

Este libro expone los fundamentos teóricos de los sistemas de producción en suelo enarenado y en sustratos. Evalúa experimentalmente ambas técnicas de producción, muestra y analiza ventajas e inconvenientes de cada sistema, sobre una base técnica-económica, y termina dando recomendaciones sobre la sostenibilidad de un sistema agrario en un territorio donde el principal factor limitante es el agua.

El enjuiciamiento de las técnicas de cultivo, abordado en este libro, ha exigido el esfuerzo metodológico que permite acercar las formulaciones teóricas a las realidades empíricas, para conectar y sintetizar enfoques, instrumentos y enseñanzas de disciplinas diferentes. Todo ello va a redundar en un mejor conocimiento a la hora de analizar los sistemas agrarios, por lo que esta obra puede ser particularmente interesante para un amplio colectivo de estudiantes y técnicos interesados por la agronomía, las ciencias ambientales, la economía y las ciencias de la naturaleza más vinculadas al objeto de ese estudio.

ISBN 84-7774-976-0



9 788477 749769

6

J. López-Gálvez y J. M. Naredo

Sistemas de producción agraria e incidencia ambiental



Sistemas de producción e incidencia ambiental del cultivo en suelo enarenado y en sustratos

J. López-Gálvez y J. M. Naredo



FUNDACION
ARGENTARIA

VISOR
(distribuciones/sa)

J. LÓPEZ-GÁLVEZ Y J. M. NAREDO

SISTEMAS DE PRODUCCIÓN
E INCIDENCIA AMBIENTAL DEL CULTIVO
EN SUELO ENARENADO Y EN SUSTRATOS

COLECCIÓN
ECONOMÍA Y NATURALEZA
SERIE «TEXTOS APLICADOS»

J. LÓPEZ-GÁLVEZ Y J. M. NAREDO

SISTEMAS DE PRODUCCIÓN
E INCIDENCIA AMBIENTAL DEL CULTIVO
EN SUELO ENARENADO Y EN SUSTRATOS

FUNDACION
 ARGENTARIA

VISOR
(distribuciones/sa)

Colección «Economía y Naturaleza», vol. VI
Serie «Textos Aplicados»

*A todos los que animan
la agricultura en armonía con el entorno*

Mecanografía: M. A. Moya
Dibujos: J. López-Gálvez y A. Céspedes
Diseño portada: Aitor Méndez y Raquel de la Fuente

© J. López-Gálvez y J. M. Naredo
© Fundación Argentaria - Visor Distribuciones, 1996

ISBN: 84-7774-976-0
Depósito Legal: M-38.483-1996

Visor Fotocomposición
Impreso en España - *Printed in Spain*
Gráficas Rógar. Navalcarnero (Madrid)

ÍNDICE

PRÓLOGO	15
INTRODUCCIÓN, J. López-Gálvez y J. M. Naredo	17

PARTE GENERAL

Planteamientos técnicos, económicos y ambientales

CAPÍTULO I. EL SUELO ENARENADO Y LOS SUSTRATOS, J. López-Gálvez	23
1. Descripción del enarenado	23
2. Descripción de los sustratos	26
2.1. Características de la perlita	27
2.2. Características de la lana de roca	29
2.3. Otros sustratos de cultivo	32
3. Apéndice	35
3.1. Análisis del estiércol	35
3.2. Clasificación edafológica	35
CAPÍTULO II. EL INVERNADERO, J. López-Gálvez y J. C. López- Hernández	37
1. Antecedentes	37
2. Armazón estructural	39
3. Material de cerramiento	43
4. Efecto invernadero	50
5. Procesos de transferencia de calor	51
6. El clima en un invernadero tipo parral	52
7. Apéndice	53
7.1. Transmisividad de la radiación solar en diferentes puntos del invernadero	54
7.2. Radiación	54
7.3. Temperatura	56
7.4. Humedad relativa del aire	56
7.5. Viento	57

7.6. Evaporación	57
7.7. Dióxido de carbono	59
CAPÍTULO III. EL CULTIVO, J. López-Gálvez y F. Bretones	61
1. Material vegetal	61
2. Semillero	62
3. Preparación del suelo o sustrato	63
4. Trasplante o siembra	64
5. Técnicas de cultivo	64
6. Factores climáticos	67
7. Apéndice	68
7.1. Datos estadísticos sobre cultivos hortícolas	68
7.2. Ciclos usuales de cultivo	68
7.3. Densidad de plantación	69
7.4. Requerimientos en temperatura, humedad relativa y luz de algunas especies	69
7.5. Poda de los principales cultivos en invernadero	70
7.6. Técnicas de realización del injerto	73
CAPÍTULO IV. EL RIEGO, J. López-Gálvez, J. Martínez y M.^a D. Fernández	77
1. Sistemas de riego por goteo	77
2. Aplicación del riego con sistemas de goteo	80
3. Programación	82
4. Apéndice	88
4.1. Comportamiento hidráulico de los goteros	88
4.2. Métodos de estima de la ETo y procedimiento de cálculo	90
4.3. Estimación que de la ETo hacen los métodos Penman-FAO, radiación-FAO y tanque clase A-FAO para el invernadero parral de Almería	92
4.4. Tolerancia a la salinidad de las principales hortalizas	94
CAPÍTULO V. LA FERTILIZACIÓN, J. López-Gálvez, y C. Segovia	95
1. Fertilización de los cultivos	95
2. Fertilización del suelo enarenado	97
3. Fertilización de los sustratos	99
3.1. Soluciones nutritivas	99
3.2. Criterios para preparar soluciones nutritivas	101
3.3. Sistemas de incorporación de fertilizantes al agua de riego	102
4. Apéndice	107
4.1. Unidades y cambios de unidad	107
4.2. Fertilizantes empleados y riquezas	109

CAPÍTULO VI. LA SANIDAD DE LOS CULTIVOS, J. López-Gálvez, y J. Carreño	111
1. Problemas en el semillero	111
1.1. Problemas sanitarios en el periodo mayo a agosto	111
1.2. Problemas sanitarios en el periodo diciembre a febrero	112
2. Problemas en el invernadero	113
2.1. Plagas de la parte aérea	113
2.2. Plagas de la raíz	114
2.3. Enfermedades	114
3. Control sanitario	117
3.1. Desinfección del suelo y de los sustratos	119
3.2. Los productos fitosanitarios	120
3.3. Métodos de aplicación	121
3.4. El control integrado	123
4. Apéndice	124
4.1. Materias activas más utilizadas	124
CAPÍTULO VII. EL ANÁLISIS ECONÓMICO Y AMBIENTAL, J. M. Naredo y J. López-Gálvez	127
1. Introducción	127
2. Objeto	129
3. Método	133
4. Análisis físico de los procesos productivos	136
5. Análisis de la rentabilidad financiera de los procesos productivos	140
6. Aplicación de un enfoque global a los procesos de producción	143
7. Apéndice	146
7.1. Marco institucional	146
7.2. Procesos del enarenado y de los sustratos	147
7.3. Balance físico	148
7.4. Balance monetario	149
Índice de cuadros	151
Índice de gráficos	152
Índice de figuras	153

PARTE ESPECIAL

Estudio experimental comparativo de sistemas de cultivo en suelo enarenado y en sustrato

J. López-Gálvez, J. M. Naredo, S. Echeverría, J. C. López-Hernández, C. Segovia, F. Bretones, G. Castañón, A. Gallego y J. R. Díaz Álvarez

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES	159
---------------------------------------	-----

CAPÍTULO II. DESCRIPCIÓN Y METODOLOGÍA	161
1. Objeto, tratamientos y diseño experimental	161
2. Ubicación del experimento	162
3. Características y manejo del enarenado y los sustratos	163
4. Características del medio de cultivo	165
5. Cultivo: el tomate	166
6. Riego	166
6.1. <i>Agua de riego</i>	166
6.2. <i>Sistemas de riego</i>	167
6.3. <i>Programación del riego</i>	170
6.4. <i>Obtención de la evapotranspiración y determinación del coeficiente de cultivo</i>	174
7. La fertilización	175
7.1. <i>Programación</i>	175
7.2. <i>Nitrógeno lixiviado y extracción de nutrientes</i>	180
8. Productividad del cultivo	180
8.1. <i>Radiación interceptada por el cultivo</i>	180
8.2. <i>Crecimiento de la planta</i>	181
8.3. <i>Biomasa</i>	181
8.4. <i>Cosecha: cantidad, calibre y calidad</i>	181
9. Datos económicos	182
9.1. <i>Alternativas consideradas y coste de la inversión</i>	182
9.2. <i>Flujos físicos y monetarios</i>	184
CAPÍTULO III. RESULTADOS	191
1. Técnicos	191
1.1. <i>Caracterización física de los sustratos de cultivo</i>	191
1.2. <i>Clima del invernadero</i>	198
1.3. <i>Balance hídrico</i>	200
1.4. <i>Balance salino</i>	204
1.5. <i>Parámetros de productividad del cultivo</i>	207
1.6. <i>Cosecha</i>	212
1.7. <i>Características de los frutos</i>	214
2. Económicos	217
2.1. <i>Rendimiento físico de los procesos productivos</i>	217
2.2. <i>Cosecha: cantidad, calidad y precio</i>	231
2.3. <i>Rentabilidad financiera de los procesos productivos</i>	236
2.4. <i>Apéndice</i>	243
Índice de cuadros	247
Índice de gráficos	251
Índice de figuras	253

SÍNTESIS

J. López-Gálvez y J. M. Naredo

CAPÍTULO I. CONCLUSIONES	257
1. Metodológicas	257
2. Flujos físicos y contaminación	258
3. Calidad y precios de la cosecha	261
4. Rentabilidad y «externalidades» ambientales	261
5. Tecnología apropiada y sostenibilidad local de los sistemas de cultivo	263
CAPÍTULO II. RECOMENDACIONES	267
1. Institucionales	267
2. Relativas al uso del agua	268
3. Relativas al ambiente y al territorio	268
Índice de figuras	271
Glosario de términos	273
Símbolos utilizados	279
Definiciones	283

PRÓLOGO

Este libro ofrece los fundamentos teóricos de los sistemas de producción en suelo enarenado y en sustratos. Evalúa experimentalmente ambas técnicas de producción. Muestra y analiza ventajas e inconvenientes de cada sistema, sobre una base técnica-económica. Y termina dando recomendaciones sobre la sostenibilidad de un sistema agrario en un territorio donde el principal factor limitante es el agua.

El libro se ha estructurado en tres partes de acuerdo con el planteamiento general arriba enunciado. La primera consta de siete capítulos que dan al lector los conocimientos básicos sobre las técnicas agrícolas consideradas, pasando revista al suelo enarenado y a los sustratos, al invernadero, a la práctica de cultivo, al riego, a la fertilización y a la sanidad. El capítulo siete da una visión sobre el análisis económico y ambiental, incidiendo especialmente sobre la conveniencia de conectar las dimensiones físicas, monetarias e institucionales de la actividad objeto de estudio.

La segunda parte contiene todos los aspectos relacionados con el trabajo experimental. Aquí se da a conocer el procedimiento seguido en el estudio comparativo de los cultivos en suelo enarenado y en sustratos, así como los resultados alcanzados. Los balances físicos y monetarios han sido documentados con especial cuidado, ya que son los indicadores que decidirán la conveniencia del cambio de un sistema de cultivo por el otro.

La parte final establece las conclusiones derivadas del trabajo experimental con vistas a áreas geográficas donde el agua es un factor limitante.

El enjuiciamiento de las técnicas de cultivo, abordado en este libro, ha exigido el esfuerzo metodológico que permite acercar las formulaciones teóricas a las realidades empíricas, para conectar y sintetizar enfoques, instrumentos y enseñanzas de disciplinas diferentes. Todo ello va a redundar en un mejor conocimiento a la hora de analizar los sistemas agrarios, por lo que esta obra puede ser particularmente interesante para un amplio colectivo de estudiantes y técnicos interesados por la agronomía, las ciencias ambientales, la economía y las ciencias de la naturaleza más vinculadas al objeto de ese estudio.

Las figuras que se acompañan pretenden una más fácil comprensión de algunos de los conceptos. Sirvan a título de ejemplo los que hacen alusión al efecto invernadero y a los procesos de transferencia de calor.

Este libro ha sido concebido y redactado íntegramente por José López-Gálvez y José Manuel Naredo. No obstante, al apoyarse en los resultados de un trabajo experimental (dirigido por José López-Gálvez) en el que participó un equipo multidisciplinar, se indican las personas que intervinieron en cada caso en el índice y en la cabecera de cada capítulo o parte.

Finalmente, queremos expresar nuestro agradecimiento a los profesores Losada, Fereres y Cruz por sus sugerencias en algunos capítulos, así como a la Caja Rural de Almería, a la Fundación para la Investigación Agraria en la Provincia de Almería y a la Fundación Argentaria por su financiación en la realización y tratamiento de datos del experimento realizado.

J. López Gálvez y J. M. Naredo

INTRODUCCIÓN

J. López-Gálvez y J. M. Naredo

La agricultura tradicional pone el énfasis en suelo, clima y agua como condicionantes de la actividad agraria. La presencia de condiciones desfavorables en alguno de esos factores limita el potencial de las prácticas convencionales, hasta el punto de que éstas llegan a perder interés económico. Sin embargo, las limitaciones en las dotaciones de suelo, clima y agua han podido paliarse, en diferentes territorios, con la implantación de suelos artificiales, de invernaderos y de sistemas de riego. Las técnicas de formación de suelo artificial son practicadas en diferentes áreas de la geografía española. Éstas se pueden encontrar en el sureste peninsular (*enarenado*), en la provincia de Cádiz (*navazos*) y en las Islas Canarias (*sorribas* y *picón* de origen volcánico).

La creación de suelo enarenado se ha mostrado como un medio de cultivo muy adecuado, en el sureste de España, destacando su buena fertilidad y su efecto sobre la eficiencia en el uso del agua, al disminuir pérdidas por evaporación. La técnica de cultivo en sustrato da un paso más, al utilizar el suelo sólo como apoyo sobre el que se colocan los contenedores. Esta práctica de cultivo es usual en invernaderos con el clima total o parcialmente controlado. Por el contrario, los sustratos no están aún muy introducidos en áreas con inviernos suaves donde predominan los invernaderos pasivos.

El invernadero es una construcción realizada para modificar el clima con el fin de mejorar la productividad de los cultivos. En algunos se mejoran las condiciones ambientales utilizando aportes energéticos externos, lo que ha permitido cultivar plantas, en lugares y épocas del año, donde las condiciones climáticas imposibilitan o limitan su desarrollo. Las prácticas de cultivo y las variedades utilizadas difieren de las que se usan en los cultivos de calle. El material vegetal utilizado precisa de unos requerimientos (agua, nutrientes, luz y anhídrido carbónico) que son necesarios conocer, para desarrollar todo su potencial productivo. Los ciclos de cultivo se realizan en función de las expectativas de mercado, pasando a un segundo plano las exigencias climáticas de la especie.

