa para mí, darme su amor incondicional y hacerme inmensamente feliz. Gracias por estar siempre conmigo, por ser mi fortaleza y equilibrio.

A mis hermanos, Christian y Carlos, quienes han sido mi ejemplo a seguir desde pequeño.

Al M.I. Rodrigo Takashi Sepúlveda, por impulsarme en la realización de este trabajo, por siempre motivarme y confiar en mis capacidades. Gracias por ser un ejemplo a seguir como persona, docente y profesionalista.

A mis compañeros de la licenciatura y especialidad, gracias por su amistad y apoyo, por siempre alentarme a conquistar nuevas metas.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, mi *alma mater*, y al Programa Único de Especializaciones de Ingeniería, por brindarme una educación de alta calidad acompañada de valores y principios que han quedado marcados en mi persona.

Índice

Introducción	7
Objetivos	8
Objetivo general.....	8
Objetivos particulares	8
1. Antecedentes	9
2. Conceptos y principios de la permacultura.....	11
2.1. Ética de la permacultura	12
2.2. Principios de diseño	14
2.2.1. Principios de diseño propios para el agua.....	16
3. Usos del agua en el mundo y en México.....	16
3.1. El agua en el mundo	17
3.1.1. Usos del agua en el mundo	17
3.2. El agua en México	18
3.2.1. Usos del agua en México.....	19
3.3. Uso eficiente del agua	22
3.3.1. Uso eficiente del agua en la agricultura	22
4. Distribución del agua y la población	24
4.1. Distribución y disponibilidad del agua en el mundo	25
4.2. Distribución y disponibilidad del agua en México.....	26
5. Métodos de riego	28
5.1. Calidad del agua utilizada en el riego.....	28
5.2. Conceptos básicos de los sistemas de riego	30
5.3. Clasificación de los sistemas de riego	33
5.3.1. Riego por gravedad o a pie.....	33
5.3.2. Riego por aspersión.....	34
5.3.2.1. Ventajas del riego por aspersión.....	35
5.3.2.2. Inconvenientes del riego por aspersión	35
5.3.3. Riego localizado.....	35
6. Riego eficiente en comunidades pequeñas	37
6.1. Aspectos a considerar para realizar un riego eficiente	37

6.1.1.	Características físicas del suelo	37
6.1.2.	Necesidades de agua de los cultivos	38
6.1.2.1.	Métodos indirectos: Evapotranspiración	38
6.1.2.2.	Métodos directos: Sensores de humedad	42
6.1.3.	Dosis y frecuencia de riego	43
7.	Caso de estudio: Finca Can Valldaura	43
7.1.	Bases conceptuales	43
7.1.1.	La permacultura como técnica de agricultura moderna.....	44
7.1.2.	Guía de análisis medioambiental en permacultura	45
7.2.	Información del sitio de estudio	46
7.2.1.	Localización	46
7.2.2.	Breve historia	47
7.2.3.	Hidrografía.....	48
7.2.4.	Clima.....	48
7.2.5.	Suelo.....	49
7.2.6.	Flora y fauna.....	49
7.3.	Descripción del Proyecto QValldaura.....	50
7.3.1.	Tres laboratorios y cuatro programas.....	50
7.3.2.	El agua en QValldaura: Proyecto HydroGrid	51
7.3.3.	Proyecto Silvoagroforestal en QValldaura	52
7.4.	Evaluación del caso de estudio	54
	Conclusiones	58
	Referencias.....	59

Índice de tablas

Tabla 3.1 Países con mayor extracción de agua y porcentaje de uso agrícola, industrial y abastecimiento público, 2015	17
Tabla 3.2. Agrupación de usos de la clasificación del REPDA.....	19
Tabla 3.3. Usos agrupados consuntivos según la clasificación del REPDA.....	19
Tabla 3.4. Valores de productividad del agua, PA (kg/m ³) obtenidos para distintos cultivos de regadío en diferentes condiciones climáticas y de cultivo.....	22
Tabla 3.5. Litros de agua utilizados por kilogramo de jitomate producido	23
Tabla 4.1. Recursos de agua dulce en el mundo, 2002	25
Tabla 4.2. Disponibilidad natural media per cápita en México, 2006-20016	27
Tabla 5.1. Iones más comunes en el agua para riego y pesos equivalentes.....	29
Tabla 5.2. Grado de restricción para la utilización del agua en función de la salinidad	30
Tabla 6.1. ET _o promedio para diferentes regiones agroclimáticas en mm día ⁻¹	38
Tabla 7.1. Diferenciación entre los principales objetivos de la permacultura y los de la agricultura convencional	44
Tabla 7.2. Guía de análisis medioambiental en permacultura.....	45
Tabla 7.3. Análisis medioambiental en permacultura de la Finca Can Valldaura	54

Índice de figuras

Figura 1.1. Plano permacultural del Centro Educativo Yanantin, Argentina	10
Figura 2.1. Principios que sustentan la ética de la permacultura	12
Figura 3.1. Distribución de volúmenes concesionados por usos agrupados consuntivos, 2015	20
Figura 3.2. Usos consuntivos del agua en México, 2015.....	21
Figura 3.3. Expresión para el cálculo de la EUA o PA	22
Figura 4.1. Disponibilidad natural media per cápita en México, 2006-2016	28
Figura 5.1. Uniformidad de aplicación del agua de riego.....	31
Figura 5.2. Eficiencia de la aplicación del agua de riego	32
Figura 5.3. Pérdidas en la distribución del agua de riego	32
Figura 5.4. Riego por gravedad o a pie.....	34
Figura 5.5. Riego por aspersión.....	34
Figura 5.6. Riego localizado.....	36
Figura 5.7. Tipos de goteros utilizados para riego	36
Figura 6.1. Valores típicos de Kc para diferentes cultivos completamente desarrollados	39
Figura 6.2. Rangos extremos de Kc para cultivos completamente desarrollados, en respuesta a variaciones climáticas y meteorológicas.....	39
Figura 6.3. Valores del Kc que describen la curva del coeficiente del cultivo.....	40
Figura 6.4. Curva del coeficiente del cultivo	40
Figura 6.5. Factores que afectan la evapotranspiración con referencia a conceptos relacionados de ET.....	41
Figura 6.6. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), bajo condiciones estándar (ET_c) y bajo condiciones no estándar ($ET_{c_{aj}}$).....	41
Figura 6.7. Distintos tipos de sensores de humedad en suelo.....	42
Figura 6.8. Sensores de humedad instalados en cultivo de fresa	42
Figura 7.1. Localización de la Finca Can Valldaura sobre mapa topográfico	46
Figura 7.2. Finca Can Valldaura	47
Figura 7.3. Sistema de muros y terrazas creadas por Fransesc Guardiola en 1905.....	47
Figura 7.4. Red fluvial de la Finca Can Valldaura.....	48
Figura 7.5. Relación entre temperatura y pluviometría media en el Observatorio Fabra en el período 2007-2011.....	49
Figura 7.6. Diagrama del ciclo de usos del agua en la masía de Valldaura	52
Figura 7.7. Localización de las dos zonas agrícolas aprobadas en Valldaura	53

Introducción

El presente trabajo se centra en presentar una perspectiva de la permacultura, un concepto cada vez más conocido, el cual surge por primera vez en los trabajos que los australianos Bill Mollison y David Holmgren realizaron a mediados de los 70, quienes lo utilizaron para referirse a un método para un sistema de agricultura y de estilo de vida sostenible, haciendo alusión a una agricultura permanente y totalmente sostenible en todos los aspectos.

Se pretende dar a conocer los factores involucrados en la filosofía de la permacultura, tales como su ética y principios, y como éstos se relacionan con algunas consideraciones de calidad y uso eficiente del agua, con el objetivo de tener un panorama más completo sobre las técnicas y métodos más efectivos que se pueden emplear en el riego en comunidades pequeñas, a fin de producir la mayor cantidad de alimentos para autoconsumo, utilizando la menor cantidad de recursos posible, en especial un elemento tan esencial y escaso como lo es el agua.

Es por ello que se exponen desde aspectos básicos como la definición de la permacultura como una técnica, los usos del agua y cifras de disponibilidad (cantidad de agua con la que se cuenta), así como explicación de los métodos de riego existentes, hasta la descripción de elementos que afectan los rendimientos de un cultivo, tales como la presencia de sales en el agua de riego (característica correspondiente a la calidad del agua), condiciones del suelo, climáticas, etc., las cuales si son debidamente controladas permiten un uso más eficiente del agua (mayor rendimiento en los cultivos con menor cantidad de agua), sirviendo éste como herramienta para contrarrestar la gran problemática que representa la decreciente disponibilidad de agua en la actualidad, considerando que la agricultura consume más del 70% de los recursos hídricos del planeta y la cual es una actividad estrictamente necesaria para la producción de los alimentos que la población requiere para vivir.

Finalmente, se analiza el caso de estudio de la Finca Can Valldaura en la cual se desarrolla un proyecto de mejora en la gestión del agua denominado *HydroGrid*, así como un proyecto silvoagroforestal dispuesto en varias zonas, este último, ejemplifica perfectamente la situación de un uso eficiente de agua para riego en una pequeña comunidad, en este caso en un municipio de Cataluña en España, además de estar inspirado en los principios éticos y de diseño de la permacultura.

En este sentido, el fin de este trabajo es evaluar cualitativamente el caso de estudio mencionado anteriormente, el cual fue investigado y documentado por Nieto (2012), de acuerdo a criterios establecidos por Acosta (2015) en su guía de análisis medioambiental en permacultura; esto con el propósito de que convertir este documento en un prontuario para implementar adecuadamente proyectos similares.

Objetivos

Objetivo general

- Estudiar las medidas de uso eficiente del agua empleada en las actividades de riego de comunidades pequeñas, tomando en cuenta principios de permacultura y de calidad del agua.

Objetivos particulares

- Dar a conocer los principios que sustentan la filosofía de la permacultura y cómo se relacionan con el cuidado de la gente y de los recursos naturales tan escasos como el agua, buscando lograr un cambio integral que comience por las comunidades pequeñas.
- Analizar la importancia de la calidad del agua de riego para obtener rendimientos óptimos en los cultivos, logrando así un uso eficiente del agua de riego en las comunidades pequeñas.

1. Antecedentes

Como antecedentes de proyectos de permacultura aplicada, se puede mencionar el caso de Donna Smith y Robyn Streater en Australia (extraído del sitio *The Permaculture Research Institute of Australia*), quienes comenzaron un negocio llamado “YourBackyardFarmer” o “tu granja en el jardín trasero”, el cual trata sobre la creación de cultivos urbanos que ayuden a satisfacer las necesidades alimenticias de la población, a la vez se genera conciencia social y se alienta a las personas a poder ser autosuficientes cultivando un huerto o jardín productivo, ya sea en sus hogares o en los sitios de trabajo, con el fin de mejorar las condiciones de toda la ciudad (Jerónimo, 2009).

Otro antecedente lo encontramos en Estados Unidos, gran impulsor de la corriente de la permacultura en su país y en el mundo, donde destaca la página web *Permaculture Institute*, cuyas operaciones se ubican en Nuevo México, y que presenta distintos proyectos como el “Patio Guardabosque” o “Bosque Urbano” en Los Ángeles, el cual tiene la finalidad de restaurar las fuentes, ecosistemas y vecindarios, entre otras cosas. Este proyecto está a cargo de “TreePeople”, asociación cuyo lema invita a convertir los patios en granjas o refugios para animales, además de buscar crear huertos urbanos que produzcan alimentos para intercambiar con los vecinos (Jerónimo, 2009).

Este tipo de proyectos han sido un rotundo éxito y han demostrado la gran capacidad de renovación del campo en muchos países, tales como Australia, Estados Unidos, Francia, España, Alemania, entre otros países. Sin embargo, en América Latina, países como Cuba, Brasil, Argentina, Uruguay, Venezuela, Chile y en menor escala México, también han fomentado la realización de estudios en materia de permacultura, para implementarla como un principio de solución y renovación en muchos ámbitos (Jerónimo, 2009).

En esta búsqueda de precedentes dentro del entorno latinoamericano, se puede mencionar el caso de Cuba, pues en la ciudad de la Habana se consume el 60% de lo que produce dentro de ella misma, en los terrenos libres y en las propias viviendas, ya que sólo el 40% de los vegetales que consumen sus 2.5 millones de habitantes llegan desde fuera al entorno urbano (Jerónimo, 2009).

También se tiene el caso de Brasil, país que por muchos años ha fomentado el desarrollo de la permacultura, como ejemplo destaca una construcción ecológica realizada por el arquitecto brasileño Víctor Lotufo, la cual concentra en una bodega reciclada, su residencia y su estudio en la ciudad de São Paulo (Jerónimo, 2009).

Otro ejemplo más en Latinoamérica se tiene en el Centro Educativo *Yanantin* (palabra quechua que significa equilibrio o balance), construido en San Francisco del Monte de Oro, provincia de San Luis, Argentina. Este centro se concibe como un espacio experimental y demostrativo donde tanto niños como adultos puedan tener contacto con los conceptos de la vida sostenible, reconociendo el valor de los recursos naturales, la importancia del cuidado del medioambiente, del reciclado y de otras prácticas muy simples de implementar en la vida cotidiana (Construcción Natural Bariloche, 2008).

Para su diseño, se contemplaron diversos factores tales como la accesibilidad general, las áreas más frecuentadas y las que requieren mayor mantenimiento, la orientación y niveles del terreno, la

irradiación solar, la protección de los vientos fuertes y fríos, el acceso de los servicios (luz, agua potable, canal de riego, etc.), las vistas del entorno, entre otros. La distribución de los elementos que conforman el Centro Educativo Yanantin se muestran en la Figura 1.1 y se detallarán en las siguientes líneas (Construcción Natural Bariloche, 2008).

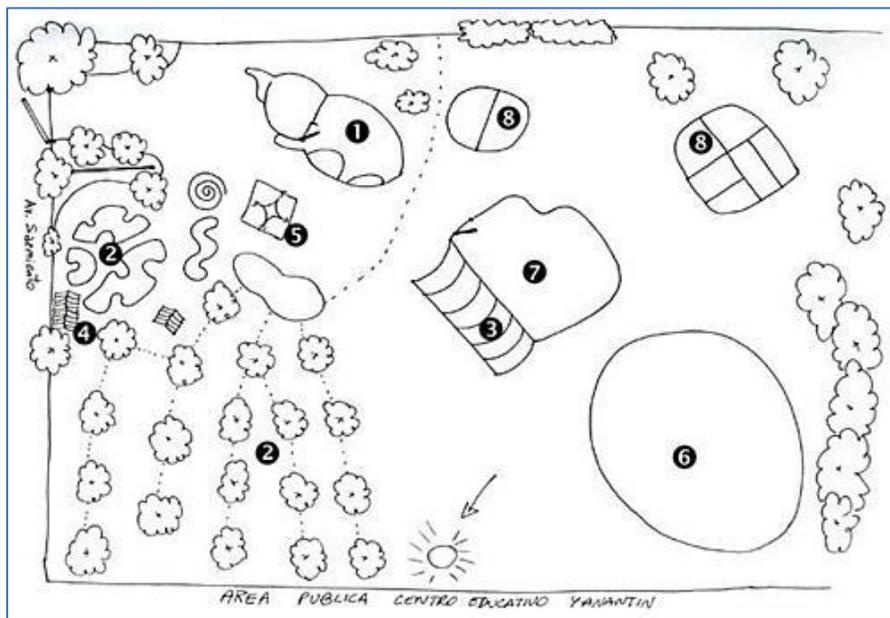


Figura 1.1. Plano permacultural del Centro Educativo Yanantin, Argentina

Fuente: "YANANTIN - Centro Educativo de Permacultura y Construcción Natural" (Construcción Natural Bariloche, 2008).

- **Biblioteca y patio (1):** tiene como objetivo poner al alcance del público los libros y el material digital relacionados con la vida sostenible, los cuales suelen ser difíciles de conseguir. Cuenta además con un patio semi-cubierto con bancos y un horno de barro para eventos y reuniones.
- **Huerta, quinta de frutales (2) e invernadero (3):** áreas de cultivos naturales para el consumo interno y producción de semillas orgánicas para intercambiar con otros productores de la zona.
- **Lombricario y aboneras (4):** sección destinada para la práctica de dos métodos de reciclado de la materia orgánica, uno a través de la cría de lombrices rojas y el otro por medio de la acción de bacterias.
- **Observatorio de astronomía (5):** plataforma de observación para el montaje de un telescopio utilizado para fines de enseñanza, así como mapas celestes y otros libros especializados afines.
- **Salón de usos múltiples (6):** espacio techado para impartir clases, realizar exposiciones, presentaciones artísticas y otros eventos.

- **Casa de huéspedes (7):** residencia temporal para voluntarios, pasantes, docentes y otros profesionales invitados a compartir sus conocimientos con la comunidad.
- **Servicios (8):** baños, duchas, lavadero y cocina comunitaria para realizar jornadas o actividades más extensas que requieran hospedaje en carpa. Estas instalaciones cuentan con ejemplos de sistemas de tratamiento de residuos hogareño y reciclado de las aguas, aprovechamiento de la materia orgánica, uso eficiente de la energía (calentadores solares, uso efectivo de la leña, etc.).
- **Áreas de recreación y observación:** jardines temáticos, senderos, estanques, espacios sombreados para la realización de actividades al aire libre, etc.

En otros países como Guatemala, en 1995 un programa de comercio justo, con alrededor de 300 indígenas agricultores de café orgánico, alcanzó un éxito tal que en el año 2000 conllevó a la formación del *Instituto de Permacultura Mesoamericano (IMAP)*, el cual adquirió una parcela de tierra a orillas del Lago Atitlán para convertirse en el nuevo centro referencial de permacultura. Desde entonces el IMAP ha apoyado mediante sus actividades a numerosas comunidades devastadas por el huracán Mitch, conformando un banco de semillas que ha reconstruido la herencia Maya de semillas perdidas, y colaborando a la capacitación de los jóvenes indígenas mediante programas educativos (Jerónimo, 2009).