Tradicionalmente, en determinadas áreas, se ha venido utilizando el riego a pie con dotaciones por turnos, la frecuencia ha venido impuesta

por el sistema de tandas que, en la mayoría de los casos, era superior a la semana. En estas circunstancias, disponer de suficiente volumen de suelo agrícola, para que haga la función de reserva hídrica, está justificado. La construcción generalizada de depósitos reguladores y la aparición de los sistemas de riego por goteo, que permiten la aplicación de agua y de fertilizantes a pie de planta con la frecuencia que se precise, obliga a revisar la función del suelo como almacén de agua y nutrientes. Estos sistemas facilitan la aportación de agua y de agroquímicos, y mejoran el control de los lixiviados (agua y nutrientes). Todo ello conlleva un rendimiento mayor del agua de riego y una disminución de la contaminación procedente de la utilización de fertilizantes y otros agroquímicos. Es evidente que, en estas circunstancias, el suelo deja de desempeñar el papel de contenedor de la reserva de agua y de nutrientes.

Las necesidades de agua y de nutrientes de las plantas cultivadas, bajo condiciones de invernadero, son diferentes de las cultivadas al aire libre. El microclima que genera el invernadero difiere del exterior con menores valores de: radiación solar, déficit de presión de vapor y evaporación, siendo la velocidad de viento casi nula. Estas alteraciones climáticas reducen considerablemente la demanda evaporativa, por lo que el invernadero es una estructura eficiente para reducir el consumo de agua¹. Las plantas cultivadas en estas condiciones tienen un crecimiento más acelerado, acortando el tiempo entre los distintos estados fenológicos, provocando una intensidad de extracción de agua y de nutrientes diferente a la que el cultivo tendría al aire libre.

Los problemas sanitarios de los cultivos en invernadero se ven favorecidos por la intensidad de ocupación del suelo y por la gran cantidad de biomasa producida, para cuyo control se utilizan básicamente productos fitosanitarios². La intensidad de ocupación del suelo precisa de un cierto grado de seguimiento con el fin de mantenerlo dentro de un nivel de sanidad aceptable, siendo los principales problemas los relacionados con hongos y nematodos. La proliferación de plagas y enfermedades de la parte aérea está relacionada con las condiciones ambientales del invernadero, a lo que hay que añadir la gran cantidad de biomasa que dificulta la eficacia de los tratamientos. Las mayores temperaturas van a ocasionar que las plagas se reproduzcan a gran velocidad. Los altos porcentajes de humedad relativa facilitan el desarrollo de enfermedades criptógamas y bacterianas. Aunque también hay que reconocer que el recinto cerrado de los invernaderos

permite aislar mejor a los cultivos de las plagas, a la vez que facilita la aplicación de tratamientos más localizados y con dosis inferiores a las que serían requeridas en cultivos de calle para solucionar problemas similares.

En suma, que las innovaciones técnicas han permitido soslayar los diversos factores limitantes, creando sistemas agrarios artificiales, aislados del medio natural en el que se desenvolvían. La ganadería sin base territorial y los cultivos en sustrato o los hidropónicos desarrollados en un medio bastante controlado, constituyen casos extremos en la separación de las prácticas agrarias del medio natural y en la emancipación de sus «factores limitantes», posibilitando la utilización de las razas y de las variedades más productivas proporcionadas por la investigación genética, sin preocuparse de su adaptación a las condiciones locales. Como contrapunto, los sistemas agrarios independientes del medio suelen acentuar los problemas ambientales con relación a las prácticas tradicionales. En efecto, mientras que el funcionamiento estable de la biosfera y, en buena medida, de la agricultura tradicional acostumbraba a cerrar los ciclos de los materiales, reconvirtiendo los residuos en recursos; la moderna agricultura no cierra dichos ciclos, originando a la vez problemas de escasez de recursos y de exceso de residuos. La creciente preocupación por la «sostenibilidad» de los sistemas agrarios, induce cada vez más a investigar los problemas que se plantean al llevar las innovaciones más allá de la escala de laboratorio o de campo donde habían sido experimentadas. Ante este hecho, cabe preguntarse ¿hasta qué punto interesa avanzar por el camino que prescinde del medio natural? O, también, ¿hasta dónde trae cuenta afinar en el control de la nutrición de las plantas y del ambiente en el que se desenvuelven, extendiendo a escala real los logros alcanzados experimentalmente?

Parece evidente que las cuestiones planteadas deben encontrar respuesta en el terreno de lo económico. Es este razonamiento, al relacionar los medios con los fines o las inversiones y gastos con sus resultados productivos, el que ha de poner coto, en la realidad, al afán sin límite del perfeccionamiento de procesos y sistemas propios de técnicas especializadas. El universo de posibilidades que se revelan técnicamente viables a escala de laboratorio da lugar, así, a un conjunto más reducido de aplicaciones con eficiencia y rentabilidad suficientes para hacerlas aconsejables económicamente a escala de campo. A la vez que este subconjunto origina otro todavía más reducido que abarca sólo aquellas aplicaciones cuya generalización a escala regional resulta «sostenible». El análisis económico debe abarcar al menos dos escalas: una, el invernadero o campo considerado y, otra, el de región o territorio en el que se encuadra el sistema agrario objeto de estudio. La primera ha de realizarse en términos de rentabilidad empresarial, analizando hasta qué punto las previsiones de ingresos justifican el esfuerzo financiero requerido para obtenerlos. La segunda en términos de eficiencia y «sostenibilidad» en el uso de los recursos naturales, estudiando

¹ Fernández, M.^a D., F. Orgaz y J. López-Gálvez (1995), *La demanda evaporativa en el invernadero parral*. Actas del I Simposium Iberoamericano sobre «Aplicación de los plásticos en las tecnologías agrarias», FIAPA-CEPLA, pp. 231-241.

² López-Gálvez, J., J. Carreño y E. Viñuela (1990), «Análisis sobre la utilización de productos fitosanitarios, en un cultivo de pimiento y judía de enrame bajo abrigo plástico, en Almería», *Boletín de Sanidad Vegetal, Plagas*, vol. 6, pp. 213-227.

las condiciones bajo las cuales la extensión de ciertas técnicas o prácticas de cultivo permitiría el mantenimiento estable del sistema agrario en un territorio concreto. El problema estriba en que pueden plantearse contradicciones entre las dos escalas de análisis mencionadas: la introducción de una determinada innovación técnica puede resultar viable y rentable en un campo de cultivo, pero ser inviable o «insostenible» su extensión a escala regional, debido a las características poco propicias del medio natural... o a la inadecuación del marco institucional. Habría, pues, que establecer las especificaciones técnicas o los cambios institucionales que aseguraran, en cada caso, la compatibilidad del sistema con el medio natural en el que se desenvuelve.

La experiencia que brinda el sistema de cultivo enarenado bajo invernadero pasivo, propio del litoral almeriense, permite extraer enseñanzas útiles para el desarrollo de la agricultura en zonas agroclimáticas similares. Esta tecnología local ha relacionado de modo apropiado el control del suelo (con cultivo enarenado), el control de agua y nutrientes (con riego por goteo) y el control del ambiente (con invernadero de plástico *parral de Almería*, denominados así por disponer de una estructura de soporte similar a la utilizada en la conducción del cultivo de la uva de mesa en Almería). Se ha conseguido crear, con bajos costes de inversión, unas condiciones favorables para el crecimiento del cultivo, que permiten incrementar el rendimiento y la precocidad de las cosechas, compitiendo, hasta la fecha, con técnicas de invernaderos más complejas y costosas, desarrolladas en otras latitudes.

Es conocida la gran tradición que la modalidad de cultivo enarenado tiene en algunas áreas del sureste español, tanto en cultivo de calle como bajo invernadero. Sin embargo, el cultivo en sustrato, de reciente implantación en invernaderos pasivos, sus problemas y sus posibilidades no son suficientemente conocidos en este medio. Sabido es que las innovaciones, proporcionadas por la tecnología agraria, deben adaptarse a las condiciones del medio para garantizar su idoneidad. En el caso particular de la tecnología del cultivo en sustratos, los agricultores se encuentran con presiones comerciales notables, pero no cuentan con asesoramiento que les permita precisar las ventajas e inconvenientes que derivan de la generalización de dicho sistema de cultivo. Este trabajo tratará de cubrir el vacío indicado, aportando información técnica y económica del cultivo sobre enarenado y sustratos, para orientar su gestión a escala de campo y a escala del área geográfica en la que se encuadra.

PARTE GENERAL

PLANTEAMIENTOS TÉCNICOS, ECONÓMICOS Y AMBIENTALES

CAPÍTULO I

EL SUELO ENARENADO Y LOS SUSTRATOS

J. López-Gálvez

1. Descripción del enarenado

El enarenado es un sustrato artificial, típico de la zona costera de Almería y Granada. Su historia se remonta a finales del siglo pasado y, en cuanto a la forma en la que surgió, se cuentan las más diversas leyendas. Hay quien atribuye su origen a la observación de un agricultor, llamado Manuel Romero Rivas, al observar cómo las plantas cultivadas sobre arena mostraban mejor aspecto y mayor precocidad de maduración de los frutos. La forma en la que se narra como llegó esta arena a la parcela, es de lo más variada, desde quien comenta que fueron montículos de arena formados por las hormigas, hasta quien dice que fue la arena dejada por la avenida de una rambla¹.

Para la implantación del enarenado se precisa que el terreno de asiento haya sido previamente roturado y despedregado, procediendo a continuación al abancalado y nivelado con pendientes en torno al tres por mil, para evitar el arrastre de la arena con el riego. Donde no existe suelo vegetal se aporta una capa de tierra de unos 20 cm de espesor, relativamente menos permeable que el suelo natural. Una vez preparado el terreno y ejecutadas las obras de infraestructura de riego, se procede a la realización del enarenado. La primera operación a efectuar es la aportación de estiércol, enterrándose una parte (5 kg/m², aproximadamente) en el suelo natural o en la tierra aportada, incorporándolo mediante la última labor, para la que se suele emplear un cultivador rotativo. A continuación se extiende una capa de unos 2 cm de estiércol. Por último se coloca una capa de arena de playa de

¹ Manuel MENDIZÁBAL, 1984, *La horticultura forzada en Andalucía Oriental: Historia y evolución, características ecológicas, perspectivas*. Comunicación no publicada.

unos 10 cm de espesor. De esta manera se tiene un suelo con tres o cuatro estratos muy diferentes entre sí, tanto física como químicamente. La duración de la fertilidad del enarenado va a depender básicamente del estiercolado practicado y de la intensidad, tipo y rotación de los cultivos. Es necesario cada cierto tiempo (entre 4 y 6 años) proceder a reponer el estiércol. Esta operación se denomina 'retranqueo' y consiste en apartar la arena e incorporar estiércol de la misma manera y en igual cantidad que en la formación del enarenado, volviendo a extender, posteriormente, la capa superior de arena.

Primer estrato. La arena, químicamente, se puede considerar como un sustrato inerte. Su composición mineral es variable: un 70% son fragmentos de roca (esquistos cuarzosos, cuarcitas, micasquistos y calcoesquistos principalmente), un 25% son minerales de grano aislado (fundamentalmente cuarzo y, además, granate, goethita, magnetita, clorita, moscovita, biotita, hematites, ilmerita, turmalina y rutilo, éstos en pequeña cantidad) y el resto son fragmentos calcáreos de organismos. La granulometría es muy variable, en los enarenados clásicos predomina la arena gruesa (entre 2,0 y 0,2 mm de diámetro), lo que hace que la velocidad de infiltración del agua sea alta. El bajo calor específico de la arena provoca su rápido calentamiento y enfriamiento, dependiendo de la radiación solar, que influye en la temperatura de los otros estratos. Su elevada porosidad encierra una gran masa de aire que actúa como aislante térmico, evitando que el suelo alcance altas temperaturas durante el día y se enfríe excesivamente por la noche. Esta propiedad determina la disminución de la evaporación desde el suelo y en consecuencia evita la ascensión por capilaridad de las sales, pudiendo utilizar para el riego aguas salinas con buenos resultados agronómicos. También mejora el aprovechamiento de la precipitación oculta, fundamentalmente, rocío.

Segundo estrato. Este horizonte es fundamentalmente nutritivo y en el se encuentran más del 50% de las raíces de las plantas². Lo constituye una capa de estiércol que suele tener entre 1 y 2 cm de espesor, con origen y características muy diversas. En el cuadro I.4 del apéndice se pueden ver algunas de las características del estiércol utilizado en los invernaderos de Almería.

Este estrato es relativamente menos permeable que el anterior y actúa controlando el balance hídrico y térmico. La estructura esponjosa del estiércol hace que retenga cantidades importantes de agua, que va cediendo poco a poco al cultivo, acción favorecida por la disminución de la evaporación a consecuencia de la capa de arena. Además, el calor absorbido durante el día por la arena se trasmite a la capa de estiércol, que lo

² CASTILLA, N., F. ELÍAS y E. FERRERES (1990), «Caracterización de condiciones climáticas y de relaciones suelo-agua-raíz en cultivo enarenado del tomate en invernadero en Almería», *Investigación Agraria. Producción y Protección Vegetales*, vol. 5(2), pp. 259-271.

transfiere lentamente al suelo, actuando como una cama caliente, con el consiguiente beneficio para el sistema radical de la planta y para la actividad química y biológica del suelo.

Tercer estrato. Constituido por el suelo aportado o el suelo natural con incorporación, en cualquier caso, de estiércol. Cuando se aporta tierra, ésta debe estar exenta de elementos gruesos y suele tener las características siguientes:

Propiedades químicas

- Contenido en materia orgánica escaso, aunque con la aportación del estiércol se eleva hasta el 1,7%.
- Relación C/N entre 6 y 7.
- Escasa cantidad de fósforo asimilable (5-21 ppm).
- Cantidades de potasio asimilable normales (83-230 ppm).
- pH alto (en torno a 8), debido a su naturaleza calcárea y/o dolomítica.

Propiedades físicas

- Textura. Franca, aunque varía entre franca-arcillosa y franca-limosa.
- Composición mineral. La fracción de 0,05 a 0,002 mm está formada principalmente por: filosilicatos, cuarzo, calcita y dolomía. La fracción menor de 0,002 mm está formada básicamente por ilita (más del 80%) y en menor porcentaje se encuentra caolinita, clorita y paragonita.

La tierra aportada mejora las características físicas del suelo original y la fertilidad.

Cuarto estrato. Son suelos, por lo general, poco profundos con una costra caliza.

Propiedades químicas

- Contenido en materia orgánica escaso.
- Poca cantidad de fósforo asimilable que, unido al alto contenido de caliza activa, va a propiciar los procesos de bloqueo de este elemento.
- Cantidades de potasio asimilable normales (unas 200 ppm).
- pH alto (en torno a 8).

Propiedades físicas

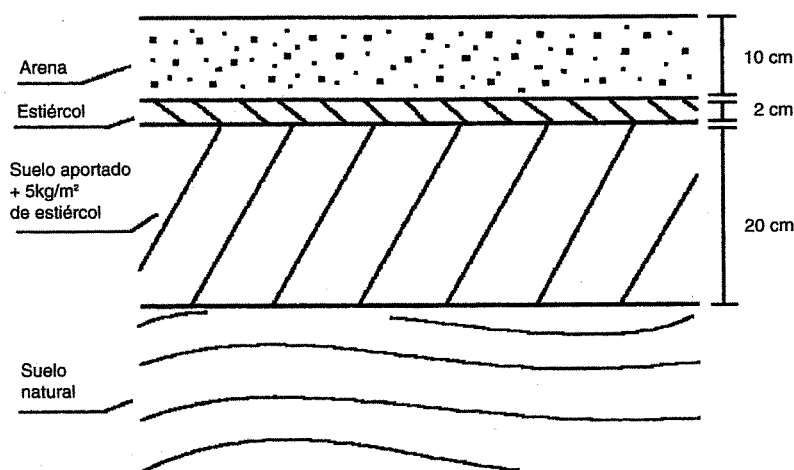
- Elementos gruesos. Presenta gran cantidad de elementos gruesos que superan el 70% en peso, lo que le dota de una gran permeabilidad. La densidad de los elementos gruesos oscila entre 2.500 y 2.600 kg/m³.

- Textura. Franca a franca-arenosa.

En el cuadro I.5 del apéndice se indica la clasificación edafológica de estos suelos.

Figura 1.1

PERFIL DEL ENARENADO



2. Descripción de los sustratos

Resulta usual el empleo del término hidropónico como sinónimo de cultivo en sustrato. Sin embargo, el cultivo hidropónico es, por definición, el que se efectúa en agua y el cultivo en sustrato es el que se realiza utilizando un medio sólido diferente del suelo³. Los sustratos empleados suelen ser muy variados, tanto en sus características físicas y químicas como en su volumen. Los sistemas de cultivo en sustrato se pueden clasificar en dos categorías:

- 1.ª Con drenaje perdido.
- 2.ª Con drenaje recirculado.

A la primera categoría pertenecen la práctica totalidad de las instalaciones existentes en invernaderos pasivos en España. Las plantas se cultivan sobre un sustrato al que se aporta, mediante riegos localizados muy frecuentes, una solución con nutrientes. Manteniendo entre cada riego una pequeña reserva de solución nutritiva, lixiviándose el excedente que no se recupera, por lo que la cantidad de fertilizantes aportados es muy superior a las necesidades del cultivo. El volumen de solución salina drenada (fertilizantes más iones del agua de riego) es función del manejo del riego, de la

calidad del agua empleada, de las características del sustrato y de la tolerancia a la salinidad del cultivo. Sirva a título de ejemplo, sobre el drenaje de agua y nutrientes en un cultivo de tomate, los siguientes datos tomados de una región del sureste de Francia donde, para una producción de 300 t/ha, el volumen de solución lixiviada oscila entre 2.000 y 3.000 m³/ha y se puede perder hasta 8 t/ha de fertilizantes⁴. A lo que hay que añadir el riesgo medioambiental que supone la masa de desechos dejados por los sustratos⁵.

Las cantidades tan importantes de agua y nutrientes perdidos con esta modalidad de cultivo hace aconsejable la utilización de sistemas con drenaje recirculado. Las plantas cultivadas con este técnica son alimentadas, continuamente, con una solución nutritiva en circuito cerrado, no siendo indispensable disponer de un sustrato.

2.1. Características de la perlita

Es un mineral de color grisáceo de origen volcánico, procedente de los depósitos de lava. El material se extrae, se muele y se cierne, calentándose a continuación en hornos a temperaturas entre 900 y 1.400°C. Durante este proceso de calentamiento la pequeña cantidad de agua de coordinación, entre un 2% y un 5%, contenida en las partículas se evapora, expandiéndose éstas de 4 a 20 veces su volumen original, adoptando formas esféricas que son muy porosas. Esta expansión se ve favorecida si se realiza un pretratamiento a 400°C⁶. A consecuencia de este proceso, se crea en el interior y exterior del material burbujas que pueden ser llenadas por aire o agua. Ésta es la razón de la elevada absorción de agua en su superficie, mientras que la difusión hacia el interior es prácticamente nula. Esta característica es importante para mantener un buen drenaje y una adecuada relación de aireación.

Propiedades químicas: Desde el punto de vista químico, la perlita es un sustrato inerte, sin capacidad de intercambio iónico y consecuentemente su efecto tampón es prácticamente nulo. Presenta reacción alcalina en solución (pH 7 a 7,5), debido a la disolución de álcalis. Ciertos elementos pueden estar presentes en cantidades excesivas (Fe, Mn, Zn y F), que se solubilizan en medios ácidos débiles. En medios ácidos (pH < 5) el aluminio puede solubilizarse y ocasionar problemas de fitotoxicidad en las plantas. Este riesgo de fitotoxicidad, muy limitado para la mayoría de las especies, es mayor cuanto más fina es la granulometría.

⁴ JEANNEQUIN, B. y R. FABRE (1993), «Procédé de culture hors-sol à circuit fermé. Etudes et perspectives», *PHM*, n.º 338, pp. 21-26.

⁵ BENOIT, F. y N. CEUSTERMANS (1993), «Growing tomatoes on ecologically sound substrates», *Plasticulture*, n.º 97-1993/1, pp. 41-47.

⁶ KADEY, F. L. (1975), *Perlite. Industrial Minerals and Rocks*, 4.ª ed., S. J. Lefond, Port City Press, Baltimore, USA, pp. 997-1015.

³ CTIFL, 1984, *Cultures légumières sur substrats*, París.: Ctifi, 241 pp.

Cuadro I.1

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA PERLITA⁷

Elemento	%
SiO ₂	73 a 75
Al ₂ O ₃	11 a 13
Fe ₂ O ₃	0,9 a 2
K ₂ O	2,3 a 4,4
Na ₂ O	3,3 a 5
CaO	0,7 a 1
MgO	0,2 a 0,35
TiO ₂	0,08 a 0,1
LiO ₂	0,01

Pérdidas por temperatura: 2% a 5%.
Trazas de Mn, Cr, Ba, Pb, Ni, Cu, B, Be, Mo, As.

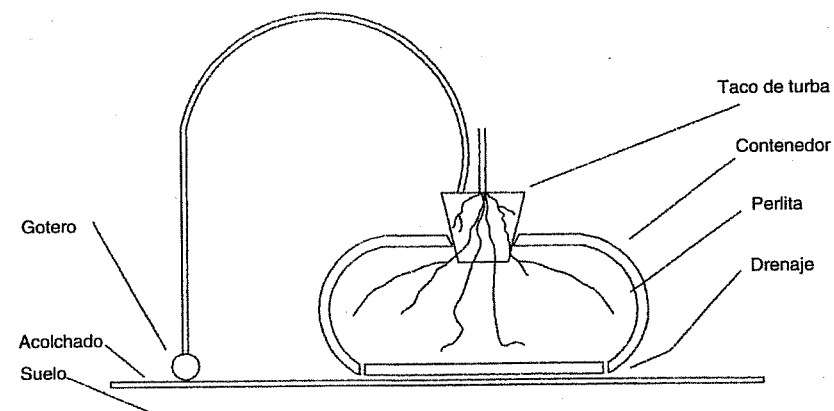
Propiedades físicas: Es un material muy ligero, su densidad oscila entre 80 y 100 kg/m³, de escasa resistencia mecánica y muy poroso. La granulometría comúnmente usada tiene entre 1 y 3,5 mm de diámetro. Debido a su gran porosidad, su acción capilar es muy fuerte y puede retener hasta 4 veces su peso en agua. La retención de agua y la aireación depende de la granulometría, siendo mayor el riesgo de asfixia de las raíces con el exceso de partículas finas, que retienen más agua y dificultan la aireación. Presenta baja conductividad térmica siendo su coeficiente de 0,033 kcal/(m² h °C).

Presentación comercial: La presentación de este producto para cultivo difiere según el fabricante. Debido al carácter granuloso del material, éste viene envasado en diferentes contenedores, macetas o sacos. En estos últimos los gránulos están envueltos o embutidos en una película de polietileno opaco, blanco o negro, que evita la evaporación de la solución nutritiva y la formación de algas. Al mismo tiempo favorece el enraizamiento de las plantas al elevar 1 ó 2 grados la temperatura de la zona de las raíces. Dichos sacos suelen tener una longitud aproximada de 1,25 m; unos 0,25 m de anchura y altura de unos 0,1 m.

⁷ Les ATP de l'INRA, n.º 2, 1985, *Les cultures hors sol*, Paris, 1985, 409 pp.

Figura I.2

SECCIÓN TRANSVERSAL DEL SISTEMA DE PERLITA



Las clases granulométricas que se comercializan son cuatro, con diferentes usos, según la retención de agua y aireación que se quiera:

- Perlita gorda, con diámetro entre 3 y 6 mm, con gran capacidad de aireación, utilizada principalmente en la reproducción vegetativa por estaquillado.

- Perlita estándar, con diámetro entre 1,5 y 5 mm, más heterogénea, que se suele mezclar con turba.

- Perlita fina, con diámetro entre 1 y 3 mm, que es la más empleada como sustrato hortícola. Tiene una granulometría variable según su origen y el país donde se comercializa.

- Perlita superfina, con diámetro entre 0,1 y 1,5 mm, utilizada para aumentar la retención de agua. Se suele mezclar con sustratos que, por desecación, pierden parte de sus características hidrofísicas, como las turbas negras y las cortezas vegetales.

2.2. Características de la lana de roca

La lana de roca se obtiene mediante un proceso industrial, por fusión a 1.500°C de rocas volcánicas basálticas (diabasas), calizas y carbón de coque, en una relación de masa 4-1-1 y extrusión posterior que da origen a filamentos, a los que se incorporan resinas destinadas a mantener su cohesión. También se añaden sustancias que le confieren una gran capacidad de absorción de agua.

Propiedades químicas: Las fibras de vidrio de muy pequeño diámetro tienen una gran superficie específica y no son totalmente insolubles. En contacto con la solución nutritiva liberan pequeñas cantidades de hierro, manganeso, calcio y magnesio. En determinados casos la liberación de elementos hay que tenerlas en cuenta para la preparación de las soluciones nutritivas⁸. Para el calcio y el magnesio, las cantidades liberadas son pequeñas en comparación con las concentraciones normales de las soluciones nutritivas, aunque en algunos casos se han señalado concentraciones anormales de magnesio⁹. La composición química de la lana de roca difiere ligeramente según los distintos fabricantes. La composición de los dos tipos de lana de roca comercializados en España se presenta en el cuadro I.2.

Cuadro I.2

COMPOSICIÓN QUÍMICA (%) DE LA LANA DE ROCA¹⁰

Elementos	Grodan	Cutilene
SiO ₂	47	41,8
CaO	16	41
Al ₂ O ₃	14	11
MgO	10	3,7
FeO	8	0,8
Na ₂ O	2	—
TiO ₂	1	0,4
MnO	1	0,5
K ₂ O	1	—
S	—	0,3

Nota: Grodan y Cutilene son las dos marcas comerciales que en la actualidad venden este producto.

La presencia de óxidos de calcio y de silicatos provocan inicialmente una reacción ligeramente alcalina de este material, con pH entre 7 y 8,5. Como los cultivos hortícolas necesitan para su correcto desarrollo un pH entre 5 y 6,5, es necesario, al utilizar material nuevo, realizar un ajuste de pH con solución nutritiva ligeramente acidulada. Una vez logrado el

⁸ VERDURE, M. (1981), «Culture sur laine de roche aux Pays Bas». *PHM, Revue Horticole*, 213, pp. 49-58.

⁹ VOOGT, S. J. (1978), *Cucumber raising in stone-wool matting*, Stikstol, 8, pp. 156-161.

¹⁰ Les ATP de l'INRA, n.º 2 (1985), *Les cultures hors sol*, INRA, Paris, 409 pp.

ajuste, se puede utilizar para la realización del cultivo, regando con solución nutritiva a su pH correcto¹¹.

Desde un punto de vista químico la lana de roca se puede considerar como un sustrato bastante inerte, sin capacidad de intercambio catiónico y con poder tampón prácticamente nulo.

Propiedades físicas: La lana de roca destaca por su alta porosidad. Su densidad es pequeña, variando entre 80 y 100 kg/m³, según los diferentes sistemas de fabricación. Es muy poco rígida, con estabilidad mecánica bastante mediocre, por lo que su duración se reduce a 2 ó 3 cultivos. Sin embargo, su poco peso favorece su fácil manejo. Por todo ello su presentación comercial se suele hacer en forma de *tablas* rectangulares.

La lana de roca, debido a su porosidad, retiene mucha agua y mucho aire, pero con una débil fuerza de retención, que provoca que el reparto volumen de agua/volumen de aire varíe a diferentes niveles, lo que condiciona las dimensiones, sobre todo altura, que deberán tener las *tablas* para que la planta encuentre una relación aire-agua idónea para su desarrollo.

Cuadro I.3

REPARTO (%) EN UNA TABLA DE 15 cm DE ALTURA EL AIRE Y EL AGUA

Altura del pan (cm)	Porosidad total	Volumen de aire	Volumen de agua
0	96	2	94
5	96	14	82
10	96	58	38
15	96	79	17

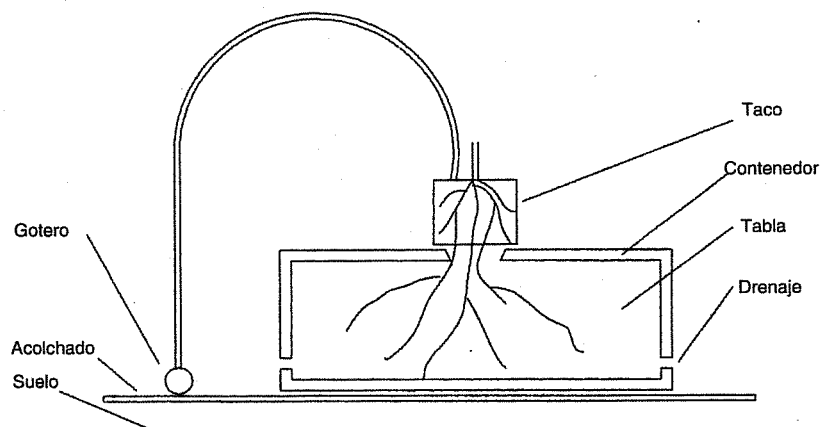
En el cuadro I.3 se puede observar que, para pequeños espesores de la *tabla*, la cantidad de agua puede ser excesiva y la cantidad de aire demasiado pequeña para un buen desarrollo de la planta. En grandes espesores se invierten los resultados. En consecuencia, comercialmente se suele utilizar un espesor de 7,5 cm que, después de saturación con una solución nutritiva, tiene un reparto aproximado de 2/3 de agua y 1/3 de aire en todo el volumen poroso de la *tabla*¹².

¹¹ Verwer, F. L. y Welleman, J. J. C. (1980), *The possibilities of grodan rockwool in horticulture*, ISOSC Proceeding, pp. 263-277.

¹² Verdure, M. (1981), «Culture sur laine de roche aux Pays Bas», *PHM, Revue Horticole*, 213, pp. 49-58.

Figura 1.3

SECCIÓN TRANSVERSAL DEL SISTEMA DE LANA DE ROCA



La presentación de este sustrato de cultivo difiere según el fabricante. Las características principales que deben reunir son:

- Altura que permita una buena relación agua-aire.
- Longitud de la *tabla* que permita mantenerla horizontal.
- Volumen mínimo de sustrato para las raíces de cada planta.