Un último ejemplo destacado se presenta en El Salvador, donde en el 2002 se estableció el *Instituto de Permacultura de El Salvador (IPES)*, organización independiente fundada por pequeños agricultores preocupados por el creciente deterioro del ambiente, quienes en los últimos años han construido una red de agricultores subsistentes que trabajan con métodos de agricultura ecológica inspirados en la permacultura, los cuales han permitido un uso más eficiente de los recursos naturales, en especial de uno tan limitado como es el agua (Jerónimo, 2009).

2. Conceptos y principios de la permacultura

El término permacultura, compuesto de las palabras “permanente” y “agricultura”, fue acuñado en los años 70 por los ecologistas australianos Bill Mollison y David Holmgren, quienes lo utilizaron en su propuesta de desarrollar un sistema de planeación y diseño de las comunidades humanas que resultara en una cultura permanentemente sostenible. Desde aquel entonces, la permacultura se ha vuelto una filosofía y un movimiento socioecológico que, a nivel mundial, ha buscado contrarrestar los efectos del deterioro ambiental mediante acciones individuales que integren una nueva forma de comportamiento social con enfoque en la sostenibilidad (Nieto, 2012).

En palabras de Eugenio Gras (2010), permacultor pionero en México, la permacultura “es una estructura conceptual y un sistema emergente de diseño, más que una especificación técnica o solución de comportamiento. Su enfoque es el rediseño y la integración de nuestros estilos de vida, nuestra subsistencia y uso de suelo en sintonía con las realidades ecoenergéticas de hoy en día”.

En este sentido, la permacultura puede y tiene el objetivo de despertar el interés por participar en los procesos de la naturaleza, creando formas de medio ambientes humanos sostenibles y sistemas de producción que se basen en el respeto al planeta y a todos los seres vivos, aprendiendo a respetar a la naturaleza, así como trabajar y construir en armonía con ésta (Gras, 2010).

Para Mollison (1988) “la permacultura, como sistema de diseño, no contiene nada nuevo. Organiza de una forma diferente lo que siempre estuvo allí, de modo que funcione para conservar energía o generar más energía de la que consume”.

Como lo describen Sarandón y Flores (2014), “la permacultura es más que una variante de agricultura ecológica y tiene en cuenta de manera más amplia los principios de la agroecología, esto es, que una agricultura orgánica o ecológica, que se limite a la no utilización de agrotóxicos o fertilizantes químicos de síntesis, en su proceso productivo, para cumplir con las exigencias de certificación, pero, por ejemplo, no mantenga la diversidad biológica ni cultural, difícilmente contemplará los principios agroecológicos” (Citado en Acosta, 2015).

Además, Mollison (1994) señala que “mientras que los cultivos de agricultura moderna y convencional son totalmente dependientes de las energías fósiles externas, en permacultura la energía necesaria para el sistema es suministrada por el propio sistema, pues cuando las necesidades de un sistema no son suplidas o no provienen del mismo sistema, pagamos el precio en energía, consumo y polución” (Citado en Acosta, 2015).

2.1. Ética de la permacultura

La permacultura se encuentra fundamentada en una ética basada en tres principios: respetar la Tierra, cuidar de la gente y consumir menos y compartir los excedentes, los cuales se encuentran representados en la Figura 2.1 (Gras, 2010).

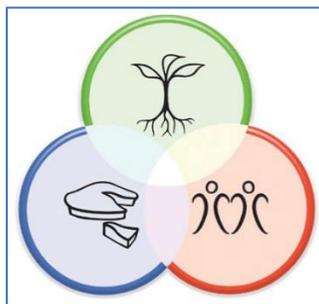


Figura 2.1. Principios que sustentan la ética de la permacultura

Fuente: “La Permacultura en la gestión del agua: El caso de Can Valldaura” (Nieto, 2012).

- **Respetar la Tierra.** Se refiere a nuestra responsabilidad, como seres humanos, de cuidar y preservar todas las especies con las que compartimos la Tierra, buscando satisfacer nuestras necesidades primordiales sin impedir que los demás seres vivos puedan satisfacer las suyas. Es representado mediante el ícono verde de la Figura 2.1.

- **Cuidar de la gente.** Involucra mantenerse sano y seguro para contribuir al bien común (cuidar a los demás). El ícono rojo de la Figura 2.1, el cual muestra dos personas juntas, expresa la necesidad del compañerismo y del esfuerzo comunitario para crear el cambio.
- **Consumir menos y compartir los excedentes.** Implica convertirnos en productores responsables, capaces de satisfacer las necesidades básicas a partir del propio esfuerzo, para que una vez cubiertas, poder compartir con los demás nuestros excedentes de tiempo, habilidades, conocimientos o recursos económicos; incluyendo la rehabilitación de áreas naturales y el establecimiento de límites al consumo y a la reproducción humana. Esta repartición equitativa es representada en el ícono azul de la Figura 2.1, en la que la rebanada de la tarta representa tomar lo que se necesita y compartir el resto con los demás.

Jordi Romero (2002), en su obra *El rebost de la ciutat*, describe que para aplicar la ética de la permacultura en una finca o en el jardín de una casa, se pueden seguir las siguientes recomendaciones (Citado en Acosta, 2015).

1. Planificar cualquier intervención antes de llevarla a cabo, a fin de no ser sorprendidos por las consecuencias a largo plazo, en pro de la sostenibilidad.
2. Evitar romper el equilibrio natural al implantar sistemas ambientales. Por eso, es aconsejable utilizar, siempre que se pueda, especies autóctonas de la zona donde se establece el sistema, para evitar los posibles riesgos asociados a las especies foráneas, e impedir las invasiones destructivas.
3. Cultivar el espacio de tierra más pequeño posible. Comenzar por sistemas a pequeña escala de forma intensiva, hasta tener un control de los mismos, evitando la ocupación de terrenos más extensos y el consumo de unas cantidades de energía mayores en prácticas extensivas.
4. Implantar sistemas de alta diversidad, preferiblemente policultivos, para conseguir una mayor estabilidad y resiliencia del agroecosistema, y así permitir que se adapten mejor a las variaciones ambientales o sociales.
5. Analizar el rendimiento total del sistema (cosechas de los cultivos, producción de los árboles y de los animales, ahorro de agua y energía que se obtiene), para percibir su eficiencia de manera global.
6. Utilizar sistemas ecológicos que requieran de insumos bajos de energía, como el sol, viento y agua, así como sistemas biológicos (plantas y animales con funciones interrelacionadas).
7. Recuperar el cultivo y la producción de alimentos en los pueblos y ciudades donde tradicionalmente siempre se había hecho, contribuyendo a preservar la agricultura. Es el

caso, por ejemplo, de fincas de permacultura orientadas principalmente a la producción de alimentos, las cuales contribuyen al consumo local.

8. Tratar de consumir de manera responsable y con conciencia, reciclando todos los residuos.
9. Ver soluciones donde en principio sólo se observan problemas. A la hora de intervenir en un ecosistema, se puede romper fácilmente su equilibrio, por lo que a pesar de considerar necesario aplicar un componente químico para combatir alguna plaga que nos puede causar daños en nuestro cultivo, es recomendable pensar y reflexionar previamente todas las ventajas e inconvenientes posibles.

2.2. Principios de diseño

Según Mollison (1988) "el diseño de la permacultura es un sistema de ensamblaje de componentes conceptuales, materiales y estratégicos en un patrón que funciona para beneficiar la vida en todas sus formas. Busca proveer un lugar sostenible y seguro para los seres vivos en esta tierra".

El diseño permacultural se sustenta en algunos principios ecológicos que sirven como guía. A continuación, se presentan 12 principios de diseño originalmente enunciados por Holmgren en su obra "Permaculture: Principles & Pathways Beyond Sustainability" (2002), los cuales son aceptados por la mayoría de los permacultores (Gras, 2010).

1. **Observar - interactuar.** La observación y la interacción son herramientas fundamentales de la permacultura que permiten reducir la necesidad de mano de obra repetitiva, el uso de energía no renovable y alta tecnología, fomentando el diseño creativo de sistemas de soporte humano, con acceso a poca energía, que satisfagan las necesidades sociales sin afectar a su entorno.
2. **Captar y almacenar energía.** El uso eficiente de las reservas energéticas acumuladas por el planeta durante millones de años es un aspecto primordial para el diseño de ambientes sostenibles, haciéndose indispensable el máximo aprovechamiento de la energía solar y creando conciencia de las limitaciones que conlleva el uso de los recursos energéticos no renovables, procurando su manejo adecuado para evitar su desperdicio y buscando formas sostenibles de almacenamiento de los recursos, con la finalidad de solventar las necesidades presentes sin comprometer a las generaciones futuras.
3. **Obtén un rendimiento, trabaja con la naturaleza no en su contra.** Implica tener en cuenta que todo nuestro bienestar proviene de la naturaleza, por lo que se deben diseñar sistemas que permitan un balance entre garantizar la satisfacción de las necesidades inmediatas y cumplir las metas de autosuficiencia a largo plazo.
4. **Aplicar la autorregulación y aceptar retroalimentación.** Diseñar sistemas sencillos y autosuficientes que no requieran grandes recursos humanos o materiales para su

mantenimiento. Adicionalmente, el funcionamiento de los elementos del sistema será un indicador del desempeño de éste, proporcionando así una retroalimentación.

5. **Usar y valorar los servicios y recursos naturales.** Construir sistemas que usen la energía solar, aprovechando la fuerza laboral humana, así como la flora y fauna del lugar.
6. **Producir cero desperdicios.** Diseñar e implementar sistemas y procesos que se alimenten y retroalimenten entre sí, de tal manera que se reduzca a cero la importación o exportación de materiales o desperdicios, es decir, contar con ciclos cerrados que se autogeneren a sí mismos.
7. **Diseñar de los patrones a los detalles.** Utilizar tres conceptos de diseño que permiten ir de los patrones a los detalles: sectores, zonas y pendiente, los cuales son principios de ubicación fundamentales para el diseño de un emplazamiento humano. Los sectores sirven para visualizar y analizar todas las influencias externas que confluyen dentro del sistema; las zonas permiten encontrar la distancia óptima de los elementos de la periferia hacia el centro principal de actividades; y la pendiente ayuda a ubicar de forma precisa los elementos del sistema, considerando las diferencias de elevaciones en los terrenos.
8. **Integrar en lugar de segregar.** Considerar la función de cada uno de los elementos que conforman un proyecto y la forma en que se conectan para generar un sistema auto-regulado con alta eficiencia operativa y productiva, tomando en cuenta los criterios de integración, multifuncionalidad y redundancia. La integración se refiere a que cada elemento está ubicado en relación a otro, en función de lo que requiere y lo que aporta; la multifuncionalidad establece que cada elemento del sistema a diseñar debe cumplir con dos o más funciones; y la redundancia estipula que cada una de las funciones de gran relevancia dentro del proyecto se deben apoyar en varios elementos.
9. **Usar soluciones lentas y pequeñas.** Elegir una escala sostenible para el sistema, con pocas necesidades externas y “haciendo cambios mínimos para lograr efectos máximos” (Hemenway, 2009).
10. **Usar y valorar la diversidad.** Seleccionar elementos que brinden diversidad al sistema y lo vuelvan integral, es decir, no enfocarse en un solo aspecto, con el fin de aumentar las posibilidades de éxito del proyecto.
11. **Usar los bordes y valorar lo marginal.** Utilizar los bordes como fuente de inspiración para diseñar, pues en la ecología son sitios de acumulación de energía, fertilidad y abundancia. Esto implica lograr la selección más adecuada para el proyecto, puesto que en los bordes se pueden obtener ventajas de dos o más ecosistemas a la vez.

12. **Usar y responder creativamente al cambio.** Crear sistemas flexibles y adaptables a diferentes tipos de condiciones adversas.

Los principios anteriormente mencionados tienen gran utilidad como base general, sin embargo, específicamente para el diseño de sistemas agrícolas, es importante destacar tres principios que agrega Hemenway (2009):

13. **Cada elemento debe tener múltiples funciones y cada función debe ser apoyada por múltiples elementos.** Crear un sistema donde la repetición permita garantizar la resiliencia del sistema para que, si un elemento del mismo falla, otros puedan realizar su función.
14. **Colaborar con la sucesión.** Trabajar con la naturaleza y no en su contra, manejando adecuadamente el ecosistema para tener sistemas con mayor autosuficiencia y rendimiento, con la menor intervención humana posible.
15. **Los errores son las herramientas del aprendizaje.** Evaluar continuamente el sistema para mejorar progresivamente su desempeño.

2.2.1. Principios de diseño propios para el agua

Debido a la importancia que tiene el agua para la vida, en la permacultura se hace énfasis en su conservación a través de tres principios de diseño que complementan los principios generales anteriormente descritos (Cruz & Cabrera, 2015).

1. Minimizar la entrada de agua en el sistema.
2. Reutilizar, tantas veces como sea posible el agua antes de que salga del sistema.
3. Asegurar que el agua tenga las condiciones de calidad adecuadas cuando sea descargada en el ambiente, aunque haya entrado al sistema contaminada.

Un diseño óptimo debe garantizar que el agua no se contamine y que no se pierda por escurrimiento y/o evaporación. En este sentido, otro aspecto relevante para el diseño consiste en que el agua, con respecto a otras sustancias, requiere la adición de más energía para elevar su temperatura en 1°C, y en contraparte, necesita un mayor desprendimiento de energía para rebajarla 1°C. Este comportamiento implica que, por ejemplo, producir 1 kg de carne de res necesita cien veces más agua que para cultivar 1 kg de algunos granos o cereales (Cruz & Cabrera, 2015).

3. Usos del agua en el mundo y en México

Como es ampliamente sabido, el agua es un recurso primordial para todas las formas de vida, al ser una pieza clave para el funcionamiento de los ecosistemas y en la provisión de servicios ambientales de los que dependemos para sobrevivir; sin embargo, su cantidad es cada vez más escasa y su calidad cada vez más pobre, debido principalmente al uso inadecuado e ineficiente de la misma. Por esta razón, para tener un contexto que permita darle solución a esta problemática, se analizará la situación del agua en México y en el mundo.

3.1. El agua en el mundo

Los recursos hídricos disponibles en todo el mundo han sufrido una disminución considerable debido a las alteraciones en la cantidad y calidad del agua, debidas a las distintas actividades humanas y a los fenómenos naturales que son cada vez más extremos como consecuencia del cambio climático.

La presión sobre los recursos hídricos está aumentando, principalmente como resultado de actividades humanas tales como la urbanización, el crecimiento demográfico, la elevación del nivel de vida, la creciente competencia por el agua y la contaminación, cuyas consecuencias se ven agravadas por el cambio climático y las variaciones en las condiciones naturales. (GreenFacts)

Según cifras del 2º Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo, del agua total en el mundo el 97.5% se encuentra en los océanos y el 2.5% es agua dulce. A su vez, de este 2.5% el 68.7% se encuentra en glaciares, 30.1% en aguas subterráneas, 0.8% en el permafrost, y 0.4% en el agua superficial y atmosférica; de esta última, el 67.4% se localiza en lagos de agua dulce, 12.2% en la humedad del suelo, 1.6% en ríos, el 9.5% en la atmósfera, 0.8% en las plantas y animales, y 8.5% en otros humedales, lo que equivale a 35.2 millones de kilómetros cúbicos (GreenFacts).

3.1.1. Usos del agua en el mundo

Durante el siglo XX, mientras que la población mundial se triplicó, las extracciones de agua se sextuplicaron, provocando que el grado de presión sobre los recursos hídricos del mundo aumentara estrepitosamente. Esta situación continúa en la actualidad, y sigue agravándose tanto por las altas tasas de crecimiento demográfico como por los efectos del cambio climático (Comisión Nacional del Agua, 2016).

En la Tabla 3.1 se muestran los países del mundo con mayor extracción de agua, en la que México se encuentra en el séptimo lugar. La clasificación de usos del agua utilizada en esta tabla considera el agrícola, el industrial (incluyendo el enfriamiento de centrales de energía) y el abastecimiento público. A nivel mundial, como se puede apreciar en la tabla, el principal uso del agua es el agrícola, con el 70% de la extracción total, según estimaciones realizadas por la FAO en su publicación (2011): “The state of the world’s land and water resources for food and agriculture – Managing systems at risk” (Comisión Nacional del Agua, 2016).

Tabla 3.1 Países con mayor extracción de agua y porcentaje de uso agrícola, industrial y abastecimiento público, 2015

No.	País	Extracción total de agua (miles de hm ³ /año)	% Uso agrícola	% Uso industrial	% Uso abastecimiento público
1	India	761.00	90.4	2.2	7.4
2	China	607.80	64.5	23.1	12.3
3	Estados Unidos de América	485.60	36.1	51.2	12.8

No.	País	Extracción total de agua (miles de hm ³ /año)	% Uso agrícola	% Uso industrial	% Uso abastecimiento público
4	Pakistán	183.50	94.0	0.8	5.3
5	Indonesia	113.30	81.9	6.5	11.6
6	Irán (República Islámica del)	93.30	92.2	1.2	6.6
7	México	85.66	76.3	9.1	14.6
8	Viet Nam	82.03	94.8	3.7	1.5
9	Filipinas	81.56	82.2	10.1	7.6
10	Japón	81.45	66.8	14.3	18.9
11	Egipto	78.00	85.9	2.6	11.5
12	Brasil	74.83	60.0	17.0	23.0
13	Iraq	66.00	78.8	14.7	6.5
14	Federación de Rusia	61.00	19.9	59.8	20.2
15	Tailandia	57.31	90.4	4.8	4.8
16	Uzbekistán	56.00	90.0	2.7	7.3
17	Italia	53.75	44.1	35.9	17.6
18	Turquía	42.01	80.9	10.7	15.5
19	Canadá	38.80	12.2	80.2	14.2
20	Argentina	37.78	73.9	10.6	15.5
21	España	37.35	68.2	17.6	14.2
22	Bangladesh	35.87	87.8	2.1	10.0
26	Francia	30.23	10.4	71.5	18.1
37	Sudáfrica	15.50	62.5	10.5	27.0

Fuente: “Estadísticas del Agua en México” (Comisión Nacional del Agua, 2016).

El uso de agua en la agricultura, que representa un importante porcentaje del agua disponible (tal como se aprecia en la tabla anterior), se puede mirar como un exceso desde ciertos ámbitos, considerando la situación actual de limitaciones en la disponibilidad del agua, sin embargo, no se puede perder de vista que esta parte del consumo del agua se dedica a producir los alimentos que la sociedad necesita consumir, volviéndose así el uso agrícola del agua una necesidad para la población, tan importante como el agua para consumo humano.