Las *tablas* suelen ir envueltas o embutidas en una película de polietileno opaco, blanco o negro, para evitar la evaporación de la solución nutritiva y la formación de algas. Las dimensiones usuales son: longitud 1 m, espesor unos 0,075 m y anchura que varía entre 0,15 y 0,3 m.

2.3. Otros sustratos de cultivo

El éxito del cultivo en sustrato va a depender de la elección más conveniente en función de sus propiedades físicas, toda vez que su composición química se puede alterar mediante el riego y el abonado¹³.

¹³ ANSORENA, J. (1994), *Sustratos: Propiedades y caracterización*, Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 172 pp.

Turbas

Las turbas son materiales orgánicos de origen vegetal, más o menos humificados, descompuestos de modo incompleto a causa del exceso de agua y que se van depositando con el transcurso del tiempo, lo que favorece la formación de estratos. Se generan en medios acuosos, ácidos y, por tanto, con bajo contenido trófico.

Existen diferentes tipos de turbas que se clasifican, sobre todo, por su grado de descomposición (débil, medio y alto) y por los materiales que las componen (turba fibricas, hémicas y sápicas). Su relación carbono/nitrógeno es variable.

Se utilizan por sus buenas condiciones físicas, ya que las químicas se pueden modificar fácilmente. Como sustratos se suelen utilizar las fibricas, por su mayor porosidad y las pardas o rubias, poco descompuestas, que se caracterizan por una estructura mullida, porosidad elevada, alta capacidad de retención de agua, baja densidad aparente y poca salinidad.

Las turbas rubias, poco humificadas, suelen presentar una capacidad de intercambio catiónico de unos 125 meg/100 g, con una densidad aparente entre 60 y 100 kg/m³, una densidad real entre 1.400 y 1.650 kg/m³ y una porosidad superior al 95%.

El ritmo de formación de las turbas es de unos 6,5 cm por siglo, por lo que se puede considerar como un recurso no renovable, debiéndose programar su explotación.

Antiguamente la turba se utilizaba como combustible y actualmente tiene una gran aceptación como sustrato en la floricultura y horticultura, especialmente en viveros y semilleros, importándose la mayor parte desde Canadá, Rusia, Finlandia y Alemania.

Corteza de pino

La corteza de los árboles comprende la interna (floema) y la externa (ritidoma y felema) y representa aproximadamente un 10% del volumen del árbol. Como sustrato se pueden utilizar cortezas de diferentes especies de árboles, aunque, en España, la más empleada es la de pino, por ser la más abundante. Éste se obtiene como subproducto en la industria maderera.

Al ser un material natural puede existir una gran variabilidad en su composición, dependiendo del árbol, tipo de suelo, época del año en que se tala, etc. Contiene una gran cantidad de materias orgánicas y pocas sustancias minerales. En el caso del pino, una composición media puede ser:

- Materia orgánica: Lignina y celulosa 85%.
- Resinas, ceras, taninos y almidones 13%.
- Materias minerales: 2%.

Las cortezas se pueden utilizar en fresco o compostadas. En el primer caso se puede producir una deficiencia de nitrógeno, en detrimento de la planta cultivada, ya que la relación C/N es muy elevada, con valores entre 100 y 200. También pueden existir problemas de fitotoxicidad, debido a la presencia de fenoles y de manganeso. Estos problemas se evitan con el compostaje.

Las propiedades físicas de las cortezas dependen del tamaño de sus partículas, siendo conveniente que, aproximadamente, un tercio de su peso esté constituido por partículas con tamaño inferior al milímetro.

Es un sustrato ligero, con densidad aparente variable entre 100 kg/m³ para las partículas gruesas y 400 kg/m³ para las finas. La porosidad suele ser mayor del 80%, pero con una débil capacidad de retención de agua y una capacidad de aireación muy elevada. Su pH es algo ácido (cortezas frescas) o neutro (cortezas compostadas) y su capacidad de intercambio catiónico es de unos 50 meq/100 g.

Arena

La arena es un material de naturaleza silíceica, con un contenido de SiO₂ > 50% y cuya composición depende de la roca madre. Pueden proceder de canteras, siendo más homogéneas y con formas angulosas debido al machaqueo a que han sido sometidas, o bien de ríos, en cuyo caso suelen estar mezcladas con materiales calcáreos y tener formas redondeadas.

Como sustrato se utiliza la arena gorda con granulometría comprendida entre 0,2 y 2 mm, debiendo estar exenta de particulosas limosas y arcillosas y, en caso de proceder de río, tener un contenido de material calcáreo, sobre todo carbonato cálcico, inferior al 10%.

La densidad aparente seca es mayor de 1.500 kg/m³, ya que los gránulos no son porosos. La porosidad total, de carácter intergranular, es inferior al 50%. Sus propiedades se corresponden con la ley de las mezclas, sobre todo para la retención de agua que es función de la granulometría. Su pH puede variar entre 4 y 8 y su capacidad de intercambio catiónico es prácticamente nula, inferior a 5 meq/100 g.

Las arenas con granulometría inferior a 0,5 mm tienen gran capacidad de retención de agua, pero son muy asfixiantes, ya que la fuerza de retención aumenta a medida que disminuye el tamaño de las partículas.

La arena es un sustrato muy duradero, debido a su gran resistencia mecánica. Se utiliza sola o mezclada con otros sustratos, especialmente turba, para aumentar la densidad del compuesto resultante. En caso de mezclas no mejora significativamente la aireación de los sustratos con elevada capacidad de retención de agua, siendo necesario para ello utilizar al menos un 75% de arena. El uso de arena en sacos de cultivo está empleándose en invernaderos de Murcia y Almería.

3. Apéndice

3.1. Análisis del estiércol

El cuadro I.4 da los resultados del análisis efectuado a dos muestras de estiércol. La muestra 1 es la que se coloca a continuación de la capa de arena y la muestra 2 se mezcla con la tierra aportada. Dada la variabilidad del estiércol utilizado en los enarenados la composición que se da en el cuadro puede no coincidir con las que realmente tenía el estiércol aportado en el experimento.

Cuadro I.4

RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LAS DOS MUESTRAS DE ESTIÉRCOL

Muestra	%C.O.	%C.EHT.	%C.AH.	%C.AF.	C:EHT/C:O:
1	6,8	2,2	0,4	1,8	0,3
2	5,5	1,7	0,3	1,4	0,3

Nota:

Muestra 1: Estiércol del estrato segundo. Muestra 2: Estiércol del estrato tercero.

%C.O.: Porcentaje de carbono orgánico.

%C.EHT.: Porcentaje de carbono en forma humificada.

%C.AH.: Porcentaje de carbono en forma de ácidos húmicos.

%C.AF.: Porcentaje de carbono en forma de ácidos fúlvicos.

3.2. Clasificación edafológica

El cuadro I.5 muestra la clasificación edafológica del suelo natural de la estación experimental «Las Palmerillas».

Cuadro I.5

CLASIFICACIÓN EDAFOLÓGICA (SISTEMA USDA-SOIL TAXONOMY)

Orden	Suborden	Grupo	Subgrupo
Entisol	Orthents	Torriorthents	Típicos
Aridisol		Fluvents	Típicos
		Orthids	Xerólicos
		Camborthids	Xerólicos
		Calcorthids	Xerólicos
		Paleorthids	Típicos
		Salorthids	Típicos
		Haplargids	Típicos
	Argids		

CAPÍTULO II

EL INVERNADERO

J. López-Gálvez y J. C. López-Hernández

1. Antecedentes

La técnica de protección o forzado de cultivos consigue modificar, total o parcialmente, las variables ambientales haciendo que las plantas se desarrollen en un medio relativamente más favorable que el existente al aire libre. Esta técnica empezó a practicarse desde muy antiguo. La posibilidad de realizar el cultivo mediante abrigos transparentes era conocida por los romanos, que observaron cómo «ellos admiten el sol y el día sin sol (luz)»¹. Los pepinos que el Emperador Tiberio necesitó comer diariamente por prescripción médica «se cultivaban en macetas apoyadas sobre ruedas, para que pudieran transportarse fácilmente al sol y en días invernales facilitar su retirada a abrigos transparentes»². El forzado de los cultivos tuvo sus críticas en esta época «¿No están, en contra de la Naturaleza, aquellos que desean una rosa en invierno, mediante vapor de agua caliente y una oportuna modificación del ambiente, al cultivar en periodo de invierno aquella flor de primavera?»³.

En el siglo XV, coincidiendo con el fervor económico y cultural en Europa, aparecen las «orangeries» francesas. En ellas cultivaban plantas provenientes de zonas de clima templado, en particular naranjas y limones, por sus propiedades medicinales. A partir del siglo XVIII, la nobleza y casas reinantes se interesaron por estas construcciones, utilizándolas para el cultivo de plantas exóticas recogidas en otras latitudes. El empleo generalizado del vidrio y su adaptación como material de cerramiento para invernadero permitió su construcción a mayor escala, sobre todo, por parte de viveristas y productores de planta ornamental. El exponente más importante de esta

¹ MARTIALIS, M. V., 93 (AD): *Epigramm*, Liber VIII, Ep. 14.

² PLINIO, S. G., 77 (AD): *Naturalis historia*, Liber XIX, 19, 4 y 23, 5.

³ SENECA, L. A., 63 (AD): *Epistula morales ad Lucilium*, Liber XIX-XX, Ep. 13.

técnica de cultivo se tiene en Holanda donde ya había 30 ha en 1904 y casi 7.000 ha en 1970⁴. Sin embargo, el alto coste de estos invernaderos, originado por la especial estructura para soportar el peso del vidrio y por el precio de éste, no ayudó a la rápida extensión de esta tecnología.

La introducción de materiales plásticos flexibles, a principios de la década de los 70, y su aplicación para cerramiento de invernadero permitió una concepción diferente del almacén estructural. La expansión de esta modalidad de cultivo fue lenta, en sus inicios, ya que los nuevos materiales presentaban los problemas derivados de una naciente industria.

Los principales defectos de los materiales plásticos eran⁵:

- Falta de uniformidad en el espesor de la película.
- Rápida degradación.
- Poca resistencia mecánica, con fácil rotura por el viento.
- Muy transparente a la radiación infrarroja de onda larga.

Los problemas enunciados constituían un freno al desarrollo de esta técnica de cultivo, a pesar del notable incremento que se conseguía en precocidad, calidad y cosecha total, comparado con el cultivo al aire libre. El potencial productivo de las plantas estaba limitado por las bajas temperaturas, debido a las fuertes inversiones térmicas casi todas las noches del año, llegando a producir daños por frío en las plantaciones. La crisis del petróleo, del año 1973, impuso mejorar los procesos productivos con el fin de ahorrar energía. Las investigaciones agrarias se encaminaron a disminuir la cantidad de energía gastada por unidad producida. La situación creada animó a la industria petroquímica a trabajar en el mejoramiento de materiales de cerramiento para invernadero. Fruto de todo lo anterior fue la consecución de plásticos que paliaban los defectos arriba enunciados⁶. Así se pusieron en el mercado materiales de mayor transmisividad a la radiación solar que, además, eran parcialmente termoisolantes a la radiación infrarroja de onda larga. Todo ello unido a la mejora de los sistemas de transformación, la mayor duración y el manejo más cuidadoso en la colocación, propició la rápida expansión de esta técnica, que se vio facilitada por la posibilidad de utilizar un almacén estructural de bajo coste.

A partir de ese momento, se puede decir que se constituyen tres líneas de aplicación de esta tecnología agraria, en función del grado de protección proporcionado a los cultivos, que son las siguientes:

⁴ GÓMEZ-LÓPEZ, J. D., (1993), *Cultivos de invernadero en la fachada sureste peninsular ante el ingreso en la C.E.* Madrid: Ministerio de Agricultura: Pesca y Alimentación, Secretaría General Técnica.

⁵ JORGE, G. y BRETONES, F. (1990), *Colaboración interdisciplinaria. Clave del éxito para el desarrollo de la plasticultura*, XI Congreso Internacional de Plásticos en Agricultura, Nueva Delhi, India, I.17-I.28.

⁶ CASTILLA, N. y F. BRETONES (1979), *Nuevo plástico térmico para invernadero*, Ed. Caja Rural Provincial de Almería, 32 pp.

a) Primera línea: la constituye el invernadero tradicional de estructura metálica y cubierta de material rígido. Se mejora el almacén estructural, utilizando acero inoxidable y aluminio anodizado en los herrajes para recibir el material de cerramiento (vidrio o placa). Incluso se controla el ambiente disponiendo de equipos de calefacción y de aportación de anhídrido carbónico y, además, se les dota de sistemas de ventilación y de iluminación artificial. El control se realiza mediante ordenador, permitiendo disponer de un medio de cultivo donde los parámetros ambientales pueden aproximarse a los óptimos requeridos por las plantas. Por lo general, este tipo de estructura se utiliza en zonas frías y también se construye para el cultivo de plantas de alto valor económico, para investigación o para jardines botánicos.

b) Segunda línea: en zonas de clima templado, comienza la construcción de invernaderos que utilizan para su cerramiento materiales flexibles, con estructuras más ligeras. La expansión de este tipo de construcción viene ayudada por la crisis energética del año 1973. Se crea así una línea de invernaderos que presentan, respecto a la anterior, mayores ventajas económicas, debido al menor peso y a la flexibilidad del material de cerramiento, lo que permite estructuras más baratas. En algunos casos, para mejorar el microclima, estos invernaderos se apoyan en sistemas de calefacción y de iluminación artificial.

c) Tercera línea: la tecnología se basa en la concepción de estructuras de bajo coste de inversión, realizadas artesanalmente para sostener los materiales de cerramiento. La función principal de estos invernaderos es actuar como cubierta que mantiene un entorno cerrado con un microclima parcialmente controlado en el que queda reducida la evapotranspiración del cultivo, se limitan los daños del viento y se mejora ligeramente el régimen térmico. Los invernaderos así contruidos se caracterizan por mejorar el microclima de forma pasiva. La forma, la orientación de la estructura y el material de cerramiento determinan, en gran medida, el microclima generado en su interior. Un ejemplo de esta tecnología tiene lugar en España, iniciándose en las Islas Canarias y pasando posteriormente a Almería.

2. Almacén estructural

La característica generalizada de las construcciones que hemos llamado de tercera línea es la de que su almacén estructural no se calcula, por lo que no son tenidas en cuenta la resistencia de los materiales, la distribución de las cargas, etc. Se construyen de forma completamente empírica, a base de prueba y error, mejorando sus características con el paso del tiempo.

Los materiales utilizados para su realización son muy diversos, predominando la madera, el alambre y, en determinados lugares como por ejemplo en Asia, la caña de bambú. En Almería, al iniciarse esta modalidad de cultivo, la madera que se utilizaba en la construcción de los invernaderos tenía un origen heterogéneo y se servía sin descortezar. Con el afianzamiento de la técnica los materiales se presentan más elaborados. Así se dio paso al empleo de madera tratada y descortezada, presentándose perfectamente cortada cuando se ofrece en forma de listones. A continuación vino el empleo de estructuras metálicas o de hormigón.