3.2. El agua en México

Además de ser un recurso vital, el agua factor estratégico para el desarrollo del país. Según información obtenida del Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C. (2016), “México dispone aproximadamente del 0.1% del total de agua dulce disponible a nivel mundial, lo que determina que un porcentaje importante del territorio esté catalogado como zona semidesértica”.

3.2.1. Usos del agua en México

Los usos del agua en México han sido clasificados en dos grandes grupos: usos consuntivos y no consuntivos. Los primeros hacen referencia a aquellos en los que el agua es consumida, mientras los segundos implican un aprovechamiento del agua que no provoca un consumo, tal como la generación de energía en las hidroeléctricas.

Según el informe de “Estadísticas del Agua en México”, el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) se encarga de registrar los volúmenes concesionados o asignados a los usuarios de aguas nacionales, con base a su propia clasificación de los usos del agua en diversos rubros, los cuales se detallan en la Tabla 3.2 (Comisión Nacional del Agua, 2016).

Tabla 3.2. Agrupación de usos de la clasificación del REPGA

Clave	Rubro de clasificación del REPGA	Vol. concesionado (hm ³)
A	Agrícola (inscrito+pendiente)	58 450
B	Agroindustrial	4
C	Doméstico	39
D	Acuacultura	1 136
E	Servicios	1 474
F	Industria 6 347	
F1	Industria excluyendo termoeléctricas	2 198
F2	Termoeléctricas	4 149
G	Pecuario	207
H	Público urbano	12 441
I	Múltiples	5 566
K	Comercio	0.1
L	Otros	0.5
Subtotal consuntivo		85 664
J	Hidroeléctricas	180 895
Subtotal no consuntivo		180 895
Total		266 559

Nota: El REPGA, mediante las claves F1 y F2 distingue entre la generación de electricidad consuntiva (por centrales térmicas) de la no consuntiva (por hidroelectricidad).

Fuente: “Estadísticas del Agua en México” (Comisión Nacional del Agua, 2016).

De la clasificación mostrada en la tabla anterior, surgen algunos usos agrupados que se describen en la Tabla 3.3 y se ilustran en la Figura 3.1.

Tabla 3.3. Usos agrupados consuntivos según la clasificación del REPGA

Usos agrupados consuntivos	Definición	Vol. concesionado (hm ³)
Agrícola	A+D+G+I+L	65 359
Abastecimiento público	C+H	12 480
Industria autoabastecida	B+E+F1+K	3 676
Energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad	F2	4 149

Usos agrupados consuntivos	Definición	Vol. concesionado (hm ³)
	Subtotal consuntivo	85 664
Hidroeléctricas	J	180 895
	Subtotal no consuntivo	180 895
	Total	266 559

Fuente: "Estadísticas del Agua en México" (Comisión Nacional del Agua, 2016).

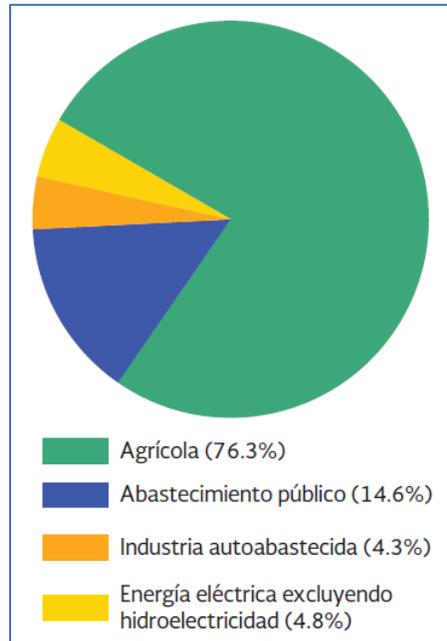


Figura 3.1. Distribución de volúmenes concesionados por usos agrupados consuntivos, 2015

Fuente: "Estadísticas del Agua en México" (Comisión Nacional del Agua, 2016).

Durante el 2015, el volumen total de 85,664 hm³ concesionados para usos consuntivos se distribuyó de la siguiente manera:

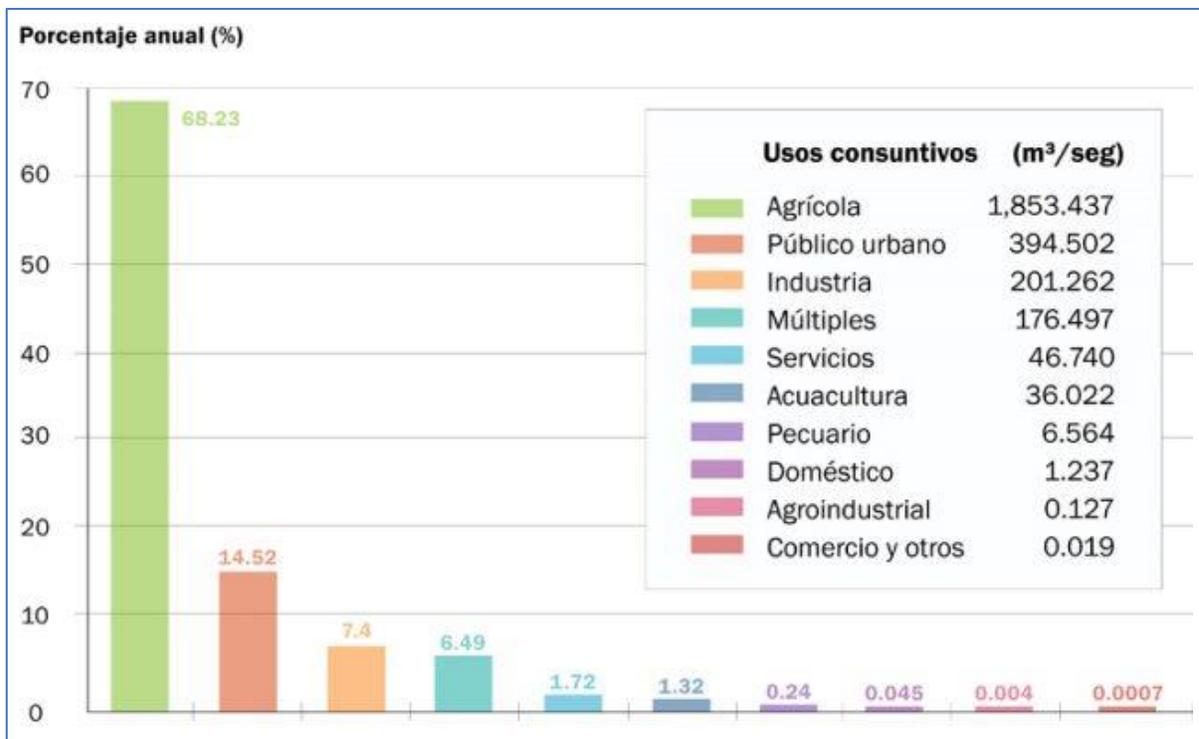


Figura 3.2. Usos consuntivos del agua en México, 2015

Fuente: “Visión General del Agua en México” (Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C., 2016).

Como se observa en la gráfica de la Figura 3.2, el uso agrícola ocupa el primer lugar al consumir el 68.23% del volumen total concesionado, seguido del uso público urbano con el 14.52%. Estos usos del agua son los más importantes, pues consumen más del 80% del agua concesionada. Con porcentajes aún significativos siguen el uso industrial con 7.4% y los usos múltiples con 6.49%, mientras que el resto no alcanzan el 2%.

Sin embargo, en nuestro país el sector que más agua desperdicia es precisamente el mismo que más la consume: el sector agropecuario (agricultura y ganadería). La Comisión Nacional del Agua estima que 57% del agua que se consume en estas actividades se pierde por evaporación, pero aún más se pierde debido a las malas condiciones de la infraestructura de riego, pues la mayor parte de las instalaciones de los sistemas de riego del país son ineficientes, se encuentran en mal estado o son obsoletas. Como dato se tiene que la superficie irrigada es de 6.3 millones de hectáreas y aporta el 42% de la producción agrícola nacional, aunque el punto desfavorable radica en que las pérdidas por infiltración y evaporación ascienden a más de 60% del agua almacenada y distribuida para fines agrícolas (Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C., 2016).

Específicamente, la ciudad mexicana que más agua desperdicia es también la más grande del país: la Ciudad de México, así como su área metropolitana. En esta zona, denominada Cuenca del Valle de México, el principal desperdicio del agua se debe a las fugas de la red hidráulica, pues según la Comisión Nacional del Agua, el sistema presenta pérdidas que alcanzan el 38% (Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C., 2016).

3.3. Uso eficiente del agua

Existen en el mundo diversos problemas relacionados con el agua: la disponibilidad, la contaminación, el desperdicio, etc. Ante este panorama, la principal medida para mitigar esta situación la constituyen los programas de ahorro, conservación o uso eficiente del agua.

Optar por la implementación de sistemas de uso eficiente del agua no sólo aporta beneficios al propio sistema en sí, sino que se desprenden diversas mejoras significativas para otros usuarios; ya que, por ejemplo, si se lleva a cabo un programa de ahorro de agua en zonas habitacionales, la demanda de agua disminuiría considerablemente, resultando en una menor explotación de las aguas superficiales y subterráneas (disminuyendo el grado de presión sobre los acuíferos actualmente sobreexplotados), se tendría una mayor calidad del agua (al optimizar su uso y reducir su contaminación), existiría además una menor necesidad de obras de conducción nuevas (las cuales representan un costo adicional en los impuestos), y que al reducir los niveles de consumo se tendría como consecuencia un decremento en la producción de agua residual, facilitando su tratamiento y disminuyendo así el riesgo de contaminación de los cuerpos receptores y acuíferos.

Esta situación ejemplifica fácilmente cómo el uso eficiente del agua permite optimizar todas las diferentes actividades involucradas en su extracción, manejo, distribución y consumo; así como en el correspondiente retorno de aguas residuales.

3.3.1. Uso eficiente del agua en la agricultura

Álvarez (2011), menciona que “el uso eficiente del agua en el campo es uno de los factores fundamentales para poder garantizar la producción alimentaria y el trabajo de las familias mexicanas vinculadas con el sector agrícola” (Citado en Salazar, Rojano, & López, 2014).

En este sentido, Fernández y Camacho (2005) definen la “eficiencia en el uso del agua (EUA)” o “productividad del agua (PA)” como “la relación existente entre la biomasa presente en un cultivo por unidad de agua utilizada por éste en un determinado momento. Cuando se pretende enfocar el empleo del agua por un componente meramente productivo y económico, se recurre a sustituir la biomasa por el rendimiento en kg de producto por m³ de agua utilizada” (Citado en Salazar, Rojano, & López, 2014).

$$Ef \text{ Agua} = \frac{\text{Producción (kg)}}{\text{Agua utilizada (m}^3\text{)}}$$

Figura 3.3. Expresión para el cálculo de la EUA o PA

Fuente: “La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada” (Salazar, Rojano, & López, 2014).

Tabla 3.4. Valores de productividad del agua, PA (kg/m³) obtenidos para distintos cultivos de regadío en diferentes condiciones climáticas y de cultivo

Condiciones de cultivo	Zona	Tomate	Pimiento	Melón
Aire libre	Israel	17		

Condiciones de cultivo	Zona	Tomate	Pimiento	Melón
	Francia	14		
	USA		11	16.2
	Castilla-La Mancha (España)	6.8	4.04	4.0-9.9
	Navarra (España)	8.5	1.7	
	Córdoba (España) (aire libre)		2.4	
	(acolchado)		4.5	
Invernadero sin climatizar	Israel (suelo)	33		
	Francia (suelo)	24		
	Almería (España) suelo (ciclo: agosto a mayo)	37.5	16.9	
	Almería (España) suelo (ciclo: agosto a enero)	25	21	
Invernadero climatizado	Almería (España) suelo (ciclo: enero a junio)	16		22.8
	Francia (hidropónico)	39		
	Holanda (hidropónico)	45	33	

Fuente: “Eficiencia en el uso del agua en distintos sistemas hortícolas” (Fernández, 2006).

A continuación, en la Tabla 3.5, se reportan los litros de agua utilizados por kilogramo de jitomate (lo cual es el inverso de la eficiencia en el uso del agua) para diferentes tipos de tecnologías estudiadas por Stanghellini (2010). Cabe destacar que, para producir una unidad de masa, un invernadero de alta tecnología puede utilizar hasta 75 veces menos agua que la agricultura a campo abierto con bajos niveles de tecnología (Citado en Salazar, Rojano, & López, 2014).

Tabla 3.5. Litros de agua utilizados por kilogramo de jitomate producido

Método de producción	País	L/kg
Campo abierto en general	Varios	100-300
Campo abierto, riego por goteo	Israel	60
Campo abierto	Almería, España	50-60
Invernaderos de plástico sin calefacción	Israel, España	30-40
Invernaderos de cristal con control avanzado y calefacción, enriquecimiento CO ₂	Holanda	22
Igual que el anterior, con sistema hidropónico	Holanda	15
Igual que el anterior, con sistema hidropónico cerrado	Holanda	4

Fuente: “La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada” (Salazar, Rojano, & López, 2014).

Como se puede apreciar en la tabla anterior, con el paso de los años se han desarrollado nuevas técnicas para incrementar la eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. Entre estas técnicas modernas destaca el *invernadero*, el cual “es un sistema de producción que puede incrementar la eficiencia en el uso del agua, creando un microclima para mejorar la fotosíntesis de la planta, reduciendo la evapotranspiración excesiva e incrementando los rendimientos” (Salazar, Rojano, & López, 2014).

Durante estudios realizados por diferentes autores, se ha comprobado que los cultivos bajo invernadero tienen menores necesidades de agua que los cultivos a campo abierto. Adicionalmente,

la FAO (1991) señala que “en regiones con alta radiación solar, un invernadero de plástico puede reducir el uso del agua en un cultivo en 30%”; por otra parte, Antón *et al.* (2003) mencionan que “la evapotranspiración en invernadero se reduce un 70% respecto a la del aire libre”; mientras que Fernández y Camacho (2005), en sus investigaciones realizadas en Almería, España, encontraron que “se reduce el uso del agua entre 40-50% debido a la disminución en la radiación solar y el viento” (Citados en Salazar, Rojano, & López, 2014).

De todos los estudios llevados a cabo por los autores antes mencionados, se llegó a la conclusión de que, en general, la producción bajo invernaderos incrementa la eficiencia en el uso del agua por tres razones (Salazar, Rojano, & López, 2014):

1. Se reduce la evapotranspiración (menor radiación, mayor humedad).
2. Incremento de los rendimientos debido a un mejor control de plagas y enfermedades.
3. Técnicas avanzadas de riego (riego por goteo y reúso del agua).

Medrano *et al.* (2007) mencionan algunas opciones para incrementar la eficiencia en el uso del agua por parte de las plantas:

1. Institucional: educación y formación; infraestructuras de captación y suministro, incentivos legales y multas.
2. Implantación de sistemas de cultivo y de riego para optimizar el control del agua aplicada.
3. Manejo del suelo orientado a incrementar la EUA (introducción de residuos, coberturas). Estrategias de ordenación de cultivos, rotaciones, marcos de plantación.
4. Introducción de especies y variedades de mayor EUA.
5. Aplicación de calendarios y dosis de riego orientados a incrementar la EUA. Riego deficitario controlado. Agricultura de la precisión.

4. Distribución del agua y la población

Aunque la cantidad de agua presente en el planeta no cambia, sí se presentan variaciones en cuanto al lugar, la forma y la calidad en que se encuentra ésta. Es en este sentido, que la decreciente disponibilidad del agua es una consecuencia directa tanto de su mal uso (de forma alarmante, en los últimos años la cantidad y calidad del agua han disminuido, respectivamente, por la sobreexplotación y la contaminación ocasionadas por el ser humano) como de su desigual distribución. Esta última, puede notarse fácilmente, puesto que en todo el planeta existen regiones donde el agua abunda, pero están asentados muy pocos habitantes y, por el contrario, es escasa en las zonas con mayor concentración poblacional.

La distribución espacial del agua es desigual, y lo es aún más si se le relaciona con la población, por ejemplo, la disponibilidad anual de agua por habitante en miles de metros cúbicos, es de 109 para Canadá, 15 para la Unión Soviética, 10 para los Estados Unidos de Norteamérica, 4 para México y 0.16 para Arabia Saudita y Jordania. (Arreguín, 1991)

4.1. Distribución y disponibilidad del agua en el mundo

Shiklomanov (2000), señala que de los cerca de 113,000 km³ de agua que precipitan anualmente sobre la Tierra, alrededor de 71,000 km³ se evaporan hacia la atmósfera, mientras los 42,000 km³ restantes recargan los acuíferos o regresan al océano por medio de los ríos; ya que estas formas de agua dulce (aguas superficiales y subterráneas) son las que constituyen los recursos acuáticos renovables del planeta, es importante mencionar que sus volúmenes realmente disponibles se calculan entre 9,000 y 14,000 km³, de los cuales se necesita cerca del 70% para sostener los ecosistemas terrestres, reduciéndose a un 30% (aproximadamente 4,200 km³) la cantidad de agua realmente disponible para todos los usos humanos directos, la cual si se divide entre los 6,000 millones de seres humanos que habitan nuestro planeta, resultaría en una disponibilidad per cápita de unos 700 m³ al año (Citado en Toledo, 2002).

A pesar de que esta cantidad de agua disponible por persona es aceptable, el principal problema radica, tal como lo menciona Shiklomanov (2000), en que estos recursos acuáticos de la Tierra varían considerablemente en espacio y tiempo, pues la mayor parte se ubican en Asia y Sudamérica (13,500 y 12,000 km³ por año, respectivamente), mientras que son escasos en Europa, Australia y Oceanía (2,900 y 2,400 km³ por año, respectivamente); por ello, se debe tener en cuenta que la posibilidad de utilizar esta cantidad de agua, depende tanto de su disponibilidad como de su variabilidad a lo largo del año. Como ejemplo, basta con mencionar que la mayor parte del agua dulce del planeta (más del 40% de los ríos del mundo) se concentra en seis países (Brasil, Rusia, Canadá, EE.UU., China e India), y que la cantidad de agua dulce disponible varía de acuerdo con las estaciones del año, puesto que la mayor parte de los flujos en los ríos ocurren entre abril y julio (46%) en Europa, durante junio y octubre (54%) en Asia, en septiembre-diciembre (44%) en África, durante abril-julio (45%) en Sudamérica, y durante enero-abril (46%) en Australia y Oceanía; esto implica que, en promedio, entre mayo y agosto ocurren cerca del 46% del total global de las descargas de los ríos (Citado en Toledo, 2002).