La estructura tipo *parral de Almería*, es la que ha tenido una mayor expansión. Se denomina así porque procede de la que sirve de soporte al cultivo de la uva de mesa. Está formada por una cuadrícula de alambre de 50 x 50 cm, colocada a unos 2 m de altura, que es soportada por postes de madera situados en el perímetro y en el interior de la parcela. Sobre este tejido se extienden, guían y atan los sarmientos de la parra, quedando los racimos colgados a la sombra del follaje y sin riesgo de rozamiento. La gran tradición en la construcción de parrales ha contribuido al amplio desarrollo que este tipo de invernaderos ha tenido en Almería. La transformación de la estructura del parral a la del invernadero se hizo mediante la colocación de una película de plástico entre dos mallas de alambre. Esta manera de construir el invernadero facilita su acomodación a la forma y dimensión de la parcela.

La mayoría de estos invernaderos se construían con la cubierta plana. Ello obligaba a perforar el material de cerramiento para dar salida al agua de lluvia, con el consiguiente perjuicio para las plantas. Inicialmente eran bajos, no superando los 2 m de altura. La introducción de material vegetal de crecimiento indeterminado obligó a hacerlos más altos. En la actualidad es muy frecuente observar invernaderos *parral* de 3 m de altura en los laterales, lo que permite tener tutores de más longitud y disponer de un cierto volumen de aire entre la parte más alta de las plantas y la cubierta del invernadero.

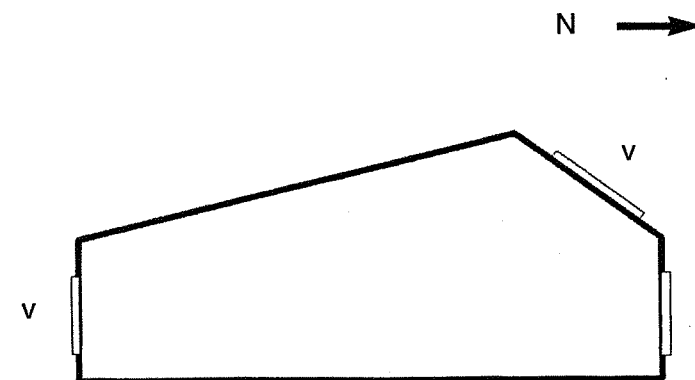
La forma de la cubierta ha evolucionado muy lentamente, realizándose una variante de dos aguas, orientada norte-sur o este-oeste, denominada de *raspa y amagado*. En ésta, sólo la cumbrera está soportada por pies derechos, en tanto que los puntos intermedios, coincidentes en la confluencia de las dos vertientes contiguas, se anclan al suelo mediante alambre trenzado, cable de acero o cabilla de hierro que trabaja como tensor que a la vez sirve de soporte a una canaleta que recoge parte del agua de lluvia.

El diseño y la orientación del invernadero juegan un importante papel en la captación de radiación. Trabajos realizados en Almería muestran como, en los meses de invierno y de primavera, estructuras con cubiertas asimétricas a dos aguas, orientadas este-oeste y con la mayor

vertiente al sur, la radiación incidente sobre las plantas es superior en comparación con las tradicionales⁷. Esta mejora en la transmisividad tiene consecuencias económicas importantes⁸. La construcción de invernaderos asimétricos exige conocer el ángulo de incidencia de los rayos solares en el solsticio de invierno que nos define la pendiente máxima de las dos vertientes. Así la vertiente que mira a la dirección del sol, a mediodía, debe ofrecer la mayor perpendicularidad a los rayos solares. La decisión sobre la pendiente mínima y máxima de esta cara debe venir precedida del correspondiente análisis técnico-económico. La pendiente de la vertiente opuesta, en invernaderos multicapilla o multitúnel, no debe superar el ángulo de incidencia de los rayos solares sobre plano horizontal para evitar proyección de sombra sobre el cultivo. Además, el armazón estructural debe concebirse de modo que los elementos estructurales reduzcan la mínima cantidad de radiación.

Figura II.1

PERFIL DE INVERNADERO ASIMÉTRICO (V VENTANAS)



⁷ CASTILLA, N. y J. LÓPEZ-GALVEZ (1994), «Vegetable crops responses in improved low-cost plastic greenhouses», *Journal of Horticultural Science*, 69(5): pp. 915-921.

⁸ LÓPEZ-GALVEZ, J., J. SÁNCHEZ-CARREÑO, J. M. NAREDO y N. CASTILLA (1993), «Análisis técnico-económico de estructuras alternativas al invernadero de cubierta plana parral-Almería», *INIA, Producción y protección vegetal*, vol. 8 (3), pp. 411-423.

El procedimiento constructivo empleado en el invernadero *parral* de Almería se acerca más a una tenso-estructura que a la estructura clásica de soporte-pilar y dintel. La tipología estructural de la técnica desarrollada en Almería ha llevado a un invernadero de gran sencillez y muy económico en sus comienzos. El empleo de materiales más caros, el incremento del coste de la mano de obra empleada en su construcción y las deficientes condiciones microclimáticas que genera hace que en la actualidad esta modalidad de invernadero esté perdiendo competitividad. Los principales problemas con los que se enfrenta esta estructura son: la falta de estanqueidad y la dificultad de automatización. El empleo de doble malla para sujetar el plástico de cerramiento con el consiguiente punteo, para evitar su rotura por fricción, hace que aun en las estructuras a dos aguas el agua de lluvia penetre en el invernadero provocando problemas sanitarios en el cultivo. Esta falta de estanqueidad provoca pérdidas de calor por convección lo que imposibilita el empleo de sistemas de calefacción con rendimientos aceptables. También dificulta la utilización de determinadas técnicas de cultivo como el control integrado de plagas y enfermedades. Estos invernaderos plantean problemas motivados por su limitación resistente, lo que conlleva restricciones en las dimensiones de los elementos estructurales, y la dificultad de incluir accesorios que permitan mejorar el microclima. Como ejemplo de esto último cabe señalar los graves inconvenientes que se tienen a la hora de colocar pantallas térmicas que mejoren la temperatura nocturna o canales de pluviales que permitan la completa recogida del agua de lluvia. Los sistemas de ventilación suelen ser manuales y rudimentarios. Aunque la utilización de ventanas cenitales se está extendiendo, como consecuencia del incremento del rendimiento que experimenta el cultivo, los trabajos desarrollados no han conseguido implantar un tipo determinado que se adecue a las condiciones del invernadero *parral*. Las ventanas cenitales son en su mayoría enrollables, siendo el sistema de apertura y cierre generalmente manual y en los contados casos que se hace automáticamente plantean problemas de rotura del plástico dado que éste no se puede sujetar con la malla. Los intentos realizados para eliminar las mallas de sujeción del plástico en estos invernaderos no han dado resultado.

El almacén estructural clásico de los invernaderos tipo *parral* de Almería está formado, en su perímetro, por un entramado de soportes-puntales de madera, que se apoyan sobre bloques de hormigón, unidos mediante alambres y anclados al suelo por medio de tensores o vientos que confiere estabilidad a la construcción e interiormente por puntales de madera que también se apoyan en bloques de hormigón. La evolución posterior ha consistido en sustituir la madera por elementos metálicos predominando en la actualidad el tubo galvanizado. El intento de cambio de las primitivas estructuras se ha realizado de forma artesanal, con un incremento notable de los costes de inversión debido a la escasa prefabricación de los

diferentes componentes (las uniones se realizan mediante soldaduras in situ) lo que encarece su montaje. Este paso ha sido positivo ya que se ha dotado a los invernaderos de mayor altura y de ventilación cenital, pero la estructura de cubierta ha permanecido con los problemas derivados de la sujeción del plástico que no se han resuelto. El intento de mejorar la prefabricación de los distintos componentes no ha conseguido abaratar el precio de la estructura.

Las líneas que anteceden muestran la necesidad de sustituir la estructura de cubierta del invernadero *parral*. El invernadero industrial alternativo al artesanal de Almería debe concebirse de manera que:

- a) Cumpla el proyecto de norma europeo para este tipo de construcciones, con adecuación a las condiciones climáticas de Almería (acción del viento y nula sobrecarga de nieve).
- b) Produzca la mínima cantidad de sombra en su interior y capte la máxima cantidad de radiación solar (cubierta asimétrica orientada este-oeste con la mayor vertiente expuesta al sur).
- c) Sea hermético, impidiendo la entrada de agua de lluvia y permitiendo, con eficacia, el control integrado de plagas y enfermedades (menor incidencia de productos fitosanitarios sobre consumidores y trabajadores).
- d) Incorpore la mínima cantidad de hierro (menor coste de inversión).

3. Material de cerramiento

La orientación y la forma de la estructura del invernadero, junto con el material de cerramiento, son los factores que más influyen en el microclima que genera. Del material de cerramiento debemos esperar que : a) durante su vida útil conserve sus características, b) transmita la máxima radiación solar y, transmita y emita la mínima radiación infrarroja de onda larga procedente, principalmente, del suelo, de la vegetación y de los elementos de la estructura del invernadero (ver efecto invernadero).

Para la elección de un material es preciso conocer sus propiedades:

- Físicas: resistencia a la tracción, alargamiento en el punto de rotura, fragilidad a bajas temperaturas, resistencia al impacto, resistencia al desgarro, conductividad térmica, etc.
- Químicas: estabilidad, aditivos, etc.
- Ópticas: transmisividad a la radiación solar e infrarroja, turbidez, color, brillo, etc.

Además, dos características deben considerarse:

- Transparencia o transmisividad. Da la relación entre la intensidad del flujo luminoso transmitido y el flujo incidente.

– Turbidez. Indica la capacidad de absorción parcial, por el material, de las radiaciones luminosas que les atraviesan provocando una disminución en la intensidad de las mismas. Ésta se expresa en tanto por ciento de luz difundida en un ángulo mayor de 8°.

La primera de las características está asociada al paso de luz, que es mayor cuanto más transparente sea el vidrio. La segunda está asociada con la difusión, contribuyendo a que su distribución sea más uniforme.

Dada la amplia gama de materiales existentes, los vamos a clasificar en dos grupos: rígidos y flexibles.

Materiales rígidos

Se utilizan fundamentalmente en los invernaderos definidos como de primera línea, aunque los podemos encontrar en los invernaderos de segunda línea que usan tanto material rígido (excepto vidrio) como material flexible.

Vidrio. El nombre inglés de invernadero, *glasshouse*, recuerda que, en su origen, estas construcciones tuvieron como cerramiento el vidrio. Éste fue el único material usado en los invernaderos hasta la obtención de materiales sintéticos. Para su utilización es preciso disponer de estructuras sólidas y muy estables, ya que cualquier movimiento o flexión por empuje eólico, sobrecarga de nieve, dilatación o cualquier otra causa podría romper el vidrio.

El material empleado para invernaderos suele tener un espesor variable entre 2 y 4 mm. La densidad es de 2.400 kg/m³, haciendo necesario disponer de una estructura resistente. Con los espesores mencionados se consigue un buen efecto invernadero, debido a la alta transmitancia a la radiación solar y la nula a la radiación infrarroja de onda larga. Los elementos de soporte del cerramiento pueden ocasionar grandes pérdidas en la radiación transmitida.

Metacrilato (Polimetacrilato de metilo PMM). Es un material ligero, con densidad de 1.180 kg/m³. Tiene buena resistencia mecánica y es bastante estable. Es conocido como vidrio acrílico o vidrio orgánico, ya que la transmisividad global a la radiación (83%) es comparable a la del cristal y, como el vidrio, es también bastante opaco a la IRL (radiación infrarroja de onda larga) y a la radiación UV (ultravioleta). Se presenta en doble pared con burbujas de aire incorporado y espesor de 8-16 mm. La transmisión de la luz varía con la forma de las celdillas.

Policarbonato (PC). Es también un material termoplástico, con buena resistencia al impacto y menos pesado que el PMM, pero su transmisividad a la radiación infrarroja de onda corta (IRC) es de un 7% a 14%

menor. Se presenta en forma de pared doble, incorporando burbujas de aire, con espesor de 4-16 mm. Al ser un material menos pesado que el cristal, la estructura que lo soporta puede ser más sencilla y ligera. La transmisividad a la radiación solar es muy similar al vidrio y al PMM.

Poliéster. Es un compuesto fabricado con poliésteres insaturados, termoeestables, reforzados con fibras minerales (normalmente fibra de vidrio) u orgánicas. Las placas de este material pueden ser: planas, onduladas o nervadas. La incorporación de fibra de vidrio, además de aumentar la resistencia mecánica contribuye a mejorar la difusión de la luz. Es algo menos transparente que el vidrio. Dada su inestabilidad frente a la radiación UV se recurre a adicionar absorbentes a este tipo de radiación o al recubrimiento de las placas con una película de polifluoruro de vinilo en la cara que quedará expuesta a la intemperie, con el fin de retardar su envejecimiento. Es un material bastante opaco a la radiación IRL.

Policloruro de vinilo (PVC). Esta resina se obtiene por polimerización, normalmente en suspensión, del monómero cloruro de vinilo. Es uno de los termoplásticos, junto con las poliolefinas, de mayor producción en el mundo. Empleado, fundamentalmente, en construcción (tuberías, perfiles de ventanas y suelos) y botellas (para agua y aceite). Cuando se emplea para cerramiento de invernaderos se presenta en placas lisas u onduladas, con espesores entre 1 y 1,5 mm. La densidad es de 1.400 kg/m³. Para mejorar su comportamiento al envejecimiento se añaden antioxidantes, estabilizantes y absorbentes de UV. Debido a su alto contenido en cloro, en torno al 55%, es muy opaco a la IRL.

Materiales flexibles⁹

Estos materiales son los utilizados por los invernaderos de tercera línea y es muy frecuente verlos en los de segunda línea. Tienen como características comunes la de ser termoplásticos y bajo peso, ésto último supone una gran ventaja, además de por las menores exigencias de la estructura de soporte, por su facilidad de manipulación y de transporte. Así un metro cuadrado de película de PE-LD de 0,1 mm de espesor pesa 92 g mientras que la misma superficie de vidrio de 2,7 mm de espesor pesa 6,5 kg.

Policloruro de vinilo (PVC). El PVC es un material rígido, que mediante la adición de plastificantes se consigue transformar en flexible. Las láminas o películas flexibles se fabrican por calandrado y no por extrusión soplado, como el polietileno (PE), lo que limita el ancho de la lámina

⁹ ROBLEDO, F. y L. MARTÍN (1981), *Aplicación de los plásticos en la agricultura*, Madrid: Mundi Prensa, 553 pp.

a 2 m, y mediante sucesivas soldaduras se llega hasta anchos de 8 m. Su densidad es de 1.250-1.500 kg/m³, siendo por tanto más pesado que el PE. Su resistencia al rasgado es muy baja, por lo que requiere de estructuras de soporte poco agresivas, que mantengan bien sujeta la película. Este problema se solventa, parcialmente, armando el material con malla de poliéster o de poliamida, embutida entre dos láminas. Para mejorar su comportamiento al envejecimiento se adicionan antioxidantes, estabilizantes y absorbentes de UV. Transmite la luz visible en porcentajes elevados, aunque con baja dispersión. Su alta electricidad estática junto a la migración de los plastificantes hace que el polvo se adhiera fácilmente en su superficie, restándole transparencia. El alto contenido en cloro le confiere un buen efecto barrera al IRL (transmisividad < 10-20%). El uso de este material para invernadero está extendido en Japón, debido más al enfoque que su industria petroquímica tuvo en sus inicios, que a sus características técnicas.