Actualmente, más de 80 países, los cuáles albergan el 40% de la población mundial, sufren una grave escasez de agua y esta situación puede empeorar en los próximos 50 años, en la medida que aumente la población y que el cambio climático global altere los regímenes de precipitaciones (FEA, CEMDA, & Presencia Ciudadana Mexicana, A.C., 2006).

A continuación, en la Tabla 4.1, se presentan algunas cifras que describen la situación de los recursos de agua dulce en el mundo.

Tabla 4.1. Recursos de agua dulce en el mundo, 2002

Región	Metros cúbicos anuales (promedio per cápita)
Oceanía	53 711
Sudamérica	36 988
África Central	20 889
América del Norte	16 801
Europa del Este	14 818

Región	Metros cúbicos anuales (promedio per cápita)
Europa Occidental	1 771
Asia Central y del Sur	1 465
África del Sur	1 289
África del Norte	495

Fuente: “El agua en México: lo que todas y todos debemos saber” (FEA, CEMDA, & Presencia Ciudadana Mexicana, A.C., 2006).

4.2. Distribución y disponibilidad del agua en México

Como se ha comentado anteriormente, pese a que el agua tiene una gran influencia en la salud, el desarrollo y el bienestar social, el pobre manejo de este recurso ha llevado a su escasez y contaminación, motivo por el cual su disponibilidad se ha reducido significativamente, provocando que el acceso a ésta sea cada vez más difícil.

México recibe alrededor de 1,489 mil millones de metros cúbicos al año de agua en forma de precipitación, de los cuales el 67% cae entre junio y septiembre, sobre todo en la región sur-sureste (Chiapas, Oaxaca, Campeche, Quintana Roo, Yucatán, Veracruz y Tabasco), donde se recibe 49.6% de la lluvia. De este total 73% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, 22% escurre por los ríos o arroyos y 6% se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. (Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C., 2016)

Estas cifras, destacan el problema de distribución del agua que existe en nuestro país, pues en los estados norteños que abarcan el 50% del territorio nacional, llueve sólo 25% del total, mientras que, en la parte angosta del país, donde se encuentran los estados del sur-sureste que ocupan el 27.5% del territorio, cae la mayoría del agua de lluvia (49.6%). Como un ejemplo esta distribución desigual del agua en México, basta con comparar a Baja California, uno de los estados más secos del país, donde sólo llueve un promedio de 199 mm por año, con Tabasco, el cual recibe 2 588 mm de agua por año. Esta heterogénea distribución de los recursos hídricos de México, implica que en un área donde se capta 20% de la precipitación del agua del país, se encuentra 76% de la población, 90% de la irrigación, 70% de la industria, y se genera 77% del producto interno bruto (FEA, CEMDA, & Presencia Ciudadana Mexicana, A.C., 2006).

En la clasificación mundial, México está considerado como un país con baja disponibilidad de agua, pues al hacer un balance entre las exportaciones e importaciones de agua con los países vecinos, cuenta con 471.5 mil millones de metros cúbicos de agua dulce renovable por año (Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C., 2016).

Adicionalmente, el incremento de la población y su concentración en zonas urbanas, son factores de gran importancia que influyen en la disponibilidad de agua. De acuerdo a estimaciones del Consejo Nacional de Población (CONAPO), entre 2012 y 2030 la población del país se incrementará en 20.4 millones de personas, y para 2030 cerca del 75% de ésta se concentrará en localidades

urbanas, disminuyendo así la cantidad de agua renovable per cápita a nivel nacional (Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C., 2016).

En 2012, con una población de 117 millones de habitantes, la disponibilidad natural media por habitante se calculaba en 4,028 metros cúbicos por año. Se estima que para 2030, con el aumento de la población y el deterioro de los cuerpos de agua descenderá hasta 3,430 metros cúbicos por habitante por año. (Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C., 2016)

Otro elemento significativo que afecta la disponibilidad del agua, es el incremento del consumo de agua per cápita. Para darnos una idea, en el año de 1955, un mexicano consumía cerca de 40 litros al día, mientras que en el 2012 pasó a consumir 280 litros al día (Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C., 2016).

Con todas estas cifras podemos certificar que la disminución en la disponibilidad del agua por habitante es un problema que se irá agravando cada vez más con el paso de los años, debido al creciente incremento poblacional y su asociado aumento en el consumo del agua. Es por esta razón que se deben implementar acciones concretas que permitan contrarrestar esta situación, tales como reducir la demanda de agua, mediante un incremento en la eficiencia de los sistemas de distribución de agua en las ciudades y de los sistemas de riego; e incrementar la oferta de agua, por medio de un aumento en el volumen de agua pluvial recolectada y el reúso de agua residual tratada. En otras palabras, la decreciente disponibilidad de agua sólo puede contrarrestarse mediante un uso eficiente de la misma.

Para tener un panorama más claro sobre la situación del agua en México, en la Tabla 4.2 se presentan las cifras de disponibilidad natural media per cápita de los años 2006 al 2016, mismas que se ilustran en la gráfica mostrada en la Figura 4.1.

Tabla 4.2. Disponibilidad natural media per cápita en México, 2006-20016

Año	Disponibilidad natural media per cápita (m ³ /hab/año)
2006	4 416
2007	4 312
2008	4 288
2009	4 263
2010	4 090
2012	4 028
2013	3 982
2014	3 736
2015	3 692
2016	3 687

Fuente: Elaboración propia con datos de “Disponibilidad natural media total y per cápita por Región Hidrológico-Administrativa” (SEMARNAT, 2016).

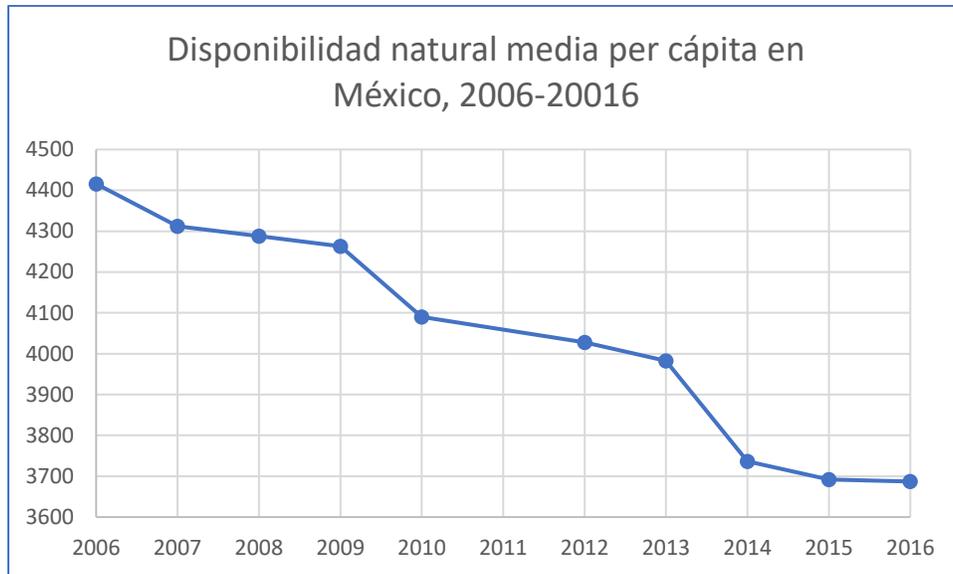


Figura 4.1. Disponibilidad natural media per cápita en México, 2006-2016

Fuente: Elaboración propia con datos de "Disponibilidad natural media total y per cápita por Región Hidrológico-Administrativa" (SEMARNAT, 2016).

5. Métodos de riego

El riego tiene el objetivo de cubrir las necesidades de agua de las plantas en la cantidad y calidad suficientes, así como en el tiempo oportuno para que la humedad del suelo en la zona de las raíces brinde las condiciones más favorables para el crecimiento de los cultivos.

Podemos hablar de una buena práctica de riego como un manejo del agua que permite su perduración en el tiempo, en suficiente cantidad y calidad; para ello, se debe seguir un proceso lógico de toma de decisiones que permita asegurar la aplicación de una cantidad de agua lo más ajustada posible para cubrir las necesidades del cultivo. Este proceso consta de tres fases fundamentales (WWF España, 2009):

- Conocer el **ciclo de desarrollo del cultivo** en cuestión y la **sensibilidad al estrés hídrico** en cada una de sus etapas.
- Calcular las **necesidades hídricas del cultivo** mediante la metodología más exacta disponible.
- Establecer las **pautas de aplicación de los aportes de agua** de riego.

Además, es necesario manejar otros aspectos fundamentales, los cuales se abordarán en los puntos posteriores, tales como la importancia que tiene la calidad del agua utilizada en el riego, así como una descripción a detalle de algunos conceptos básicos relacionados con el riego y de los distintos sistemas de riego existentes.

5.1. Calidad del agua utilizada en el riego

La calidad del agua se refiere a las características físicas, químicas y biológicas que determinan si ésta tiene una condición adecuada o no, en función del uso que se le desee dar.

En este sentido, conocer la calidad del agua de riego es fundamental para la elección más apropiada del método de riego a utilizar, su manejo y el cultivo a implantar. Esta calidad, estará determinada por las sales que se encuentran en ella, y dependerá de la naturaleza de éstas y de sus concentraciones. Basta con realizar un análisis fiable del agua de riego para, según su salinidad y tomando en cuenta la tolerancia de los cultivos a ésta, determinar las estrategias de riego más adecuadas que deben llevarse a cabo (Carrazón, 2007).

Los principales problemas relacionados con el uso de aguas salinas para riego son (Carrazón, 2007):

- **Salinización del suelo:** las sales presentes en el agua o en el suelo reducen la disponibilidad de agua para el cultivo, provocando un estado de marchitamiento y afectando por tanto a los rendimientos.
- **Problemas de infiltración del agua en el suelo:** un contenido relativamente alto de sodio o relativamente bajo de calcio en el agua o el suelo, reduce la tasa a la cual el agua de riego se infiltra, hasta el extremo de no poder abastecer al cultivo de manera adecuada.
- **Toxicidad:** cuando se acumulan en cantidad suficiente, algunas sales resultan tóxicas para los cultivos, u ocasionan desequilibrios en la absorción de los nutrientes.
- **Otros problemas:** particularmente obstrucciones en los emisores de riego y corrosión de las conducciones, pero también exceso de nutrientes que reducen el rendimiento o la calidad, y depósitos de sales en frutas u hojas que afectan al valor comercial.

El agua de riego contiene determinadas sales que se añaden a las ya existentes en el suelo, de éstas, nos interesan aquellas que son solubles y además se descomponen en iones —átomos o grupos de átomos con una carga eléctrica positiva (cationes) o negativa (aniones)—. Los iones más comunes que se encuentran en el agua para riego son los que se muestran en la Tabla 5.1 (Carrazón, 2007).

Tabla 5.1. Iones más comunes en el agua para riego y pesos equivalentes

Cationes		Aniones	
Nombre y símbolo	P _{eq}	Nombre y símbolo	P _{eq}
Calcio (Ca ²⁺)	20.0	Cloruro (Cl ⁻)	35.5
Sodio (Na ⁺)	23.0	Sulfato (SO ₄ ²⁻)	48.0
Magnesio (Mg ²⁺)	12.2	Bicarbonato (CO ₃ H ⁻)	61.0
Potasio (K ⁺)	39.1	Carbonato (CO ₃ ²⁻)	30.0
Boro (B ³⁺)	3.5	Nitrato (NO ₃ ⁻)	62.0
Hierro (Fe ²⁺)	27.9		

Fuente: “Manual práctico para el diseño de sistemas de minirriego” (Carrazón, 2007).

La salinidad del agua de riego se puede determinar mediante dos procedimientos de laboratorio (Carrazón, 2007):

- **Medida del contenido en sales (SD, sólidos disueltos):** se evapora una muestra de agua en una estufa y se pesa el residuo sólido, se suele expresar en mg/L o en meq/L.
- **Medida de la conductividad eléctrica (CE):** se mide a una temperatura del agua de 25 °C.

Existen varios criterios que establecen si el agua puede usarse para el riego, según la cantidad de sales disueltas en ella. La Tabla 5.2, presentada a continuación, fue elaborada por Ayers y Westcott (1985) e indica el riesgo de producirse problemas de salinidad según los siguientes límites en contenido de sales (Citado en Carrazón, 2007).

Tabla 5.2. Grado de restricción para la utilización del agua en función de la salinidad

Parámetro	Ninguna	De ligera a moderada	Severa
CE (dS/m)	< 0.7	0.7 – 3.0	> 3.0
ó			
SD (mg/L)	< 450	450 – 2,000	> 2,000

Fuente: “Manual práctico para el diseño de sistemas de minirriego” (Carrazón, 2007).

5.2. Conceptos básicos de los sistemas de riego

Los sistemas de riego tienen como finalidad el proveer a los cultivos el agua necesaria para su óptimo desarrollo, complementando así la que reciben de forma natural mediante las precipitaciones. Ante la situación de escasez creciente de los recursos hídricos, se ha vuelto cada vez más importante la instalación de sistemas de riego que favorezcan el uso eficiente del agua, disminuyendo o evitando, en medida de lo posible, las pérdidas que suelen presentarse en dichos sistemas.

Para entender mejor su funcionamiento, se detallan a continuación algunos conceptos básicos relacionados con estos sistemas de riego (WWF España, 2009):

1. **Uniformidad de aplicación:** se refiere a que el agua distribuida llegue por igual a todos los puntos de la parcela regada, pues una buena uniformidad garantiza que todas las plantas estén bien regadas (que ninguna reciba agua en exceso o le falte agua), con el fin de asegurar el desarrollo homogéneo del cultivo y su máxima capacidad productiva; ya que es una característica propia de cada instalación y parcela, se puede estimar mediante mediciones en campo y se expresa mediante un porcentaje. Por ejemplo: un coeficiente de uniformidad del 80% indicaría que el 80% de la parcela ha recibido la cantidad de agua deseada, mientras que el 20% restante ha sido regado en mayor o menor cantidad (Figura 5.1).

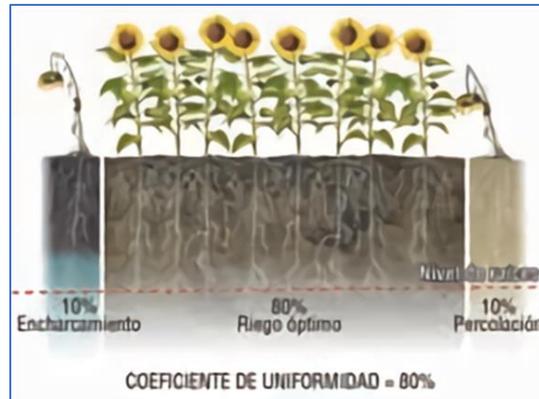


Figura 5.1. Uniformidad de aplicación del agua de riego

Fuente: "Manual de Buenas Prácticas de Riego: Propuestas de WWF para un uso eficiente del agua en la agricultura" (WWF España, 2009).

2. **Eficiencia de aplicación:** se refiere a la relación, expresada en porcentaje, entre dos cantidades de agua: la que sale del punto de suministro y la que realmente aprovechan las plantas, siendo también una característica propia de cada instalación. Por tanto, una eficiencia del 75% indica que sólo ese porcentaje del agua suministrada lo tomarán las plantas, mientras que el 25% restante tendrá otros destinos (Figura 5.2), esto debido a que en el proceso de riego ocurren pérdidas en diferentes momentos (Figura 5.3), las cuales se clasifican en:
 - a. **Pérdidas de transporte:** son las que ocurren en las conducciones que van desde el punto de suministro hasta la parcela de riego. Por ejemplo: fugas en tuberías y canales, evaporación en conducciones abiertas, etc.
 - b. **Pérdidas de aplicación:** son aquellas que se originan en la instalación dentro de la parcela de riego. Por ejemplo: fugas en tuberías; evaporación (bajo condiciones de viento y altas temperaturas) en el chorro de los emisores, en las hojas mojadas del cultivo o en la lámina superficial de agua.
 - c. **Pérdidas en el suelo:** son aquellas que se producen cuando se ha superado la capacidad de infiltración del suelo o éste se encuentra saturado, y el agua comienza a escurrir e incluso a escapar de la profundidad de acción de las raíces percolando a capas profundas del mismo.

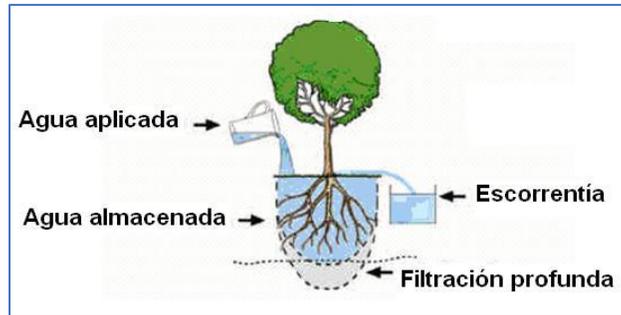


Figura 5.2. Eficiencia de la aplicación del agua de riego
Fuente: "Eficiencia del riego" (EcuRed, s.f.).

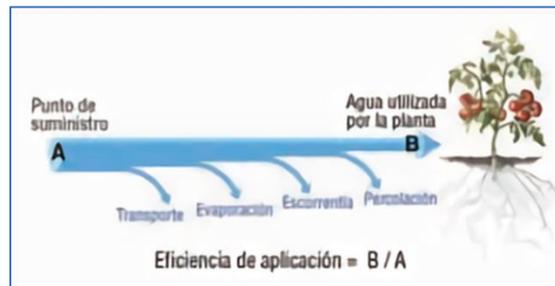


Figura 5.3. Pérdidas en la distribución del agua de riego
Fuente: "Manual de Buenas Prácticas de Riego: Propuestas de WWF para un uso eficiente del agua en la agricultura" (WWF España, 2009).

En la eficiencia general de riego influyen todos los factores involucrados: el sistema de riego, el diseño de la instalación, su mantenimiento y su manejo. En términos generales, la eficiencia teórica del riego para diferentes sistemas es (WWF España, 2009):

- Riego por goteo: 85-95%
- Riego por pivot: 80-90%
- Riego por aspersión: 65-85%
- Riego por gravedad o a pie: 30-70%

Cabe destacar que es importante tanto conocer la necesidad real de agua del cultivo, como la eficiencia del sistema de riego empleado, para poder asegurar que llegue a la planta el volumen de agua necesario para que ésta se desarrolle en óptimas condiciones, y así evitar que se presenten en los cultivos diversos problemas derivados del suministro de volumen de agua subestimado por no considerar las pérdidas que ocurren a lo largo de todo el proceso de riego.

Fernández (2006) menciona que existen varios mecanismos para aumentar la eficiencia de riego, los cuales se pueden agrupar en:

1. Técnicas o medidas que permitan incrementar la productividad de los cultivos, tanto en términos de rendimiento como económicos.

En este punto habría que considerar la importancia de las mejoras genéticas que permiten obtener variedades de especies con un mayor índice de cosecha, así como las prácticas o técnicas de cultivo más adecuadas para las condiciones de una zona en particular (tipos de fertilizante, medidas para el control de plagas y enfermedades, densidades de plantación, entre otras). Adicionalmente, la elección de la rotación de cultivo también es importante para maximizar los beneficios a nivel parcela.

2. Mejorar la gestión del riego

Una parte fundamental de la gestión de riego es la reducción de la necesidad del mismo, lo cual puede lograrse de diferentes maneras:

- reduciendo la evaporación del suelo (uso de acolchados, adopción de sistemas de riego localizado o mayores densidades de plantación)
- reduciendo las pérdidas de drenaje, siempre que exista compatibilidad con el manejo de la salinidad.
- disminuyendo la escorrentía con el uso de restos de cultivo, evitando la compactación del suelo.

Además, para llevar a cabo una adecuada gestión del riego es muy importante tener datos sobre las necesidades hídricas de los cultivos, y en cuanto al sistema de riego a utilizar, buscar que éste tenga una alta eficiencia y excelente uniformidad (expresada por el valor del coeficiente de uniformidad). En este sentido, la falta de uniformidad en el riego se debe normalmente a problemas de diseño (falta de presión o diferencias de presión entre subunidades de riego) o a la calidad del material utilizado en la instalación.

5.3. Clasificación de los sistemas de riego

Los sistemas de riego normalmente se clasifican en tres grandes categorías: riego por gravedad o a pie, por aspersión y localizado, los cuales se describirán a detalle en los siguientes puntos.

5.3.1. Riego por gravedad o a pie

En este sistema de riego, el agua es distribuida por la parcela gracias a la energía derivada de su peso propio, circulando libremente por el terreno a favor de pendiente. Mediante este método de riego normalmente se moja la superficie total del terreno, requiriendo la realización de modificaciones físicas del mismo, tales como surcos, tablares, canteros o alcorques, para controlar la distribución del agua (WWF España, 2009).

Aunque en el riego por gravedad se pueden conseguir buenas eficiencias de aplicación (mediante un diseño adecuado, nivelación de parcela y buen manejo), sus altos requerimientos en mano de obra hacen que vaya desapareciendo en favor de la aspersión y el goteo. (WWF España, 2009)



Figura 5.4. Riego por gravedad o a pie

Fuente: “Manual de Buenas Prácticas de Riego: Propuestas de WWF para un uso eficiente del agua en la agricultura” (WWF España, 2009).

5.3.2. Riego por aspersión

El riego por aspersión es un método que consiste en la aplicación del agua de riego por medio de aspersores que simulan una lluvia natural, requiriendo disponer de una adecuada presión para el óptimo funcionamiento de éstos. Este método requiere de una red de tuberías de PVC, de metal o mangueras plásticas o de polietileno, a través de la cual el agua se mueve bajo presión antes de ser entregada al cultivo por medio de los aspersores (FONCODES, 2014).

Considerando que el aspersor es el elemento clave de este sistema de riego, con el tiempo se han fabricado una gran variedad de aspersores, como los de impacto, de doble boquilla, de media presión, entre otros. En este sentido, la selección del tipo de aspersor es fundamental, ya que la combinación entre el tipo de boquilla y presión es lo que determina el tamaño de las gotas, y éste a su vez es de gran importancia, pues no son deseables ni las gotas demasiado grandes, ya que tienden a compactar el terreno o producir daños en las hojas, ni las demasiado pequeñas, pues ocasionan una mala uniformidad y eficiencia, al ser muy sensibles al viento y vaporizarse con rapidez (WWF España, 2009).



Figura 5.5. Riego por aspersión

Fuente: “Manual de Buenas Prácticas de Riego: Propuestas de WWF para un uso eficiente del agua en la agricultura” (WWF España, 2009).

5.3.2.1. Ventajas del riego por aspersión

A continuación, se enumeran algunas de las ventajas del riego efectuado por medio de aspersores (FONCODES, 2014):

- Ahorro de mano de obra.
- Es un método de riego apto para muchos cultivos.
- Se utilizan tuberías, por lo que se puede reducir las pérdidas por filtración al máximo.
- Se evita el uso de canales en tierra con riesgos de desborde, erosión y conflictos de paso y que significan una pérdida de terreno.
- Se puede alcanzar una eficiencia de riego entre 70% y 80%.
- Humedece toda la superficie del suelo.
- Los sistemas móviles o semifijos necesitan menor inversión y más mano de obra en la rotación de las posiciones de las líneas de riego (una deficiente instalación, puede dar una menor uniformidad y eficiencia del riego).
- Menor riesgo de erosión de suelos.
- Fácil operación, por lo que el aprendizaje es sencillo, el trabajo es ligero y permite que todos pueden realizarlo.
- En un contexto de cambio climático, en que la disponibilidad del agua será menor (menos lluvia en ciertos momentos, menos agua en las fuentes en las épocas de estiaje) y en que la demanda será mayor (mayor temperatura, mayor evapotranspiración), a los agricultores les convendrá aún más ahorrar el agua para riego y para eso, el riego por aspersión es una buena opción.

5.3.2.2. Inconvenientes del riego por aspersión

Los principales inconvenientes que se pueden presentar en el uso del riego por aspersión son (FONCODES, 2014):

- La presión tiene que ser adecuada, para el funcionamiento óptimo de los aspersores, y lograr una alta uniformidad de riego.
- No hay uniformidad del riego cuando hay fuertes vientos en el lugar.
- Se necesita una alta inversión inicial.
- Se pueden presentar problemas de sanidad en el follaje de los cultivos.
- Hay riesgo de caída de flores en frutales y pudrición de granos en cultivos sensibles.
- Idealmente requiere acceso a un reservorio, o por lo menos un turno de riego adecuado, para poder efectivamente aplicar el agua en pequeñas cantidades y más frecuentemente.

5.3.3. Riego localizado

En este sistema de riego el agua es conducida a baja presión mediante tuberías que llegan hacia los cultivos con el fin de realizar pequeñas aportaciones de agua, de manera continua y frecuente, en un lugar próximo a la planta, humedeciendo sólo parte del volumen del suelo. Pese a que existen diversos sistemas de riego localizado (cintas de exudación, riego subterráneo, etc.), el ejemplo más común es el conocido como riego por goteo (WWF España, 2009).



Figura 5.6. Riego localizado

Fuente: “Manual de Buenas Prácticas de Riego: Propuestas de WWF para un uso eficiente del agua en la agricultura” (WWF España, 2009).

Cabe mencionar que “en el riego por goteo el agua se distribuye por tuberías de polietileno a baja presión, en las que a intervalos regulares están colocados los emisores, denominados goteros, responsables de regular la salida del agua” (WWF España, 2009).

Existen diferentes goteros que se utilizan en este sistema de riego, como el tipo vortex, el helicoidal, de laberinto, el autocompensante, entre otros (Figura 5.7), y cada gotero se caracteriza por su caudal nominal (expresado en litros por hora) y su rango de presiones de trabajo, con excepción de los goteros autocompensantes, los cuales permiten tener cierta variabilidad en la que a cada presión de trabajo le corresponde un caudal. Es por ello que, para llevar a cabo una mejor planificación de los riegos y realizar un adecuado manejo de la instalación, es imprescindible conocer y respetar estos valores de trabajo (WWF España, 2009).



Figura 5.7. Tipos de goteros utilizados para riego

Fuente: “Manual de Buenas Prácticas de Riego: Propuestas de WWF para un uso eficiente del agua en la agricultura” (WWF España, 2009).

Desde el punto de vista hídrico, las principales ventajas del riego localizado son (WWF España, 2009):

- **Posibilitar el control total sobre el suministro de agua de riego a las plantas.** Esto representa una gran ventaja, pues permite provocar estrés o garantizar una humedad

óptima, de acuerdo a las necesidades que presente el cultivo en los diferentes momentos de su ciclo.

- **Ahorrar agua respecto a otros sistemas de riego.** Este posible ahorro deriva de la eliminación de pérdidas durante el transporte del agua (ya que ésta llega al cultivo mediante tuberías), así como de la reducción de la evaporación directa del suelo (al mojarse sólo una parte del terreno).
- **Incrementar la uniformidad y la eficiencia de riego.** Las instalaciones de riego por goteo bien diseñadas permiten lograr mayores uniformidades y eficiencias de riego, por lo que actualmente es considerado como el mejor método para regar tanto cultivos leñosos como cultivos hortícolas de alto valor comercial.

6. Riego eficiente en comunidades pequeñas

La gente que vive en las pequeñas comunidades depende especialmente del campo para obtener alimentos necesarios para autoconsumo, es por ello que es importante que durante las actividades de riego se puedan obtener los mayores rendimientos en los cultivos, esto es, la mayor cantidad de kilogramos de producto con la menor cantidad de agua posible, puesto que además de ser un recurso escaso, la agricultura es la actividad que mayor desperdicio de agua conlleva, y entre más eficiente sea el uso de esta, más agua podrá ahorrarse o destinarse a otras actividades.

6.1. Aspectos a considerar para realizar un riego eficiente

Existen una serie de factores que deben tomarse en cuenta para poder llevar a cabo un riego eficiente, entre las que destacan las características físicas del suelo, las necesidades de agua de los cultivos, así como la dosis y frecuencia de riego, mismas que se describen a detalle en los siguientes puntos.

6.1.1. Características físicas del suelo

Un factor fundamental para llevar a cabo un riego eficiente consiste en conocer las características físicas del suelo (humedad de saturación, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, agua útil, etc.), además de la velocidad de infiltración del agua en el terreno. Esta información se puede obtener mediante análisis en laboratorios y ejecución de calicatas (excavaciones de pequeña a media profundidad realizadas para facilitar el reconocimiento geotécnico), además de que pueden estimarse según la experiencia del agricultor (WWF España, 2009).

En seguida, se definirán algunas de las principales características físicas del suelo a tomar en cuenta para la ejecución de un riego eficiente (UNC):

- **Humedad de Saturación:** es el contenido de agua de un suelo en el que todos sus poros están llenos de agua, lo cual puede observarse inmediatamente después de una lluvia o riego abundante.

- **Capacidad de Campo (CC):** también conocido como límite máximo, es el contenido de agua presente en un suelo luego de drenar libremente durante los 2 o 3 días posteriores a una lluvia o riego intenso.
- **Punto de Marchitez Permanente (PMP):** también conocido como límite mínimo, es el contenido de agua de un suelo retenida tan firmemente que las plantas no pueden extraerla causándoles una marchitez irreversible.
- **Agua Útil (AU):** también conocida como agua disponible, es la diferencia entre los contenidos de agua a CC y PMP. Se considera como el agua utilizable o potencialmente extractable por las plantas en la zona de crecimiento radical y es la fracción del agua del suelo que puede perderse por evaporación o variar por el consumo de las plantas.

6.1.2. Necesidades de agua de los cultivos

A lo largo del tiempo, las difíciles interrogantes de cuándo, cómo y cuánto regar, se han resuelto con base en la experiencia adquirida por parte de los agricultores, sin embargo, teniendo en cuenta que el agua es un recurso cada vez más valioso y escaso con el que hay que procurar siempre la máxima eficiencia en su uso, no es válido que estas decisiones en torno a su empleo en el riego se tomen de manera intuitiva, más aún cuando existen metodologías ya comprobadas que han puesto fin a esta triple incógnita asociada al uso del agua de riego (WWF España, 2009).

6.1.2.1. Métodos indirectos: Evapotranspiración

La medición directa de la evapotranspiración (ET) de cada cultivo para cada día del año y en cada zona es una tarea sumamente compleja, por lo que estos valores se han relacionado empíricamente con mediciones más sencillas. Por ello, lo que comúnmente se hace es calcular mediante diversas fórmulas matemáticas la **Evapotranspiración de referencia (ET_o)**, la cual se define como “la pérdida de agua de un suelo cubierto por una pradera extensa de gramíneas en crecimiento activo, sombreando totalmente el suelo, segada a una altura de 8 a 15 cm y con un suministro de agua constante” (WWF España, 2009).

Tabla 6.1. ET_o promedio para diferentes regiones agroclimáticas en mm día⁻¹

Regiones	Temperatura promedio durante el día (°C)		
	Templada ~ 10°C	Moderada 20°C	Caliente > 30°C
Trópicos y subtrópicos			
- húmedos y subhúmedos	2 – 3	3 – 5	5 – 7
- áridos y semiáridos	2 – 4	4 – 6	6 – 8
Regiones templadas			
- húmedas y subhúmedas	1 – 2	2 – 4	4 – 7
- áridas y semiáridas	1 – 3	4 – 7	6 – 9

Fuente: “Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos” (FAO, 2006).

Posteriormente, se relaciona el valor real de la **evapotranspiración del cultivo (ET_c)** (que es el dato que realmente nos interesa) con la ET_o , haciendo uso de los llamados **coeficientes de cultivo (K_c)**, de tal forma que se cumple que $ET_c = K_c \times ET_o$. Los valores de K_c se obtienen experimentalmente y son distintos para cada cultivo (Figura 6.1), además de que varían a lo largo del ciclo de desarrollo de un mismo cultivo y por las diferentes condiciones climáticas y meteorológicas (Figura 6.2) que pueden presentarse (WWF España, 2009).

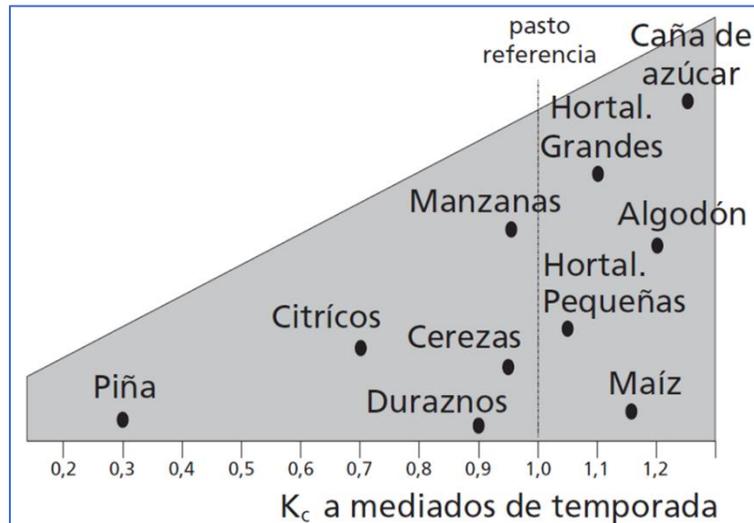


Figura 6.1. Valores típicos de K_c para diferentes cultivos completamente desarrollados

Fuente: "Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos" (FAO, 2006).

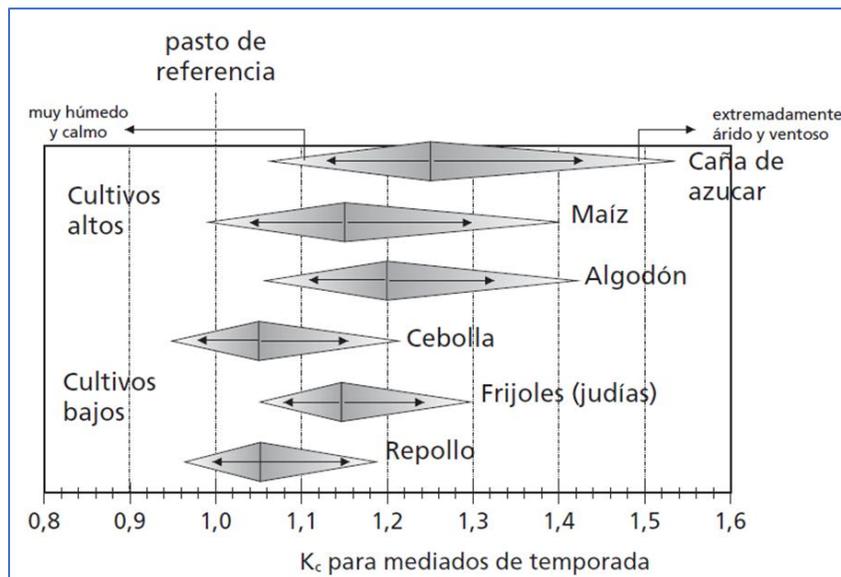


Figura 6.2. Rangos extremos de K_c para cultivos completamente desarrollados, en respuesta a variaciones climáticas y meteorológicas

Fuente: "Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos" (FAO, 2006).

Esta variación a lo largo del ciclo del cultivo se debe a que en la etapa inicial del ciclo ($K_{c\text{ ini}}$) la superficie foliar es pequeña, el suelo está directamente expuesto y predomina la evaporación; posteriormente, a medida que el desarrollo foliar va cubriendo el suelo, la evaporación se va reduciendo y se incrementa la transpiración, aumentando progresivamente el coeficiente de cultivo hasta llegar a un punto de equilibrio a mediados de temporada ($K_{c\text{ med}}$); finalmente, el cultivo entra en declive y llega a un valor correspondiente a su etapa final ($K_{c\text{ fin}}$). Estos valores, mostrados en la Figura 6.3, son los que describen el comportamiento de la curva del coeficiente de cultivo, como la que se aprecia en la Figura 6.4. Durante el período de crecimiento del cultivo, la variación de K_c expresa los cambios en la vegetación y en el grado de cobertura del suelo (FAO, 2006).