Copolímero de etileno y acetato de vinilo (EVA). El EVA es un copolímero de etileno y acetato de vinilo. La proporción usual de acetato de vinilo (AV), en películas agrícolas, oscila entre el 6 y el 18%. Determinadas características del EVA dependen del contenido en AV. Así, al aumentar su contenido en AV, incrementa su opacidad al IRL, pero disminuye su resistencia mecánica. También se puede mejorar el efecto termoaislante de estos materiales añadiendo aditivos especiales. Los problemas más importantes que presenta son: su plasticidad, ya que cuando se estira no se recupera, quedando flácido y la gran facilidad de fijación de polvo, disminuyendo la transmisión de radiación en más de un 15% (sobre todo en zonas con viento abundante y escasez de lluvias). Las películas de EVA de hasta un 6% en AV y espesor de 75-100 µm se pueden utilizar como doble techo en el interior de los invernaderos.

Polietileno (PE). El PE, junto con el polipropileno (PP) y el PVC son los termoplásticos de mayor producción y consumo. El PE se obtiene mediante la polimerización del etileno utilizándose en su fabricación varios procesos y sistemas catalíticos. La mayor parte del PE para cerramiento de invernaderos se fabrica por el proceso de alta presión y catálisis de radicales libres mediante peróxidos. Los factores que determinan sus propiedades son la estructura molecular y el tamaño de la molécula o peso molecular. La estructura condiciona la densidad, y el tamaño su facilidad de fluir (índice de fluidez). La densidad, el índice de fluidez y el proceso empleado en su fabricación condicionan las características de este material.

Los PE se clasifican atendiendo a su densidad en:

- baja densidad: < 930 kg/m³.
- media densidad: 930 - 940 kg/m³.
- alta densidad: > 940 kg/m³.

Para cerramiento de invernaderos, se utiliza sólo el de baja densidad (baja cristalinidad) y alto peso molecular (bajo índice de fluidez). Sus principales características son:

- Bajo precio.
- Gran flexibilidad.
- Anchos que, por extrusión, pueden llegar hasta 16 m.
- Posibilidad de aditivarse para mejorar sus propiedades.

Una de las características de los materiales de PE es que su alargamiento en el punto de rotura es cercano al 500%. Un material se puede considerar degradado y a punto de romperse cuando su alargamiento se ha reducido al 50% de su valor inicial. Pero el PE, al igual que todas las poliolefinas, se degrada con la radiación UV y el oxígeno. La exposición a la intemperie produce su rotura al perder las propiedades mecánicas. Este problema se corrige añadiéndole aditivos que actúan como:

- absorbentes de radiación UV (derivados del benzotriazole y benzofenona).
- secuestradores de radicales libres.
- desactivadores (sales orgánicas de níquel).
- estabilizadores (Hindered Amines Light Stabilizers = estabilizantes de luz amínicos con impedimento estérico).

Cuadro II.1

**CARACTERÍSTICAS DE LOS PE MÁS UTILIZADOS
PARA CERRAMIENTO DE INVERNADEROS**

Material	Espesor (µm)	Transmisividad en el visible (%)	Transmisividad en el infrarrojo (%)	Transmisión de calor W/(m ² °C)
PE normal	100	90	62	8
PE larga duración	200	90	65	9
PE: Termoaislantes Larga duración	200	83	13	6

Los filmes de PE *normal*, es decir sin tratar, tienen una vida útil corta, sobre todo en regiones con elevada radiación solar, debido a las altas temperaturas y a la radiación UV. La degradación se limita incorporando absorbentes de radiación UV, consiguiendo películas que duran 2 campañas y por ello son llamadas de *larga duración* (LD). El PE tiene buena transmisividad a la radiación solar pero escasa opacidad al IRL (superior al

70%), lo que provoca un deficiente efecto invernadero. Esto se solventa, en parte, con aditivos que absorben parcialmente esa radiación, clasificándose a este material como PE *termoaislante de larga duración*.

Multicapas. La coextrusión de varias películas de material permite combinar propiedades que no pueden ser reunidas en un único material (aunque en la práctica dichas propiedades no son tan independientes entre las capas). En el mercado los más empleados son los tricapas, aunque también existen los bicapas.

Cada capa debería cumplir las siguientes funciones:

- Capa externa: debe proporcionar resistencia a la degradación por UV, al rasgado, rigidez, transparencia y evitar la fijación de polvo.
- Capa intermedia: debe proporcionar elasticidad, efecto termoaislante y difusión de la luz.
- Capa interna: debe proporcionar el efecto termoaislante y el antigoteo.

El PE y EVA son los materiales más usados, presentando por separado los inconvenientes ya mencionados. La coextrusión de EVA, en medio de dos capas de PE, puede resolver esos problemas. Así, la película puede incorporar hasta un 28% AV limitando la transmisividad al IRL a valores inferiores al 10% y mejorando la transparencia a la radiación solar, con resistencia mecánica del material resultante mayor que la del PE o EVA por separado.

Mallas. El PE también se utiliza en forma de malla, realizando una protección intermedia entre el cultivo al aire libre y el de invernadero pasivo. Con su aplicación se consigue disminuir las oscilaciones térmicas y mantener baja la humedad relativa del aire. Las mallas se están extendiendo debido a los requerimientos especiales de algunos cultivos, en especial el tomate, que precisa una humedad relativa entre el 50 y 70% y de buena ventilación para favorecer la polinización. Su uso es frecuente en determinados lugares del territorio español, como las Islas Canarias y Murcia. El tipo más usado es la de monofilamento de PE, incolora o blanca, estabilizada frente a UV. Estas mallas tienen un paso de 50% de aire, comportándose como cortavientos. Un problema que presenta este material es su ensuciamiento por la incrustación de polvo, lo que conlleva la disminución de la luz en el interior del invernadero. Su principal ventaja es que las estructuras de soporte pueden ser más ligeras y, consecuentemente, más económicas.

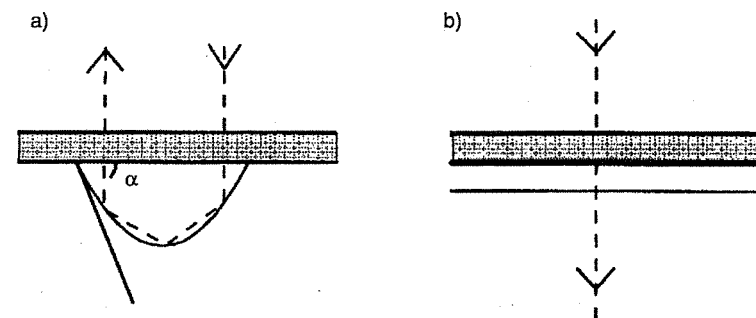
Otros materiales. En el mercado podemos encontrar materiales con características especiales, tales como: antigoteo (antivaho), antibotrytis, fotoselectivos, fotodegradables, etc. Normalmente, son compuestos de PE o EVA a los que se les han incorporado determinados aditivos para pro-

ducir tales efectos. Los materiales antigoteo están formulados con compuestos que modifican la tensión superficial, haciendo que la gota de agua en contacto con el plástico tenga un ángulo de unión más pequeño, con tendencia a ser plana. Esta propiedad hace que el agua que se condensa en la cara interna de la cubierta del invernadero tienda a hacerlo en forma de lámina. Ello facilita su eliminación, que será más fácil cuanto mayor sea la inclinación de la cubierta. Estos materiales pueden mejorar la productividad de los cultivos, ya que el menor goteo sobre las plantas hará que disminuya la incidencia de enfermedades producidas por hongos y además, aumentan la transmisividad, debido a que se evita el *efecto espejo* que crean las gotas por su forma semiesférica. El problema es que la duración del efecto antigoteo o antivaho, con las actuales formulaciones, está limitado en el tiempo¹⁰.

La mayoría de estos compuestos son más caros, debido a los aditivos y por ello se suelen incorporar en plásticos de *larga duración*.

Figura II.2

FORMA DE LA GOTA DE AGUA EN UNA PELÍCULA SIN A) Y CON B) ADITIVOS ANTIVAHOS, Y SU EFECTO SOBRE LA TRANSMISIVIDAD



¹⁰ LÓPEZ-HERNÁNDEZ, J. C., J. LÓPEZ-GÁLVEZ y ARROYO, F. (1993), *Comparación de dos materiales de cubierta para invernadero: uno de polietileno termoaislante y otro un copolímero EVA con efecto antigoteo*, Actas del II Congreso Ibérico de Ciencias Hortícolas, tomo 2: 1223-1227 pp.

4. Efecto invernadero

Consiste en la tendencia al calentamiento espontáneo de la atmósfera confinada en el invernadero, en relación con la exterior¹¹. Este efecto de variación de la temperatura tiene dos causas principales: una reducción del intercambio de aire con la atmósfera exterior y un balance positivo de radiación.

La presencia del material de cerramiento provoca una reducción de la corriente de aire y por consiguiente una disminución del transporte convectivo de calor.

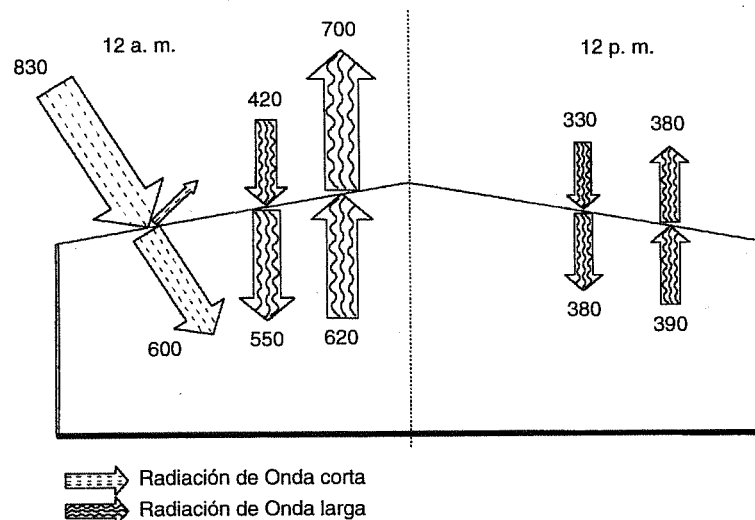
La figura II.3 muestra cómo durante el día las entradas de energía radiante al invernadero fueron superiores a las salidas, mientras que durante la noche éstas se igualaron.

Para un armazón estructural determinado, el efecto invernadero tenderá a ser mayor si el material de cerramiento transmite más radiación solar, de onda corta, y transmite menos la radiación infrarroja, de onda larga.

Figura II.3

BALANCE DE RADIACIÓN

Medidas efectuadas el día 2-4-94 en la estación experimental «Las Palmerillas». Las cifras se dan en W/m²



¹¹ P. BORDES (1992), «Les Plastiques et la maîtrise du climat en productions végétales: Bases générales», Chapitre 4, *Les plastiques en agriculture*, CIPA.

5. Procesos de transferencia de calor

El balance de energía calorífica de un invernadero pasivo viene determinado por los procesos que intervienen en la siguiente expresión¹²:

$$\Delta Q = Q(\text{rad.}) + Q(\text{conduc./conv.}) + Q(\text{conden./evapo.}) + Q(\text{ET})$$

La forma en que se produce dicha intervención es como sigue:

Q(radiación): de la radiación que incide durante el día sobre la cubierta del invernadero, una parte se pierde por reflexión y otra es absorbida por el material de cerramiento (las pérdidas de radiación por absorción dependen de cada material y de su formulación: en el caso del vidrio ésta es casi nula, con independencia del espesor, mientras el PVC absorbe hasta el 5% en espesores entre 0,05 y 0,25 mm y el PE absorbe entre el 5 y el 35% en espesores entre 0,03 y 0,5 mm). El resto pasa al interior, pero una fracción de la misma es reflejada por la vegetación y el suelo (albedo) y, en parte se pierde saliendo a la atmósfera exterior y en parte queda atrapada en el invernadero. La energía total ganada se destina al calentamiento de los elementos estructurales y de cerramiento, de la vegetación y del suelo, además de al sostenimiento de los procesos de evaporación y fotosíntesis.

Durante la noche el invernadero recibe y emite radiación infrarroja, de onda larga. La cantidad de radiación emitida a la atmósfera exterior depende, fundamentalmente, de la transmisividad del material de cerramiento a esa radiación de onda larga.

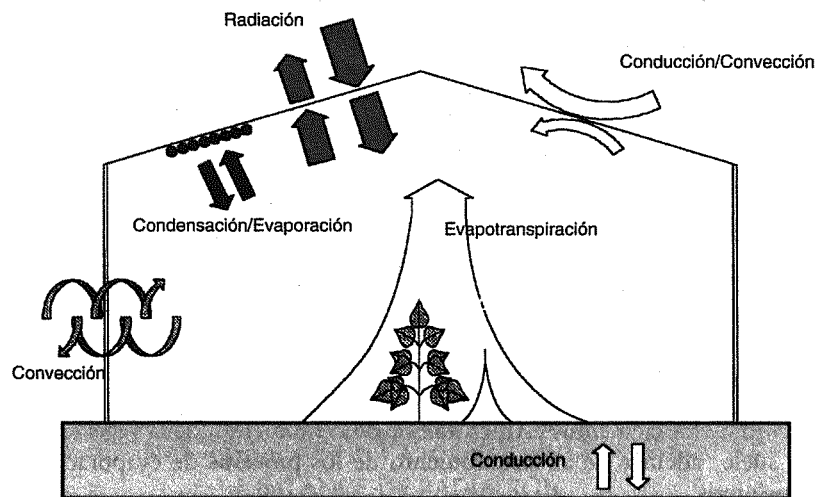
Q(conducción/convección): estos intercambios se producen en:

- Suelo:** se produce el fenómeno de conducción. A lo largo del día el suelo acumula energía que restituye en gran parte durante la noche.
- Paramentos y cubiertas exteriores:** los intercambios con el exterior son principalmente de índole convectiva. La transferencia por conducción es escasa vía material de cerramiento (vidrio o plástico) y puede ser importante vía elementos metálicos. Las pérdidas por convección aumentan con la velocidad del aire exterior y la consiguiente turbulencia del aire exterior e interior.
- Orificios del material de cerramiento:** éstos facilitan fugas por convección del aire cálido y húmedo del invernadero, para ser reemplazado por aire frío y seco del exterior.

¹² Adaptado de E. BERNINGER (1989), *Cultures florales de serre en zones méditerranéenne française: éléments climatiques et physiologiques*, Co-ed. INRA-PHM, 206 pp.

Figura II.4

TRANSFERENCIA DE CALOR EN INVERNADERO



En invernaderos escasamente herméticos, como son los del tipo parral de Almería, las pérdidas por fugas pueden ser importantes. En un invernadero cerrado varían según su forma. En todo caso aumentan con la velocidad del viento.

Q(condensación/evaporación): durante la noche el vapor de agua que se condensa sobre las paredes frías cede calor sensible al invernadero. Durante el día se produce el fenómeno contrario: el agua antes condensada se evapora absorbiendo calor sensible y se enfría el invernadero.