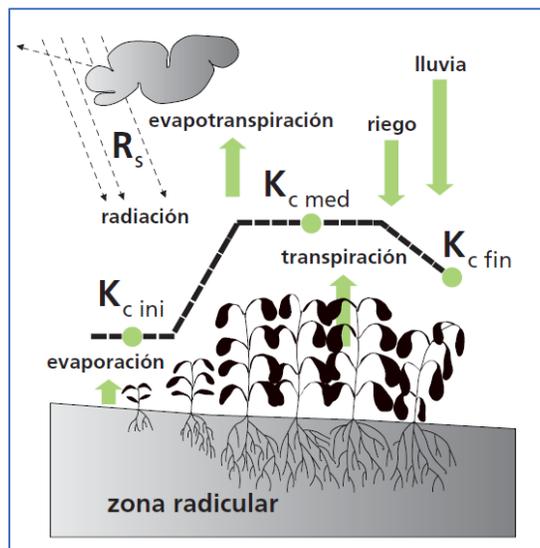


Figura 6.3. Valores del K_c que describen la curva del coeficiente del cultivo

Fuente: "Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos" (FAO, 2006).

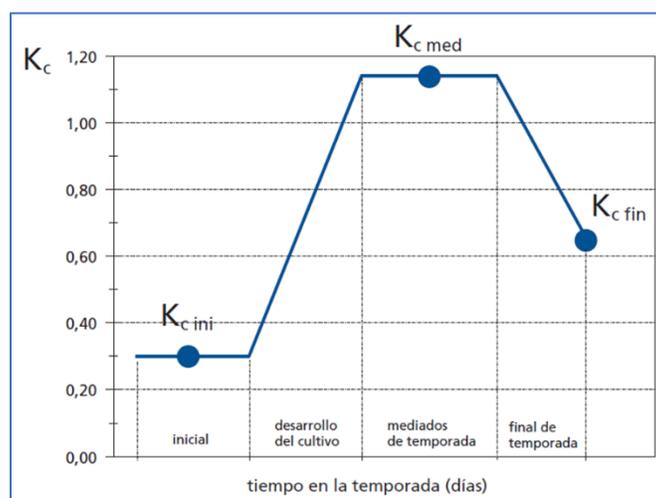


Figura 6.4. Curva del coeficiente del cultivo

Fuente: "Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos" (FAO, 2006).

También existe el concepto de **evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ($ET_{c\text{aj}}$)**, la cual se aplica para los cultivos que crecen bajo condiciones ambientales y de manejo diferentes a las condiciones estándar. Este valor surge como consecuencia de que, bajo condiciones de campo, la evapotranspiración real del cultivo puede desviarse de ET_c debido a condiciones no óptimas como son la presencia de plagas y enfermedades, salinidad del suelo, baja fertilidad del suelo y limitación o exceso de agua; pudiendo resultar en un reducido crecimiento de las plantas, menor densidad de plantas y así reducir la tasa de evapotranspiración por debajo de los valores de ET_c . La $ET_{c\text{aj}}$ se calcula utilizando un **coeficiente de estrés hídrico (K_s)** o ajustando K_c a todos los otros tipos de condiciones de estrés y limitaciones ambientales en la evapotranspiración del cultivo (FAO, 2006).

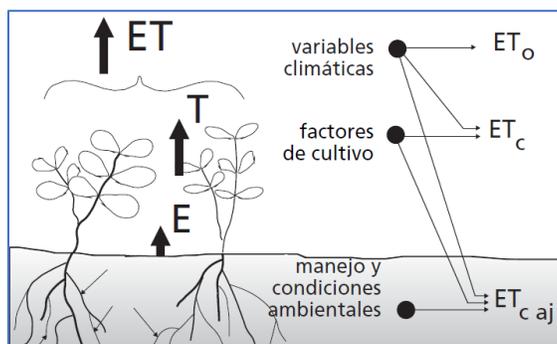


Figura 6.5. Factores que afectan la evapotranspiración con referencia a conceptos relacionados de ET
Fuente: “Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos” (FAO, 2006).

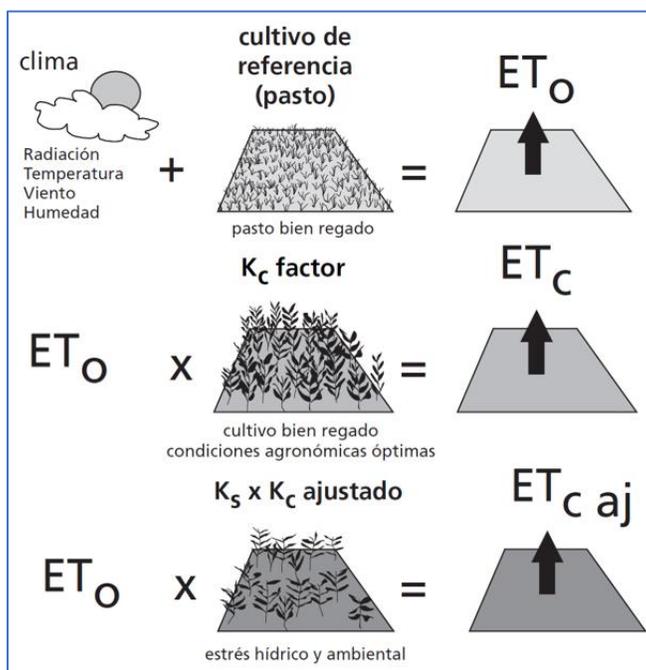


Figura 6.6. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0), bajo condiciones estándar (ET_c) y bajo condiciones no estándar ($ET_{c\text{aj}}$)
Fuente: “Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos” (FAO, 2006).

La evapotranspiración del cultivo (ET_c) representa el agua que demanda el cultivo, pero esto no siempre es sinónimo de necesidades de riego. Para determinar el agua que ha de aplicarse mediante el riego es necesario realizar un pequeño balance, descontando lo que puedan aportar las precipitaciones, y en algunos casos cuantificando la variación en la reserva del suelo. (WWF España, 2009)

6.1.2.2. Métodos directos: Sensores de humedad

Con el transcurrir de la última década, se han logrado desarrollar una amplia variedad de sensores que permiten medir la humedad en el suelo de forma continua y directa (Figura 6.7), los cuales se pueden instalar en un cierto cultivo para determinar sus necesidades de agua (Figura 6.8); además, la instalación de uno de estos sensores en una parcela en particular puede servir como referencia objetiva para llevar a cabo una óptima planificación del riego (WWF España, 2009).



Figura 6.7. Distintos tipos de sensores de humedad en suelo

Fuente: “Manual de Buenas Prácticas de Riego: Propuestas de WWF para un uso eficiente del agua en la agricultura” (WWF España, 2009).



Figura 6.8. Sensores de humedad instalados en cultivo de fresa

Fuente: “Manual de Buenas Prácticas de Riego: Propuestas de WWF para un uso eficiente del agua en la agricultura” (WWF España, 2009).

6.1.3. Dosis y frecuencia de riego

Una vez conocidas las necesidades de agua del cultivo en un determinado periodo de tiempo, es decir, sabiendo cuánto y cuándo regar, es importante resolver el cómo realizar esta aportación de agua hacia los cultivos mediante uno o varios riegos, esto es, la dosis y frecuencia de riego. Para determinar éstas, se deben observar algunas condiciones como (WWF España, 2009):

- La **capacidad máxima del suelo para almacenar agua**, pues si se suministra toda el agua de una vez, parte de ésta puede percolar a las capas profundas o perderse por escorrentía, escapando así del alcance del cultivo.
- El **nivel de humedad mínimo del suelo**, ya que por debajo de este nivel el cultivo empieza a sufrir estrés.
- La **capacidad del sistema de riego y su eficiencia**, porque conocer el comportamiento del sistema y su eficiencia permite establecer las dosis e intervalos de riego más propicias para dicho sistema.
- Procurar dar **riegos frecuentes**, para contar con un nivel estable de agua en el suelo, fácilmente utilizable por el cultivo.

Adicionalmente, una vez establecidas la fecha y duración de los riegos, es importante procurar realizarlos cuando el costo energético sea menor y existan condiciones ambientales lo más favorables posible, teniendo en cuenta (WWF España, 2009):

- De ser posible, regar en horas de descuento de la tarifa eléctrica.
- Para el caso del riego por aspersión, puesto que la eficiencia de aplicación y la uniformidad se reducen si se riega con fuertes vientos y alta insolación, procurar disminuir el caudal del aspersor y aumentar el tiempo de riego en zonas con vientos frecuentes, e intentar no regar durante las horas centrales del día en zonas con alta insolación
- Cuando se presenten lluvias superiores a 4-5 mm, éstas deberán descontarse de los riegos pendientes.
- Para evitar pérdidas por escorrentía, el aporte instantáneo de agua no debe superar la capacidad de infiltración del suelo.

7. Caso de estudio: Finca Can Valldaura

7.1. Bases conceptuales

A continuación, se presentan algunos aspectos básicos sobre la permacultura, los cuales permiten evaluar el caso de estudio en cuanto a un diseño y rendimiento del sistema adecuados.

7.1.1. La permacultura como técnica de agricultura moderna

La permacultura contribuye a solventar diversos problemas ocasionados por los métodos empleados en la agricultura convencional, esto a través de las siguientes aportaciones (Acosta, 2015):

- Gestiona los recursos de manera sostenible, con el fin de crear una economía sostenible.
- Valora y fomenta la biodiversidad, mediante la aceleración de sucesiones vegetales.
- Sus prácticas van orientadas a la "autofertilidad de la tierra".
- Favorece una mayor soberanía alimentaria.
- Apuesta por la protección del patrimonio histórico y cultural.
- Fomenta la educación ambiental y favorece un mayor bienestar social.
- Contribuye a aumentar la resiliencia de la sociedad.

En palabras de Segura Chumillas (2012), “la permacultura restaura la fertilidad del suelo, y su gestión de los recursos naturales de forma sostenible, permite la conservación de los sistemas agroecológicos de forma permanente y la obtención de una mayor productividad, mediante algunas técnicas agrícolas, como el uso de abonos verdes y el reciclaje de materia orgánica. Estas permiten al terreno, por un lado, mantener la humedad más tiempo, pudiendo así espaciar más los riegos, proporcionando un ahorro económico por la disminución del consumo de agua, y por otro lado, ayuda al control de las hierbas adventicias, cubriéndolas e impidiendo que el sol penetre, disminuyendo su desarrollo” (Citado en Acosta, 2015).

Enseguida, en la Tabla 7.1 se muestran las diferencias que distinguen los objetivos de la permacultura con respecto a los de la agricultura convencional.

Tabla 7.1. Diferenciación entre los principales objetivos de la permacultura y los de la agricultura convencional

Objetivos de la permacultura	Objetivos de la agricultura convencional
Organización	
Orientación ecológica y uso eficaz de la mano de obra en el campo.	Orientación económica, mecanización, reducción de la mano de obra.
Mayor autosuficiencia posible en abono y alimento para el ganado.	La autosuficiencia no es un objetivo. Se importan abonos químicos y alimentos para los animales.
Mayor resiliencia debido a la biodiversidad.	Planes de cultivos dictados por la demanda del mercado.
Influencia en los procesos vitales	
La producción está integrada, se construyen paisajes sanos, en equilibrio, atendiendo a los ritmos naturales.	Separación de las actividades en el medio natural, manipulación química y técnica.
Estimulación y autorregulación de los procesos vitales, como el uso de abono verde, y compostaje.	Se emplean herbicidas, hormonas, antibióticos, etc.

Objetivos de la permacultura	Objetivos de la agricultura convencional
Condiciones equilibradas para las plantas y animales, con pocas deficiencias que corregir.	Excesivo abono y alimentación, corrección de deficiencias.
Implicaciones sociales y ambientales	
Cierre de los ciclos de materiales y energía.	Mala relación entradas/salidas, respecto a los materiales y energía, procedente en su mayoría del exterior.
Máxima conservación de la fertilidad de la tierra, de la calidad del agua y de la biodiversidad.	Agotamiento de la fertilidad de la tierra, a menudo contaminación de las aguas y pérdida de biodiversidad.
No hay contaminación.	Contaminación a nivel mundial considerable.
Producción mixta, relaciones más transparentes entre consumidor y productor, buena calidad nutritiva.	Producción especializada, relación anónima entre consumidor y productor.

Fuente: “Permacultura y sostenibilidad agrícola: Una nueva forma de cultivar suelo, salud y alimentos” (Acosta, 2015).

7.1.2. Guía de análisis medioambiental en permacultura

Para llevar a cabo un adecuado diseño de una finca de permacultura es importante analizar diversos aspectos del paisaje y tomar en cuenta algunas características del lugar, tal como se muestra en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2. Guía de análisis medioambiental en permacultura

Aspecto	Descripción
1. Historia	Contexto histórico de la zona: tipo de agricultura que se practicaba, y técnicas que se utilizaban. Si se emplean actualmente pesticidas en otras fincas, si hay disponibilidad de pastos, calificación de las tierras colindantes, si se practica agricultura convencional, ecológica, etc. Si hay actividades tradicionales o artesanales en riesgo de desaparecer, si existen mercados locales y eventos culturales.
2. Planificación urbanística	Consultar la planificación urbanística, y conocer las limitaciones legales y usos del suelo.
3. Topografía	Mapa curvas de nivel. Identificar puntos clave, observar lomas y la presencia de cuencas hidrográficas, calcular pendiente.
4. Orientación y exposición	Para tener una mayor percepción de las zonas más frescas o zonas más calurosas, en función de la orientación y exposición, así como la dirección dominante de los vientos, los vientos favorables y los vientos dañinos.
5. Geología y suelo	Consultar mapa geológico, y estudios agrícolas sobre la zona. Tipos de suelos, análisis del pH, capacidad de drenaje y absorción, estabilidad del sustrato.
6. Flora y fauna	Conocimiento de las especies animales y vegetales autóctonas e introducidas.

Aspecto	Descripción
7. Clima	Altitud sobre el nivel del mar, la frecuencia, intensidad y época de granizo, tormentas, u otros fenómenos atmosféricos. Conocer la pluviometría media anual, las temperaturas máximas mínimas y medias mensuales.
8. Hidrología	Patrones de drenaje, presencia de manantiales, riachuelos, zonas de captación, riesgos y niveles de inundación, aguas superficiales, calidad del agua de riego, etc.
9. Accesibilidad	Caminos existentes, o caminos que se requieren construir, analizar coste y tamaño.
10. Servicios	Electricidad, gas, teléfono. Escuelas, comercios, transporte público, centros sanitarios, bomberos, posibilidades de reciclar los residuos. Servicios preexistentes como infraestructuras, bancales de cultivo, depósitos de agua, etc.
11. Recursos cercanos	Materiales para acolchado, estiércol, serrín, madera, etc.
12. Problemas medioambientales, riesgos y catástrofes	Ruidos, contaminación, riesgo de incendios, historia de catástrofes, etc.

Fuente: “Permacultura y sostenibilidad agrícola: Una nueva forma de cultivar suelo, salud y alimentos” (Acosta, 2015).

7.2. Información del sitio de estudio

7.2.1. Localización

La Finca Can Valldaura se encuentra situada totalmente en el término municipal de Cerdanyola del Vallés (Figura 7.1), en su límite sur confluye con los municipios de Barcelona y Sant Cugat del Vallés. Se emplaza en la Carretera BV-1415 en el km 7.8 dentro del Parque de Collserola. La superficie total de las dos fincas que forman parte del ámbito de Can Valldaura según los datos catastrales es de 131.105 ha, se encuentra limitada al este con la Sierra de en Fotja y al oeste con la Sierra Medir, y además es dividida en dos mitades por la Sierra de en Gatell en la dirección sur-norte.

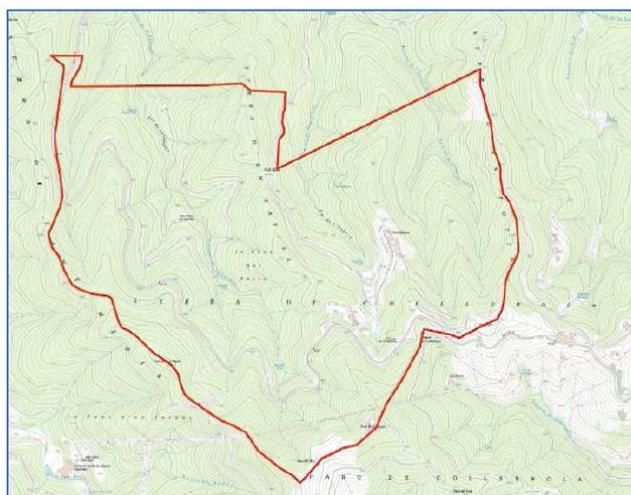


Figura 7.1. Localización de la Finca Can Valldaura sobre mapa topográfico

Fuente: “La Permacultura en la gestión del agua: El caso de Can Valldaura” (Nieto, 2012)

El acceso a la finca se realiza desde la carretera de Cerdanyola a Horta (barrio de Barcelona), por un camino particular que baja sinuoso y con pendiente, con muros de contención de las terrazas, de pizarra y con hileras de ladrillos de cerámica (Figura 7.2). El paisaje del lugar posee un alto valor natural y cultural debido a las diferentes actividades agrícolas y de gestión forestal realizadas a lo largo de los años alrededor de la masía (tipo de construcción rural muy frecuente en Cataluña, son aisladas y ligadas siempre a una explotación agrícola y ganadera de tipo familiar) (Nieto, 2012).



Figura 7.2. Finca Can Valldaura

Fuente: <https://ca.wikiloc.com/rutes-senderisme/collserola-fuentes-06-6156900/photo-3376801>

7.2.2. Breve historia

La Finca Can Valldaura es un espacio agro-forestal que tiene como principal singularidad la abundancia de registro material (muros de contención, conducciones de agua, etc.) que posee, tratándose de un auténtico paisaje construido. Debe su nombre al antiguo “Mas Valldaura o Valldaura Vell”, un monasterio del S.XII que más tarde se convertiría en un palacio real cuyas ruinas se encuentran cerca de la actual masía (Nieto, 2012).

Después de ser abandonada durante varios periodos de tiempo, a finales del siglo XIX la finca tuvo una etapa de actividad destacada bajo el mando de Fransesc Guardiola quien amplió dos veces la casa y dotó a la finca de un sistema de riego y un sistema de muros de contención, con tal de crear terrazas (Figura 7.3) que pudieran utilizarse para fines agrícolas.



Figura 7.3. Sistema de muros y terrazas creadas por Fransesc Guardiola en 1905

Fuente: “La Permacultura en la gestión del agua: El caso de Can Valldaura” (Nieto, 2012)

7.2.3. Hidrografía

El curso fluvial principal en esta zona es la corriente de Valldaura y sus afluentes, el cual proviene de las sierras paralelas al flujo Serra de Sant Medir y Serra d'en Gatell, y que se nutre de tres fuentes naturales: la Font del Jeroni, la del Ferro y la del Pla de Cigró.

Otro curso de agua importante es la corriente del Infern Giau en el extremo oriente y sus principales afluentes, la corriente del Infern Pellt y la de Can Güell, con dos fuentes de interés: la Font d'en Gatell y la de Can Valldaura (Nieto, 2012).

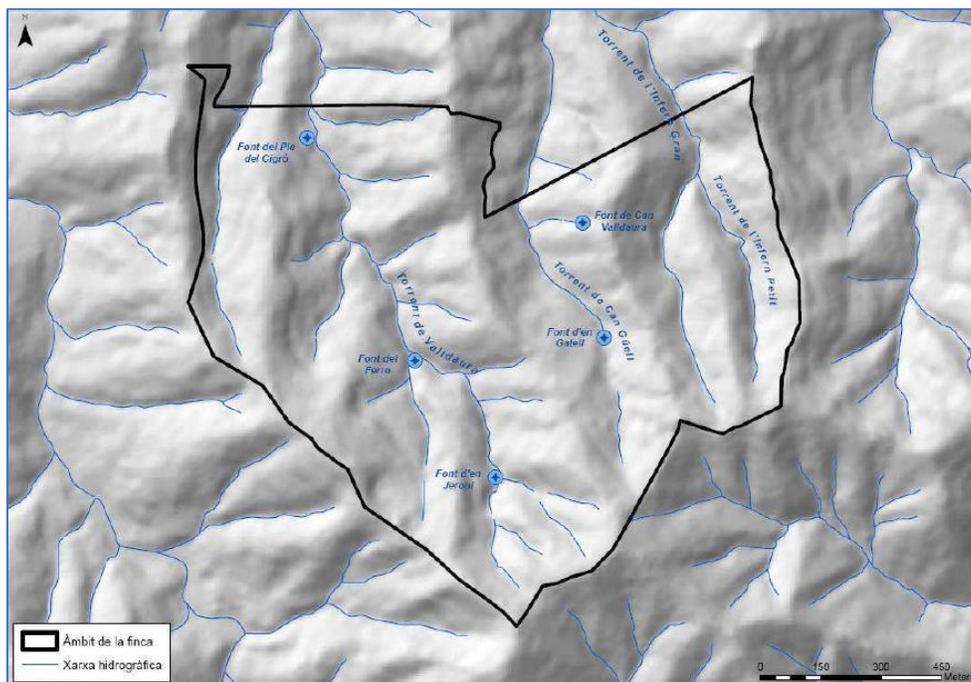


Figura 7.4. Red fluvial de la Finca Can Valldaura

Fuente: "La Permacultura en la gestión del agua: El caso de Can Valldaura" (Nieto, 2012)

7.2.4. Clima

El clima de Collserola es mediterráneo y se caracteriza por sus inviernos templados y sus veranos secos y calurosos. Gracias a los datos del Observatorio Fabra (Figura 7.5), para el período 2007-2011 se encontró una precipitación media de 657.64 ± 154.24 L/m², concentrada en las estaciones intermedias (primavera y otoño), con temperaturas muy calurosas en verano y relativamente suaves en invierno, con un periodo más o menos largo de heladas en esta estación (14.4°C de temperatura media anual).

Debido a las diferencias de orientación, altitud, exposición a los vientos, cobertura boscosa y otros factores de la finca, algunos valores obtenidos del Observatorio Fabra diferirán de los reales de la finca, sin embargo, estos datos son más confiables que los que proporciona la estación meteorológica instalada en la finca (Nieto, 2012).

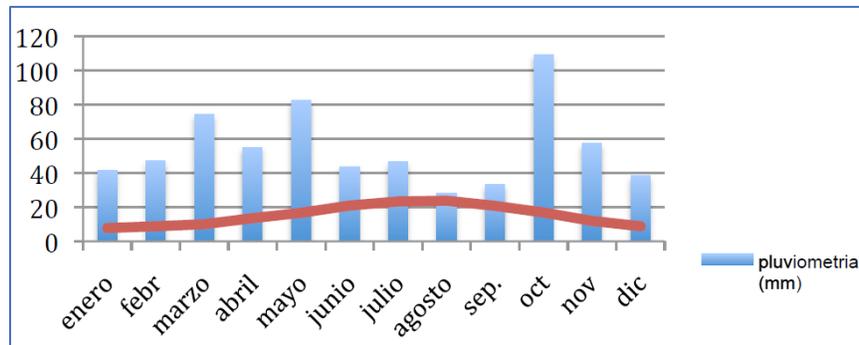


Figura 7.5. Relación entre temperatura y pluviosidad media en el Observatorio Fabra en el período 2007-2011

Fuente: "La Permacultura en la gestión del agua: El caso de Can Valldaura" (Nieto, 2012)

7.2.5. Suelo

Las fuertes pendientes en la finca son un factor limitante. Encontramos que tienen un valor promedio de 43%, destacando que en un 94.1% de la finca hay una pendiente mayor al 20%. La altura máxima del entorno se encuentra definida por el Turó del Maltall de Magarola (fuera de la finca) y por el Turó de Valldaura (dentro de la finca) que registran alturas de entre 420 y 430 m por encima del nivel del mar, mientras que la altura mínima se encuentra en la parte septentrional, en el valle de la corriente de Valldaura, con 179 m sobre el nivel del mar.

En cuanto a la composición geológica del terreno, el material dominante son las pizarras microcíticas y arenosas que corresponden a un período entre el cambroordoviciano y el ordovício. La zona más elevada se ha visto afectada por metamorfismo de contacto en el carbonífero, formando filitas y cornubianitas, mientras que los suelos situados en las terrazas se caracterizan por su componente antrópico; materiales donde se mezclan pizarras muy fragmentadas con limos y arcillas.

El suelo es principalmente xérico (bajo de humedad), caracterizado por un déficit de agua que coincide con el verano. Las lluvias que se producen en otoño, permanecen en el suelo a lo largo del invierno. Pero en lo relativo a las lluvias de primavera, el agua se agota pronto debido a la elevada evapotranspiración. Las lluvias veraniegas son poco frecuentes y, aunque a veces proporcionan una caída abundante de agua, resultan ser muy poco eficientes debido a la alta tasa de escorrentía superficial (Nieto, 2012).

Con lo que respecta a los usos del suelo, casi la totalidad de la finca (94.2%) son masas forestales (bosques densos y claros) y matorrales (en la parte sur de la finca). El resto lo forman la zona urbanizada (4.6%), los prados y otros que no llegan ni a representar el 1% de la superficie total de la finca (Nieto, 2012).

7.2.6. Flora y fauna

En la finca se encuentran los siguientes hábitats:

- Encinar y carrascas: 46.68 ha que representan el 35.3% de la superficie total de la finca.
- Pinares mediterráneos: 80.94 ha que representan el 61.2% de la superficie total de la finca.

Además, se han identificado siete unidades diferentes de paisaje vegetal o flora:

1. Maquia
2. Pinar sin sotobosque (menos de 5% de la finca)
3. Pinar sobre maquia (18.4% de la finca).
4. Pinar con encinar incipiente (18,22% de la finca)
5. Bosque mixto
6. Encinar con robles (localizados en los fondos de valles con menor insolación, y por tanto, con menor acción humana y mayor disponibilidad de agua)
7. Fragmentos de Avellanos con *Polystichum setiferum* (helecho nativo del sur y el oeste de Europa)

Finalmente, se mencionan las especies animales (fauna) con probabilidad de presencia en la finca:

- Rusco (identificado en la zona de avellanos en la corriente de Valldaura)
- Murciélago Común (presente en Can Valldaura)
- Murciélago Grande de Herradura (se pretende recuperar mediante las nuevas actividades agrícolas y ganaderas)
- Mochuelo Común (ausente, también se pretende recuperar)
- Verdugo Común (presente en la zona de Maquia)

7.3. Descripción del Proyecto QValldaura

En la Finca Can Valldaura el Instituto de Arquitectura Avanzada de Cataluña (IAAC) busca colaborar con la protección y valorización del espacio natural de Collserola con el desarrollo de su programa científico y académico a través del Proyecto *QValldaura*, mediante el cual se pretende investigar sobre la producción y la gestión de hábitats autosuficientes (que producen energía, alimentos y bienes) especialmente en entornos urbanos, periurbanos, rurales y naturales. Este proyecto, enmarcado en la autosuficiencia, quiere conseguir a través de un buen diseño y una buena gestión del entorno, satisfacer las necesidades de las personas sin mermar el ambiente, tal y como lo postula la ética de la permacultura; de esta manera, se debe abastecer de comida, materiales y energía a los habitantes de una manera sostenible. Por tanto, el IAAC a través de la investigación y la educación pretende revalorizar el espacio de la Finca de Can Valldaura (Nieto, 2012).

7.3.1. Tres laboratorios y cuatro programas

El IAAC en Can Valldaura acoge diversos proyectos de investigación en los que participan universitarios y arquitectos provenientes de todo el mundo, y está conectado globalmente con laboratorios y centros de conocimiento.

El laboratorio más emblemático es el **Green FabLab**, conectado a la red de *FabLabs* de todo el mundo en colaboración con el Massachusetts Institute of Technology (MIT), que se suma al **EnergyLab**, centrado en producir, almacenar y compartir energía y agua entre varios edificios para fomentar la autosuficiencia energética e hídrica; así como al **FoodLab**, que busca producir los alimentos de las personas que trabajan, investigan y habitan en Valldaura siguiendo un riguroso

proceso de trazabilidad de la producción alimentaria basada en los cultivos biológicos. También investigan la producción de miel (apicultura) y la acuaponía, que es un sistema de producción sostenible de plantas y peces que combina la acuicultura tradicional (cría de animales acuáticos) con la hidroponía (cultivo de plantas donde se usan disoluciones minerales en vez de suelo agrícola), esto a través de tecnologías avanzadas. Además, se planea recuperar zonas de cultivo para fomentar la biodiversidad y ayudar al combate de incendios (Comunicae.es, 2016).

Por otra parte, dentro del ámbito educativo, está previsto que el nuevo máster que pondrá en marcha el IAAC siguiendo la filosofía del 'aprender haciendo' se imparta en Can Valldaura. Además, de manera conjunta con los estos tres laboratorios antes mencionados, en Can Valldaura se han admitido y desarrollado cuatro programas:

- **Programa Social.** Está destinado a crear una comunidad de personas que defienda la idea de la autosuficiencia basada en la producción local de recursos y el uso de la tecnología.
- **Programa Forestal.** Pretende lograr una gestión sostenible del bosque.
- **Programa Patrimonial.** Busca conservar y rehabilitar el extenso patrimonio de Valldaura, desde el poblado ibérico de Can Oliver, hasta los restos del antiguo Monasterio y Palacio Real aún por excavar.
- **Programa Ambiental.** Se propone gestionar todo Valldaura como un proyecto holístico, buscando la interacción entre los diversos laboratorios y programas que lo integran.

7.3.2. El agua en QValldaura: Proyecto HydroGrid

Con relación al proyecto de infraestructuras del agua para lograr la autosuficiencia en la masía de Valldaura se quiere implementar el proyecto de *HydroGrid*¹, el cual busca impulsar el desarrollo de un nuevo concepto de gestión del agua, considerando soluciones a nivel unitario que puedan aplicarse en conjunto como herramienta a gran escala, esto a través de la combinación de cuatro conceptos (Nieto, 2012):

1. Gestionar el agua con base en una diversificación de las fuentes, partiendo del hecho de que no todas las aplicaciones del agua requieren la misma calidad.
2. Reciclar y reutilizar las aguas.
3. Tratar el agua y reutilizarla in situ, en vez de juntar todos los caudales de las diferentes aguas y conducirlos de forma unitaria a unas instalaciones de agua centralizadas.

¹ El proyecto lo desarrollará un equipo multidisciplinar de ingenieros, biólogos, informáticos, arquitectos y diseñadores del IAAC, la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC) y del Massachusetts Institute of Technology (MIT), conjuntamente con empresas vinculadas a estas instituciones (Nieto, 2012).

- Dotar de “inteligencia” a cada uno de los elementos del sistema del ciclo del agua (tanques, grifos, inodoros, etc.) a partir de una red de microordenadores instalados en los mismos, de tal manera que se pueda desarrollar una gestión activa del consumo, de la capacidad de recolección y reciclaje, y de la demanda de cada edificio de forma detallada, aumentando de esta manera la sensibilización en el uso del agua en los diferentes entornos.

Mediante la aplicación de estos conceptos se pretende dar un mejor manejo a las aguas de diferentes calidades que conforman el ciclo de usos del agua en la masía de Valldaura (Figura 7.6), esto es: el agua potable (extraída de pozo), agua pluvial limpia (colectada de las cubiertas de las casas), agua pluvial sucia (colectada de los patios y terrazas), aguas grises (provenientes de la ducha y grifo del baño) y por último aguas negras (provenientes del inodoro y la cocina); éstas últimas cabe destacar que se tratan con un sistema de humedales superficiales que funcionan como sistemas pasivos de depuración, mediante un primer filtro vertical de gravas y vegetación macrófita y un segundo filtro verde de funcionamiento horizontal.

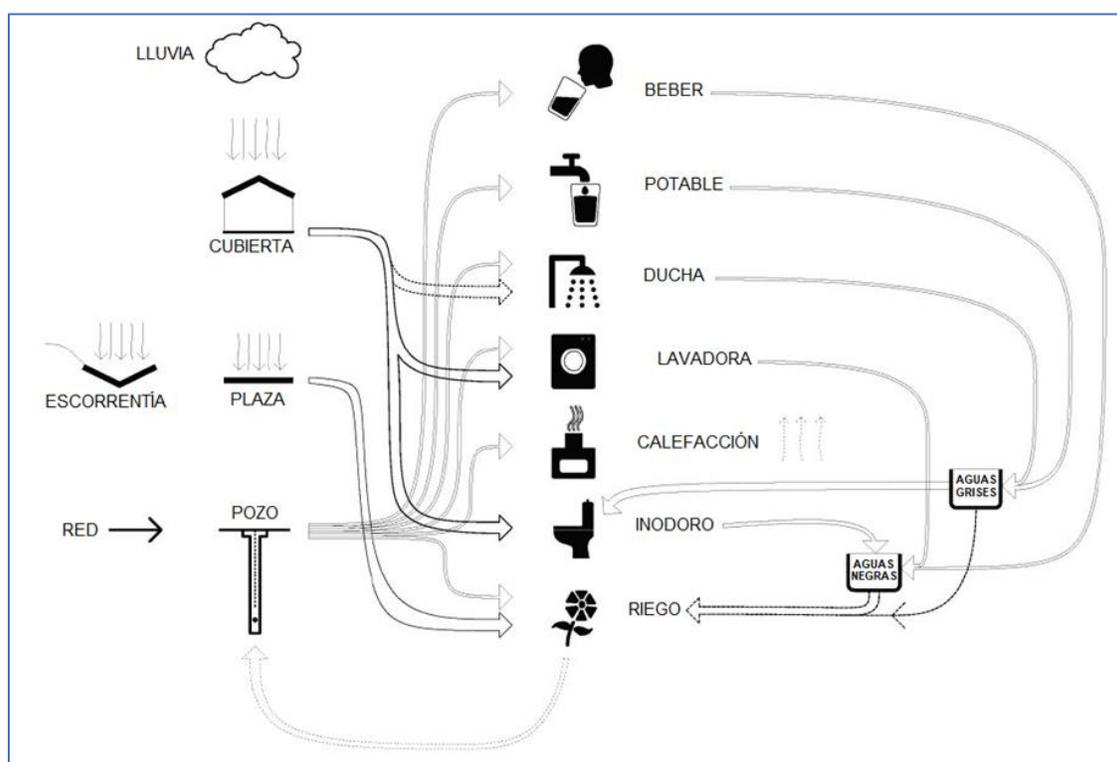


Figura 7.6. Diagrama del ciclo de usos del agua en la masía de Valldaura

Fuente: Adaptado de “La Permacultura en la gestión del agua: El caso de Can Valldaura” (Nieto, 2012)

7.3.3. Proyecto Silvoagroforestal en QValldaura

El Proyecto *QValldaura* cuenta con un plan de gestión silvoagroforestal, realizado por Andreu Vila, en el cual se detallan 5 zonas básicas de producción y gestión de la finca, situadas todas ellas en la zona de “Rompuda 1” (el nombre en catalán se refiere a la zona de donde se realiza la “roturación” o labrado de la superficie del terreno a una profundidad no mayor a 30 cm) que se muestra resaltada en la parte derecha de la Figura 7.7 (Nieto, 2012):

- **Zona hortícola:** zona con plantas aromáticas y culinarias; calculando un servicio de 250 a 300 comensales semanales, se identifica la zona más próxima a la casa planteando unas terrazas a contrapendiente con orientación sur-norte con una superficie estimada de unas 0.9 ha, siguiendo las líneas de las terrazas existentes.
- **Zona de frutales:** zona que presenta variedades tradicionales de fruta dulce, se encuentra en la sección noroeste en la parte alta de la finca, con una superficie aproximada de 4.2 ha.
- **Zona mediterránea:** zona con viñedo, olivos, almendros e higueras, se encuentra en la cara nordeste (zona más seca de la finca y con el bosque más pobre), la cual se encuentra bien iluminada y tiene una superficie aproximada de 2 ha; en ella se pretende plantar los olivos y viñedos en líneas de plantación, y los almendros e higueras en sitios puntuales.
- **Granja:** zona de pastura semi-extensiva para caballos en la parte oeste (detrás de la casa) y una zona para las gallinas que en total suman 1.5 ha. Se pretende tener 15 caballos y unas 100 gallinas aproximadamente (suficientes para producir la cantidad de huevos requerida para satisfacer las necesidades alimenticias de los 300 comensales semanales estimados).
- **Zona de silvipastura:** zona de gestión del sotobosque gracias a la pastura de cabras y ovejas, lo cual se realizará en toda la finca que no tenga ningún uso para otra actividad, que se estima que son unas 100 ha de bosque. Se ha dimensionado el rebaño en unas 20 cabras y 10 ovejas (considerando una capacidad forrajera de 0.3 UBM/ha). Quedaría pendiente determinar un espacio para la zona de recogimiento de unos 60 m² de cubierto (2 m² por cabeza) y unos 90 m² de patio (3 m² por cabeza).