Q(evapotranspiración): la evaporación del agua desde el suelo más la transpiración de las plantas se realiza tomando energía.

6. El clima en un invernadero tipo parral

El crecimiento de las plantas está condicionado por el clima de su entorno y mediante el uso de invernaderos, podemos modificarlo y controlarlo. El invernadero proporciona un microclima diferente al del exterior, dependiendo entre otros factores de: el material de estructura, el material de cerramiento y la concepción del invernadero (la forma, la

dimensión y la orientación). La utilización de sistemas de calefacción, de ventilación, de iluminación, de aportación de dióxido de carbono etc. van a proporcionar un medio más adecuado para el desarrollo de los cultivos.

La función del invernadero *tipo parral de Almería* se limita a elevar la temperatura diurna mientras que la nocturna, por lo general, es inferior a la del aire libre¹³. La integral térmica se ve mejorada, respecto al exterior, por la acumulación de calor procedente de la radiación solar. Las amplias oscilaciones térmicas día/noche no favorecen el desarrollo de los cultivos. Por otra parte, desempeña un importante papel en la protección contra el viento, más eficaz que los cortavientos tradicionales, con la consiguiente incidencia favorable en la calidad de los frutos y en el ahorro de agua. Los valores de humedad relativa del aire en su interior son muy elevados facilitando el desarrollo de enfermedades criptogámicas. La escasa cantidad de radiación incidente, en los meses invernales, limita considerablemente el potencial productivo de los cultivos.

Este invernadero precisa de mejoras conducentes a elevar las bajas temperaturas de los meses invernales y a reducir las altas temperaturas de los meses estivales, así como, los altos valores de humedad relativa. Para ello se precisa disponer de un armazón estructural que mejore las condiciones de radiación mediante formas adecuadas de la cubierta y que permita la incorporación de cualquier técnica que produzca una mejora en el microclima (sistemas de calefacción, humidificación, mallas de sombreo, dobles cubiertas móviles, etc.) lo que obliga a que el invernadero sea hermético. La incorporación de adecuados sistemas de ventilación permitirían reducir los altos valores de humedad relativa, bajar la temperatura y mejorar las concentraciones de dióxido de carbono.

7. Apéndice

Los datos que se dan en este apéndice son de la campaña 93/94, proceden de dos estaciones agrometeorológicas automáticas, una exterior y otra dentro de invernadero existentes en la estación experimental *Las Palmerillas* (longitud 2°43'W, latitud 36°48'N y altitud 155 m). La estación exterior está ubicada en un entorno de barbecho y la interior en un entorno de césped en un invernadero pasivo, tipo parral de Almería, de las siguientes características:

- Estructura de tubo galvanizado y alambre.
- Cubierta a dos aguas con pendiente del 12,5%

¹³ LÓPEZ-GÁLVEZ, J., LÓPEZ-HERNÁNDEZ, J. C. y BRETONES, F. (1991), *Comportamiento climático del invernadero tipo Almería en los meses de invierno y de verano*, XII Congreso Internacional de Plásticos en Agricultura, Granada-España, B-154 a B-160.

- Eje longitudinal Este-Oeste.
- Ventanas laterales (N y S) de apertura y cierre manual.

El material de cerramiento es polietileno termoaislante, CP-124 en su primera campaña, de las siguientes características:

- Polietileno de baja densidad.
- Espesor 200 μm .
- Color natural.
- Duración 2 campañas.
- Transmisividad en el infrarrojo (7-14 μm): 12,8% .
- Transmisividad a la luz visible : 83,4%

Todos los valores, excepto los de evaporación (acumulados diariamente), son medias de valores recogidos cada dos segundos en una estación automática. Los distintos parámetros se han medido con los siguientes sensores:

- Temperatura del aire y humedad relativa: aspirómetro ventilado a una velocidad de 4,5 m/s, instalado a una altura de 1,5 m y sensores Pt-100.
- Radiación solar global: pirómetro con rango espectral 0,3 - 3 μm , situado a una altura de 1,5 m.
- Evaporación: tanque Clase-A, con tornillo de precisión.
- Viento: transmisor de viento combinado, instalado a 2 m de altura en la estación exterior y a 0,5 m en la de invernadero.

Todos los sensores están situados en la parte sur del invernadero.

7.1. Transmisividad de la radiación solar en diferentes puntos del invernadero

El gráfico II.1 muestra distintos valores de la transmisividad medida en diferentes puntos del invernadero, donde está situada la estación agrometeorológica. Las cotas de la figura, que representa al invernadero, están expresadas en metros.

7.2. Radiación

La radiación solar dentro de invernadero es menor que en el exterior, a consecuencia de la reflexión y absorción del material de cerramiento (ver gráfico II.2). La transmisividad varía a lo largo del año, debido al distinto ángulo de incidencia de los rayos solares y a la acumulación de polvo en la cubierta del invernadero, hecho éste particularmente importante, en áreas donde la pluviometría es escasa.

Gráfico II.1

TRANSMISIVIDAD EN DISTINTOS PUNTOS DEL INVERNADERO

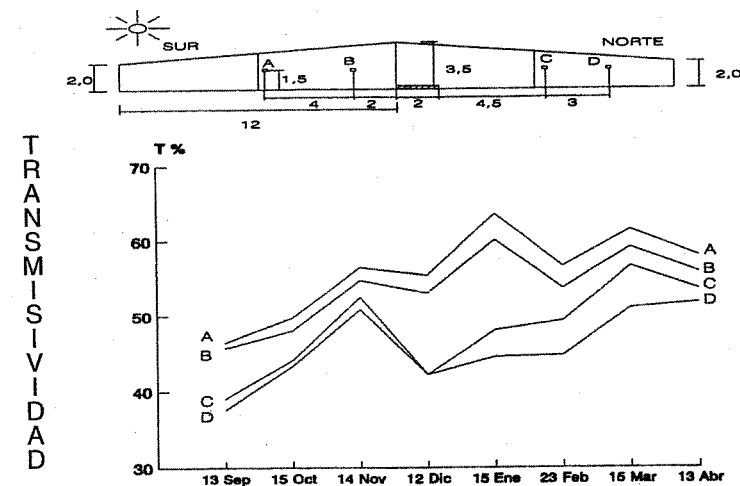
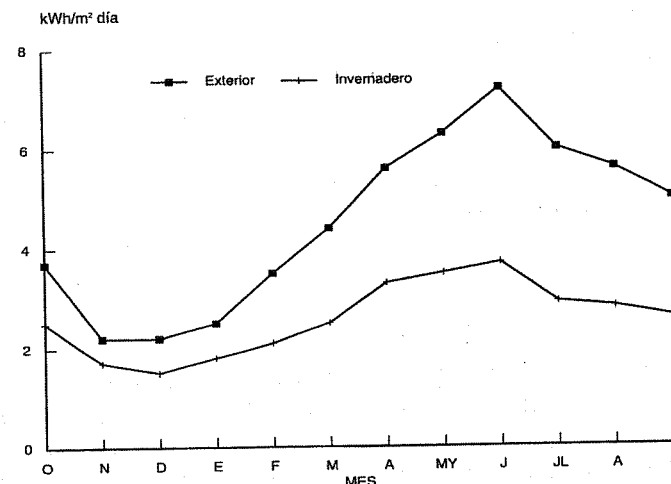


Gráfico II.2

MEDIA MENSUAL DE LA RADIACIÓN SOLAR



La transmisividad mínima fue del 54% para julio y la máxima del 68% para noviembre.

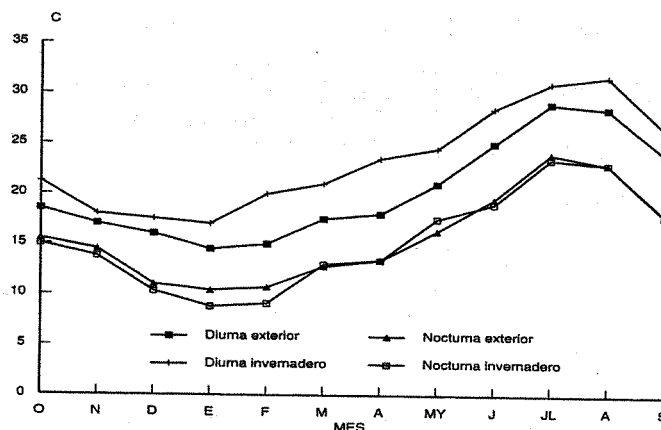
7.3. Temperatura

La temperatura del aire dentro del invernadero es superior a la exterior durante el día, siendo escaso el movimiento del aire en su interior. Esta baja renovación de aire es la responsable de la mayor temperatura diurna. La media anual diurna en invernadero fue de 23,5°C, frente a los 20°C en exterior. Los valores extremos en invernadero fueron de 43,6°C y 2,9°C y en exterior de 40,9°C y 3,7°C.

La ausencia de turbulencias dentro del invernadero puede hacer que la temperatura interior sea inferior a la exterior durante el período nocturno, provocando la *inversión térmica*. Así, el valor medio anual nocturno dentro del invernadero fue de 15,4°C frente a los 16,1°C del exterior. Con determinados materiales de cerramiento, la pérdida de energía por radiación infrarroja durante la noche se reduce, aumentando la temperatura en el interior.

Gráfico II.3

MEDIA MENSUAL DE LA TEMPERATURA DEL AIRE



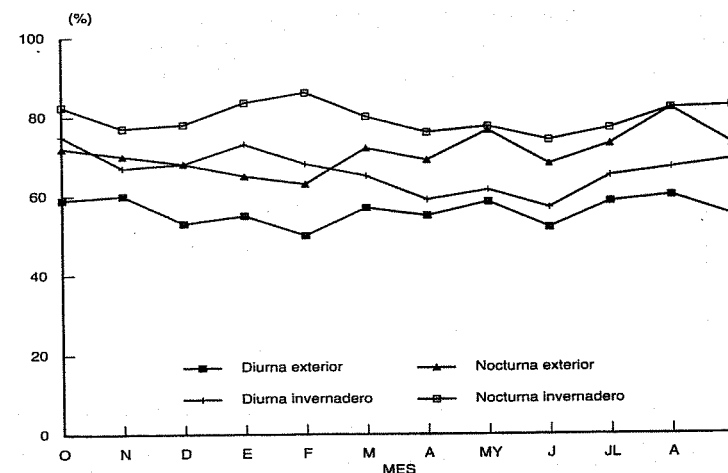
7.4. Humedad relativa del aire

La presión de saturación del vapor de agua depende de la temperatura del aire. Si el contenido de vapor de agua en el invernadero es constante, entonces la humedad relativa aumenta al bajar la temperatura y disminuye al subir la temperatura del aire. En invernadero, la media diurna anual fue del 66% frente al 56% del exterior y para el período nocturno del 81% en invernadero y del 70% en exterior. Los valores extremos dentro de invernadero fueron 100% y 14%, y en exterior de 100% y 11%.

En condiciones de humedad relativa elevada, se favorece la condensación en el interior del material de cerramiento, plantas y suelo, lo que facilita el desarrollo de enfermedades criptógamas.

Gráfico II.4

MEDIA MENSUAL DE LA HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE



7.5. Viento

Es uno de los principales factores a analizar del clima de estos invernaderos (clima pasivo), siendo importante su efecto sobre la temperatura, humedad relativa, concentración de CO₂ y evaporación, a pesar del escaso número de renovaciones de aire. La racha máxima fue, en la campaña 93/94, de 75,6 km/h en exterior y de 10,8 km/h en invernadero. El gráfico II.5 muestra la velocidad del aire dentro y fuera de invernadero.

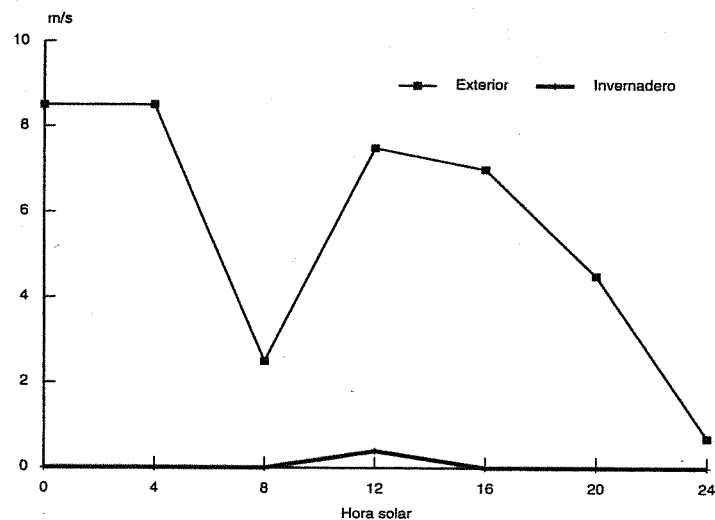
7.6. Evaporación

El tanque evaporimétrico clase A en entorno de césped es un método adecuado para la estimación de la ET₀¹⁴. La evaporación dentro de invernadero fue inferior a la exterior en un 51% (ver gráfico II.6).

¹⁴ Trabajos en realización en la estación experimental «Las Palmerillas». Programa de investigación dirigido a evaluar respuestas productivas al agua de los cultivos protegidos de mayor interés económico en el área mediterránea.

Gráfico II.5

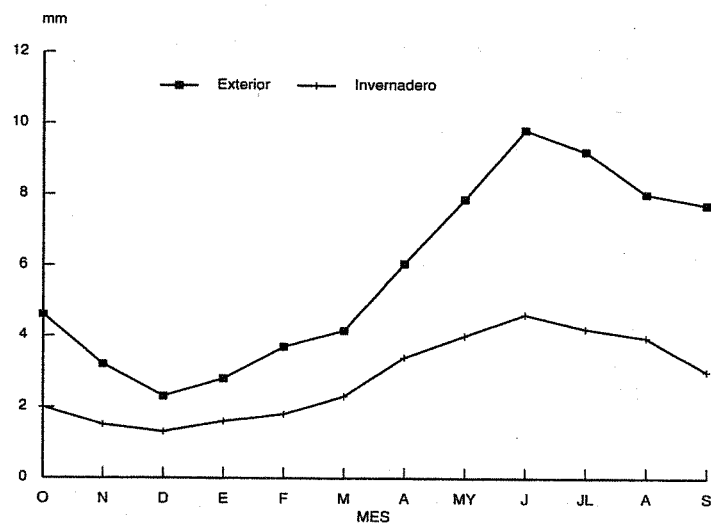
VELOCIDAD DEL AIRE A LO LARGO DEL DIA (10-1-94)



El contenido de CO₂ en la atmósfera está aumentando en los últimos

Gráfico II.6

MEDIA MENSUAL DE LA EVAPORACIÓN



7.7. Dióxido de carbono (CO₂)

El contenido de CO₂ en la atmósfera está aumentando en los últimos años y es constante en toda la tierra. Su valor actual es de unos 350 vpm que equivale a 0,7 g/m³ de aire seco.