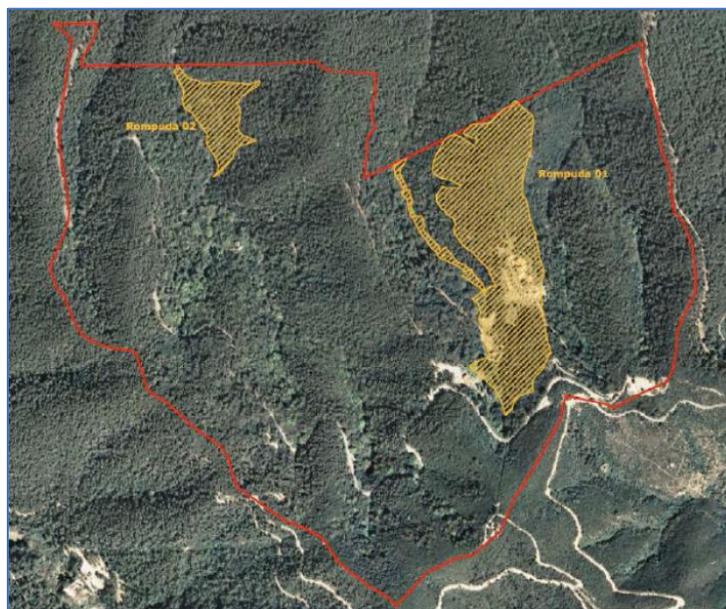


Figura 7.7. Localización de las dos zonas agrícolas aprobadas en Valldaura
Fuente: “La Permacultura en la gestión del agua: El caso de Can Valldaura” (Nieto, 2012)

7.4. Evaluación del caso de estudio

De acuerdo con la guía de análisis medioambiental en permacultura, mostrada en la Tabla 7.2, se presenta a continuación un análisis similar aplicado al caso de estudio expuesto en los temas 7.2 y 7.3, que ha sido documentado en el trabajo de Claudia Nieto (2012) titulado “La Permacultura en la gestión del agua: El caso de Can Valldaura”.

Tabla 7.3. Análisis medioambiental en permacultura de la Finca Can Valldaura

Aspecto	Descripción
1. Historia	<p>La Finca Can Valldaura, con más de 100 ha, se localiza dentro del Parque de Collserola, en Cerdanyola del Vallés un municipio de la comarca del Vallés Occidental, en la provincia de Barcelona, comunidad autónoma de Cataluña, España.</p> <p>Es un espacio agro-forestal con un registro material abundante (muros de contención, conducciones de agua, etc.), lo cual la convierte en un auténtico paisaje construido. Aunque ha sido abandonada durante varios periodos de tiempo, a finales del siglo XIX la finca tuvo una etapa de actividad destacada bajo el mando de Fransesc Guardiola, quien amplió la casa en dos ocasiones y dotó a la finca de un sistema de riego y un sistema de muros de contención que sirvieron para crear terrazas con fines agrícolas.</p> <p>Desde entonces se convirtió en una zona donde se practicaba la agricultura convencional, con métodos tradicionales de riego, conduciendo el agua mediante acueductos.</p> <p>El paisaje del lugar posee un alto valor natural y cultural debido a las diferentes actividades agrícolas y de gestión forestal realizadas a lo largo de los años.</p>
2. Planificación urbanística	<p>Los usos de suelo en la finca presentan la siguiente distribución:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Masas forestales (bosques densos y claros) y matorrales (94.2%) • Zona urbanizada (4.6%) • Prados y otros (menos del 1%)
3. Topografía	<ul style="list-style-type: none"> • Pendiente promedio en la finca: 43% (se presentan pendientes mayores a 20% en el 94.1% de la finca). • Altitud mínima en la finca: 179 m.s.n.m. • Altitud máxima en la finca: 420 - 430 m.s.n.m.
4. Orientación y exposición	<ul style="list-style-type: none"> • Zona urbanizada. Lugar donde se encuentra la casa y próxima a ella la zona hortícola conformada por unas terrazas para fines agrícolas, a contrapendiente con orientación sur-norte. • Zona noreste. Es la zona más seca de la finca y con el bosque más pobre, bien iluminada. Ideal para la zona mediterránea con viñedo, olivos, almendros e higueras.

Aspecto	Descripción
	<ul style="list-style-type: none"> • Zona noroeste. Se localiza la zona óptima para los frutales, en la parte alta de la finca. • Zona oeste. Se encuentra la zona de pastura semi-extensiva para los caballos y la zona de gallinas. • Resto de la finca. Se presentan condiciones ideales para la pastura de cabras y ovejas.
5. Geología y suelo	<p>Composición geológica del terreno:</p> <ul style="list-style-type: none"> • El material dominante son las pizarras microcíticas y arenosas que corresponden a un período entre el cambroordoviciano y el ordovicio. • La zona más elevada se ha visto afectada por metamorfismo de contacto en el carbonífero, formando filitas y cornubianitas. • Los suelos situados en las terrazas se caracterizan por su componente antrópico; materiales donde se mezclan pizarras muy fragmentadas con limos y arcillas. <p>Tipo de suelo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • El suelo es principalmente xérico (bajo de humedad), caracterizado por un déficit de agua que coincide con el verano. <p>Escurecimiento e infiltración en el terreno:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Las lluvias que se producen en otoño, permanecen en el suelo a lo largo del invierno. • El agua de las lluvias de primavera se agota pronto debido a la elevada evapotranspiración. • Las lluvias veraniegas son poco frecuentes y, aunque a veces proporcionan una caída abundante de agua, resultan ser muy poco eficientes debido a la alta tasa de escorrentía superficial.
6. Flora y fauna	<p>Hábitats presentes en la finca:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Encinar y carrascas (46.68 ha = 35.3% de la finca) • Pinares mediterráneos (80.94 ha = 61.2% de la finca) <p>Flora en la finca:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Maquia • Pinar sin sotobosque (menos de 5% de la finca) • Pinar sobre maquia (18.4% de la finca). • Pinar con encinar incipiente (18,22% de la finca)

Aspecto	Descripción
	<ul style="list-style-type: none"> • Bosque mixto • Encinar con robles (localizados en los fondos de valles con menor insolación, y por tanto, con menor acción humana y mayor disponibilidad de agua) • Fragmentos de Avellanos con <i>Polystichum setiferum</i> (helecho nativo del sur y el oeste de Europa) <p>Fauna en la finca:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Murciélago Común (presente en Can Valldaura) • Murciélago Grande de Herradura (se pretende recuperar mediante las nuevas actividades agrícolas y ganaderas) • Mochuelo Común (ausente, también se pretende recuperar) • Verdugo Común (presente en la zona de Maquia)
7. Clima	<ul style="list-style-type: none"> • Clima mediterráneo, caracterizado por inviernos templados y veranos secos y calurosos. • Temperatura media anual de 14.4°C • Precipitación media de 657.64 ± 154.24 L/m² <p>La precipitación se concentra en las estaciones intermedias (primavera y otoño), con temperaturas muy calurosas en verano y relativamente suaves en invierno, con un periodo más o menos largo de heladas en esta estación.</p>
8. Hidrología	<p>Disponibilidad de aguas superficiales de tipo fluvial con calidad óptima para el riego (baja presencia de sales):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Corriente de Valldaura y sus afluentes <ul style="list-style-type: none"> ○ Se nutren de tres fuentes naturales: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Font del Jeroni ▪ Font del Ferro ▪ Font del Pla de Cigró • Corriente del Infern Giau, y sus afluentes Infern Pellt y Can Güell <ul style="list-style-type: none"> ○ Se nutren de dos fuentes: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Font d'en Gatell ▪ Font de Can Valldaura
9. Accesibilidad	<p>La finca se emplaza en la Carretera BV-1415 en el km 7.8 dentro del Parque de Collserola.</p> <p>El acceso a la finca se realiza desde la carretera de Cerdanyola a Horta (barrio de Barcelona), por un camino particular que baja sinuoso y con pendiente,</p>

Aspecto	Descripción
	con muros de contención de las terrazas, de pizarra y con hileras de ladrillos de cerámica alrededor de la masía.
10. Servicios	Electricidad, gas, agua potable, depuración de agua residual mediante humedales superficiales, restaurante, infraestructura para gestión del agua y riego, entre otros.
11. Recursos cercanos	Madera, pizarra, estiércol del ganado.
12. Problemas medioambientales, riesgos y catástrofes	Riesgo de incendios que pondrían en peligro a las especies vegetales, riesgo de contaminación de las fuentes de agua de riego.

Fuente: Elaboración propia con base en la Tabla 7.2.

Realizar un análisis medioambiental inspirado en la ética y los principios de la permacultura, como el que se muestra en la tabla anterior, permite una adecuada identificación de todos los factores que afectan tanto el diseño como la gestión del proyecto a realizar.

Esta confluencia de las diferentes características de la zona tales como la topografía, hidrología, etc., ayudan a realizar una adecuada zonificación del lugar, a fin de aprovechar de la forma más eficiente posible todos los recursos que se tienen disponibles en el lugar de estudio, esto es, obtener los mayores rendimientos con la menor cantidad de recursos invertidos; para ello, es importante implementar cada elemento del sistema en el espacio más adecuado según las condiciones requeridas. Por ejemplo, en la Finca de Can Valldaura, la zona noreste, al ser la más seca e iluminada del lugar, es la más óptima para el viñedo y los cultivos de olivos, almendros e higueras.

De esta manera, una adecuada interconexión de todos los componentes naturales y antrópicos involucrados en el Proyecto *QValldaura* permitirá llevar a cabo una gestión óptima del agua bajo los principios de la permacultura, logrando una autosuficiencia a nivel hídrico y haciendo un uso más eficiente de la misma, a fin de reducir las pérdidas y la contaminación que merman su cantidad y calidad, respectivamente.

Tal gestión se puede apoyar de análisis de las entradas y salidas hídricas del sistema, a fin de cubrir las necesidades de agua de los cultivos, cumpliendo además con una calidad adecuada en el agua de riego y en la que consumirá el ganado, dinamizando así las actividades agrícolas y ganaderas de la finca.

Además, considerando las características de baja humedad en el suelo de la finca, se pueden proponer sistemas de cultivo que mejoren la estructura del suelo, aumentando la infiltración del agua de la lluvia y su retención.

Conclusiones

En este trabajo se expuso la importancia de la permacultura como sistema de diseño, pues busca crear sistemas que sean viables desde el punto de vista ecológico, económico y social, es decir que estén orientados a la sostenibilidad, para satisfacer las necesidades humanas presentes sin sobreexplotar o contaminar las fuentes de recursos para garantizar tal sostenibilidad a largo plazo.

Adicionalmente, se estudiaron las medidas de uso eficiente del agua que pueden efectuarse en las actividades de riego, teniendo como base la permacultura y el cuidado de la calidad del agua, a fin de mejorar los rendimientos de cultivo.

En este contexto, es fundamental que un recurso precisamente tan limitado (con decreciente disponibilidad) y tan expuesto a la contaminación, como lo es el agua, logre gestionarse de la mejor manera, esto mediante un uso eficiente que permita utilizar en los proyectos la menor cantidad posible y sin mermar en demasía su calidad.

La Finca Can Valldaura, que es el caso de estudio analizado en este documento, sirvió para ejemplificar una comunidad pequeña donde se pretende hacer una gestión eficiente del agua de riego. Por tanto, la evaluación cualitativa que se realizó sobre este caso, fundamentada en los principios de permacultura y calidad del agua, permitió conocer la importancia que tienen todos los elementos de un sistema, y poder determinar las condiciones que cada uno necesita para desarrollarse de forma adecuada. En términos generales, este tipo de análisis sirve para establecer zonas en el lugar de estudio, con el fin de aprovechar al máximo el espacio y las condiciones específicas de cada una para obtener los mejores rendimientos, logrando así que todas las actividades se conecten con el objetivo de producir los alimentos necesarios para que el sistema sea autosuficiente.

El propósito final de este trabajo es que sirva como guía para cualquier persona que tenga la intención de implementar un sistema de cultivo, con el fin de que en éste se logre un uso eficiente del agua, cuidando que la calidad del agua de riego sea adecuada (pues de ello depende que se puedan obtener los máximos rendimientos en los cultivos) y que el sistema alcance la autosuficiencia alimentaria optimizando las técnicas de producción local mediante las herramientas que ofrece la filosofía de la permacultura, pues una vez conociendo los principios que la sustentan y cómo influyen éstos en el cuidado de la gente y de los recursos naturales, se puede lograr un cambio integral que comience por beneficiar a las comunidades pequeñas.

Referencias

- Acosta, R. d. (2015). *Permacultura y sostenibilidad agrícola: Una nueva forma de cultivar suelo, salud y alimentos*. Universidad de La Laguna.
- Arreguín, F. I. (1991). Uso eficiente del agua. *Ingeniería Hidráulica en México, mayo-agosto*, 9-22.
- Carrazón, J. (2007). *Manual práctico para el diseño de sistemas de minirriego*. Tegucigalpa, Honduras: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Obtenido de <http://www.fao.org/3/a-at787s.pdf>
- Comisión Nacional del Agua. (2016). *Estadísticas del Agua en México*. México: Conagua. Obtenido de http://201.116.60.25/publicaciones/EAM_2016.pdf
- Comunicae.es. (2016). *El Instituto de Arquitectura Avanzada de Catalunya pone en marcha el primer laboratorio para la autosuficiencia de Europa, situado en Valldaura*. Obtenido de Comunicae.es: <https://www.comunicae.es/nota/el-instituto-de-arquitectura-avanzada-de-1154429/>
- Construccion Natural Bariloche. (16 de abril de 2008). *YANANTIN - Centro Educativo de Permacultura y Construcción Natural*. Obtenido de Construccion Natural Bariloche: <http://construccionnaturalbariloche.blogspot.mx/2008/04/yanantin-centro-educativo-de.html>
- Cruz, M. C., & Cabrera, C. (2015). *Permacultura: Familia y sustentabilidad*. Cuba: Fundación Antonio Núñez Jiménez de la Naturaleza y el Hombre (FANJ). Obtenido de <http://www.cospe.org/wp-content/uploads/2012/10/PERMACULTURA-EN-CUBA-imprensa-vf.pdf>
- EcuRed. (s.f.). *Eficiencia del riego*. Obtenido de EcuRed: Conocimiento con todos y para todos: https://www.ecured.cu/Eficiencia_del_riego
- FAO. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Obtenido de <http://www.fao.org/3/a-x0490s.pdf>
- FEA, CEMDA, & Presencia Ciudadana Mexicana, A.C. (2006). *El agua en México: lo que todas y todos debemos saber*. Obtenido de CEMDA: https://www.cemda.org.mx/wp-content/uploads/2011/12/agua-mexico_001.pdf
- Fernández, M. D. (2006). Eficiencia en el uso del agua en distintos sistemas hortícolas. *Tecnoambiente*(160), 131-134.
- FONCODES. (2014). *Pequeños sistemas de riego por aspersión a nivel familiar - Manual Técnico*. Lima, Perú: Fondo de Cooperación para el Desarrollo Social (FONCODES).
- Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C. (2016). *Visión General del Agua en México*. Obtenido de Agua.org.mx: <https://agua.org.mx/cuanta-agua-tiene-mexico/>

- Gras, E. (2010). *Cosecha de Agua y Tierra: Diseño con Permacultura y Keyline*. México: COAS ediciones.
- GreenFacts. (s.f.). *Resumen del 2º Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo*. Recuperado el 14 de Diciembre de 2017, de <https://www.greenfacts.org/es/recursos-hidricos/recursos-hidricos-foldout.pdf>
- Hemenway, T. (2009). *Gaia's Garden: A Guide to Home-Scale Permaculture, 2nd Edition*. Vermont, USA: Chelsea Green Publishing.
- Jerónimo, U. A. (2009). *La Importancia De las Tecnologías Alternas en el siglo XXI: el uso de la Permacultura en la Renovación del Campo Mexicano y las Zonas Urbanas (2007- 2008)*. México: Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM.
- Medrano, H., Bota, J., Cifre, J., Flexas, J., Ribas-Carbó, M., & Gulías, J. (2007). Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones Geográficas*(43), 63-84.
- Mollison, B. (1988). *Permaculture: A Designer's Manual*. Australia: Tagari Publications.
- Nieto, C. (2012). *La Permacultura en la gestión del agua: El caso de Can Valldaura*. Barcelona, España: Universidad Autónoma de Barcelona. Obtenido de https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2012/hdl_2072_205657/PFC_ClaudiaNietoMaso.pdf
- Salazar, R., Rojano, A., & López, I. L. (2014). La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. *Tecnología y Ciencias del Agua*, V(2), 177-183. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v5n2/v5n2a12.pdf>
- SEMARNAT. (2016). Disponibilidad natural media total y per cápita por Región Hidrológico-Administrativa. México. Obtenido de http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/compartidos2/complementarias/COM_IC_A_DISPMEDIA.xlsx
- Toledo, A. (2002). El agua en México y el mundo. *Gaceta Ecológica, julio-septiembre*(64), 9-18. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53906402>
- UNC. (s.f.). *Determinación del contenido hídrico del suelo*. Obtenido de Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Córdoba: http://agro.unc.edu.ar/~ceryol/documentos/ecofisiologia/GUIA_AGUA.pdf
- WWF España. (2009). *Manual de Buenas Prácticas de Riego: Propuestas de WWF para un uso eficiente del agua en la agricultura*. Madrid, España: WWF/Adena. Obtenido de http://awsassets.wwf.es/downloads/buenas_practicas_de_riego.pdf