En invernadero la concentración de CO₂ durante la noche es mayor que la existente en el exterior debido a la respiración de las plantas. Durante el día la alta intensidad de la fotosíntesis, en el interior del invernadero, hace disminuir la concentración de CO₂ pudiendo ser limitante para la producción de los cultivos¹⁵. En invernaderos tipo parral, con cultivo, la cantidad de CO₂ durante las horas diurnas alcanzan valores inferiores hasta en un 20% al existente en el aire libre. Es importante dotar al invernadero de un buen sistema de ventilación con el fin de alcanzar concentraciones de CO₂ próximas a las del exterior.

¹⁵ P. V. NELSON (1985), *Greenhouse operation and management*, New Jersey: Reston Books, 598 pp.
J. W. MASTALERZ (1977), *The greenhouse environment*, USA: Wiley, 629 pp.

CAPÍTULO III

EL CULTIVO

J. López-Gálvez y F. Bretones

En España, las especies cultivadas sobre enarenado y sustrato son, principalmente, hortalizas comestibles. La superficie ocupada por cada uno de los cultivos varía anualmente. En esta variabilidad influye tanto la oscilación de los precios de las cosechas, como los costes de producción. La disponibilidad de mano de obra también condiciona y orienta hacia determinados cultivos, ya que la mayoría de las empresas son familiares, con escasa participación de mano de obra asalariada. Tampoco es ajena a esta decisión los lugares donde se vende la cosecha, pues los canales de comercialización demandan especies, variedades y ciclos en función de los mercados a los que van dirigidas. En el cuadro III.1 del apéndice, se muestra la superficie ocupada por los cultivos fuera de estación durante 1991. Destaca el melón con una superficie superior a las 11.000 ha, seguido de la judía con cerca de 10.000 ha.

1. Material vegetal

Las especies de hortalizas comestibles cultivadas en el territorio español provenían, antes de los años 70, de variedades seleccionadas por los propios agricultores. Éstos escogían las mejores plantas de la parcela, y de ellas los mejores frutos, para obtener la simiente. Se producía, así, un material vegetal muy adaptado a las condiciones locales que, por contra, daba cosechas escasas y frutos heterogéneos. El cambio en las técnicas de cultivo, que supuso su intensificación, mejoraron los rendimientos de la cosecha a la vez que aumentaron los problemas sanitarios.

La mejora genética ha producido, en los últimos tiempos, semillas de mayor rendimiento, dotadas de resistencias a algunos patógenos. El material vegetal es, quizá, el factor de producción que más ha evolucionado. La introducción de las nuevas variedades fue relativamente lenta, debido a que los

productores de semillas no estaban en condiciones de garantizar su idoneidad. El paso de las variedades autóctonas a las comerciales, en una primera etapa, fue fruto de la presión comercial. Ello ocasionó fallos estrepitosos. El problema radicaba en que el nuevo material vegetal provenía de lugares donde las técnicas y ciclos de cultivo eran diferentes a los realizados en las zonas donde se introducían. En una segunda etapa fueron los agricultores y, posteriormente, los productores de semilla, los que realizaron la comprobación de los nuevos materiales para conocer su comportamiento en las condiciones locales, reduciéndose la problemática surgida inicialmente.

2. Semillero

Tradicionalmente el agricultor producía las plantas que necesitaba. Esta operación se realizaba en instalaciones muy rústicas, conocidas con el nombre de plantel, almáciga o almajara, donde la siembra se hacía en eras, aportándose estiércol muy descompuesto para mejorar su fertilidad. Éstas se cubrían con arena fina para evitar la formación de costra superficial, facilitar la nascencia y mantener el tempero, consiguiéndose un sustrato idóneo para un buen desarrollo del sistema radical de la plántula. La siembra se hacía a voleo o en líneas marcadas, previamente, con un surco muy superficial y se cubría con arena fina o tierra tamizada. A continuación se regaba con regadera o manguera para evitar el riesgo de arrastre de arena y semillas.

Llegado el momento del trasplante se procedía a su arranque, para proceder a su plantación en terreno definitivo, a raíz desnuda.

El paso siguiente fue la utilización de tacos o macetas de turba prensada, de tamaño de 4 x 4 ó 6 x 6 cm, para el semillado o repicado y la posterior crianza de la planta, haciendo el trasplante de ésta con el propio sustrato donde se había criado.

El nacimiento de las empresas dedicadas a la producción de plantas supuso un salto cualitativo de gran importancia. Ellas incorporaron nuevas técnicas de semillado, pregerminado e introdujeron equipos automatizados para el control del riego, de la fertilización, de la calefacción y de la sanidad. Se consiguió, de esta manera, producir plantas con garantías de homogeneidad, vigor y sanidad en un plazo de entrega prefijado. Además, hicieron posible la técnica del injerto de uso bastante generalizado en sandía.

La siembra del plantel se hace mediante equipos automáticos o semiautomáticos, en bandejas de poliestireno expandido que tienen entre 135 y 228 alveolos, con medidas de 4 x 4 y 3 x 3 cm respectivamente. Los alveolos tienen forma de pirámide cuadrangular invertida, que se rellenan de sustrato. Las mezclas de turba rubia y negra son las más usuales, a las que en ocasiones se le añade vermiculita. Cuando el sustrato del semillero se enriquece, se hace con fertilizantes de lenta liberación.

3. Preparación del suelo o sustrato

Dependiendo de que el cultivo se efectúe en enarenado, tierra o sustrato, el manejo y la preparación del soporte de cultivo será muy diferente.

Cuando la plantación se haga en suelo, enarenado o no, deberá procurarse la mayor sanidad, fertilidad y porosidad posible, proporcionando al sistema radical un medio idóneo para su desarrollo.

El conocimiento de los problemas del cultivo anterior, pueden ser un indicador sobre el estado de la sanidad del suelo, aconsejando qué desinfección debemos aplicar al mismo.

Antes de iniciar el nuevo cultivo, se debe dotar al suelo de la fertilidad necesaria, especialmente cuando se hayan observado síntomas carenciales en algún macro o microelemento, reponiendo estas deficiencias. Durante el transcurso del cultivo se harán las aportaciones necesarias de todos los nutrientes que la cosecha va a extraer.

En los suelos, tanto naturales como enarenados, se debe prestar atención no sólo a los elementos minerales, sino también al contenido en materia orgánica, eslabón preciso y precioso para la movilidad y absorción por la planta de todos los nutrientes.

El abandono de la técnica del «retranqueo» en algunos enarenados, reemplazándola por el aporte localizado de pequeñas cantidades de materia orgánica en franjas, sin una labor profunda de incorporación, reduce la presencia en el suelo de esta materia tan necesaria para soporte de la vida microbiana y suministradora de ácidos húmicos, fúlvicos, macroelementos y microelementos. Además, de la merma en fertilidad, esta práctica provoca un apelmazamiento del suelo que no permite el buen desarrollo radical, privando a la planta de explorar un mayor volumen de suelo de donde extraer más cantidad de nutrientes y agua.

El movimiento del agua en el suelo se ve dificultado por la compactación del mismo. Así en unas determinaciones realizadas en la estación experimental «Las Palmerillas», la velocidad de infiltración del agua en terreno retranqueado fue de 8,3 cm/hora mientras que en el suelo sin retranquear fue de 0,38 cm/hora¹.

La preparación de los sustratos, en su primera campaña de utilización, se limita a su instalación, acondicionamiento y, en su caso, la adecuación de su pH si es necesario modificar el de origen, especialmente las lanas de roca que deben acidificarse. En campañas posteriores, tanto los sustratos de la lana de roca como los de perlitas deben ser desinfectados mediante cualquier agroquímico o vapor de agua.

¹ CASTILLA, N. (1985), *Contribución al estudio de los cultivos enarenados en Almería: necesidades hídricas y extracción de nutrientes del cultivo de tomate de crecimiento indeterminado en abrigo de polietileno*, Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingeniero Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid, 195 pp.

4. Trasplante o siembra

La modalidad más usual de implantación de las solanáceas: tomate, pimiento y berenjena, es el trasplante de plantas producidas en semillero. En las cucurbitáceas se utiliza planta criada en semillero para el pepino, melón y sandía, sobre todo cuando se trata de sandía o melón injertado; aunque también es usual la siembra directa, con semilla pregerminada en estufa a 30°C: durante 24 horas para pepino y melón y 48 horas para la sandía. También se puede utilizar semilla pregerminada para la siembra del calabacín, en tanto que la judía se hace por siembra directa al suelo, en «golpes» de varias semillas. En el cuadro III.2 del apéndice, se muestran los ciclos de cultivo más usuales en los invernaderos de Almería y Murcia.

La siembra, en cultivo sin suelo (sustratos ó hidroponía) se realiza mediante trasplante, salvo en el caso de la judía, que se hace por siembra directa. La planta a trasplantar viene en tacos de turba o mezcla de turba y vermiculita, cuando el cultivo se va a hacer sobre perlita y en tacos de lana de roca cuando se va a cultivar sobre este sustrato. La densidad de plantación depende de factores tales como el material vegetal, el medio de cultivo, la forma de conducción y la poda. El cuadro III.3 del apéndice nos indica la densidad de plantación de algunas especies.

5. Técnicas de cultivo

La técnica de cultivo, el empleo de nuevos cultivares, la mejora de la calidad de la cosecha y el precio del material vegetal han determinado la optimización de la densidad de plantas por hectárea. La rectangularidad o el marco de plantación del cultivo vienen condicionados por los sistemas de poda y tutorado. Éstos deben buscar la mejora de la aireación y de la penetración de luz, parámetros que van a influir en la cantidad y calidad de la cosecha². La producción de los cultivos depende de tres procesos que se deben dar secuencialmente³:

1. Radiación incidente.
2. Radiación interceptada, que se transforma a través de la fotosíntesis en energía.

² LÓPEZ-GÁLVEZ, J. (1995), «Influencia de la técnica de producción en la cosecha». Curso Superior de Especialización, *Postcosecha y comercialización de los productos hortícolas: Técnicas y canales de distribución*, coeditan: Dirección General de Investigación Agraria de la Junta de Andalucía y FIAPA, pp. 31-41.

³ E. FERERES (1995), *Productividad de los sistemas de cultivo de invernadero*. Actas del I Simposium Iberoamericano sobre aplicación de los plásticos en las tecnologías agrarias, editores: J. LÓPEZ-GÁLVEZ, J. R. DÍAZ ÁLVAREZ, FIAPA-CEPLA, pp. 287-296.

3. Fracción de los productos fotosintetizados que se destinan a los órganos cosechables.

El planteamiento general para mejorar la productividad lleva a reducir el número de tallos por planta y a incrementar la relación hoja/fruto, lo que va a ocasionar una reducción del número de frutos por planta mejorando la calidad pero disminuyendo el rendimiento. La decisión sobre la poda y el tutorado a realizar en una planta debe ser el resultado del compromiso entre la cantidad y la calidad de la producción. Además de buscar la mayor cantidad de radiación interceptada por el cultivo, debido a su influencia directa en el rendimiento de la cosecha⁴.

Poda

La poda trata de formar una planta equilibrada y vigorosa. Es preciso en primer lugar formarla y después suprimir las ramas superfluas o mal situadas, mediante destallados, así como deshojados. La poda y conducción, en cada especie, debe buscar que los frutos no queden ocultos entre el follaje, pero sí protegidos por él de una fuerte insolación que podría dañarlos y a la vez debe mantenerlos suficientemente aireados y libres de condensaciones o humedades persistentes, para evitar problemas producidos por hongos.

En algunos cultivos, como el tomate, sobre todo en cultivares con ramilletes florales excesivamente grandes, es también aconsejable la poda parcial de estos ramos para agrupar más la producción y a la vez procurar calibres más homogéneos.

Tutorado

Esta técnica permite la conducción de la planta en vertical o ramificada de tal forma que las ramas dispongan de suficiente luz, ventilación y espacio, para el normal y sano desarrollo, tanto de los órganos aéreos como de los frutos.

En los cultivos al aire libre: tomate, pimiento y berenjena, el tutorado se hace a pie derecho, empleando rodrgones clavados a pie de cada planta o sujetando éstas mediante caballetes, empalizadas o soportes de cañas u otro material ligero. Para la judía de enrame se emplean cañas o varas clavadas a pie derecho o formando «chozas».

⁴ MONTEITH, J. L. (1977), «Climate and the efficiency of crop production in Britain», *Philosophical Transactions of the Royal Society*, B.281: pp. 277-284.

Bajo invernadero se tutoran, además de las anteriormente citadas, algunas especies, que al aire libre no se pueden o no compensa económicamente, como calabacín, melón, pepino y otros. La conducción de los cultivos es en vertical, para lo que se emplean hilos o mallas de material plástico, que cuelgan de un entramado o tejido de alambres o cables, situados a la mayor altura posible. Este soporte se sujeta a la estructura del invernadero, la cual debe estar calculada para absorber, soportar o descargar los esfuerzos y tensiones que va a recibir.

En algunas especies como el pimiento, por la fragilidad de su tronco-tallo, el tutorado vertical se complementa, a veces, con un «enfajado» de cinta de rafia plástica. Otras en cambio, por su porte bajo, no necesitan ningún tipo de manejo de planta, como el caso de la judía de crecimiento determinado.

La sandía siempre se ha cultivado en suelo, sin tutorar, en tanto que el melón comenzó a cultivarse en suelo, más tarde se tutoraba y últimamente, por razones de costo de mano de obra en la poda, deshojado, conducción de planta y buscando sobre todo precocidad, se ha vuelto a cultivar sin tutorar. El melón cuando se cultiva sobre sustrato siempre se tutora.

Injerto

La técnica del injerto (ver apartado 7.6 de este capítulo), en plantas herbáceas, conocida desde hace muchos años, está adquiriendo una gran difusión comercial. Aunque su empleo se fundamenta en la posibilidad de reducir los problemas causados por hongos de suelo (ver capítulo VI), su gran vigor está produciendo un incremento notable de la cosecha. Este último aspecto es importante ya que hay que adecuar la densidad, la rectangularidad y la programación de agua y nutrientes a las exigencias de la nueva plantación. Esta práctica donde más se está utilizando es en cucurbitáceas⁵. Así, para sandía es posible encontrar actualmente en el mercado, una serie de híbridos para utilizar como portainjertos resistentes a determinados hongos y nematodos. Entre los más utilizados se encuentran: RS-841, TZ-148, Shintosa, 91-53, Brava, Kamel y Macis. También se suele utilizar la calabaza de peregrino (*Lagenaria siceraria*) por su resistencia a *verticillium* y *fusarium*.

El cultivo de melón presenta una problemática distinta a la sandía, ya que aquí se trata de salvar fundamentalmente los problemas de acremonio-

sis. Los portainjertos disponibles son: Accent, Kamel, Shintosa, 91-53, *Benincara cerifera* y calabaza de peregrino. El injerto de melón no es muy utilizado por los problemas de afinidad que viene presentando.

En pepino, esta práctica es poco usada, cuando se realiza, se utiliza como portainjerto *cucurbita ficifolia*, que no es sensible a la fusariosis del pepino.

En solanáceas, los avances conseguidos por la genética en la obtención de cultivares resistentes o tolerantes a patógenos de suelo, han frenado la expansión del uso del injerto. Los portainjertos más utilizados para tomate son Hires y KNVF, que tienen características diferentes de vigor, precocidad y tamaño de fruto. Ambos son compatibles con cultivares de crecimiento indeterminado y manifiestan resistencias a TMV, nematodos, *Verticillium dahliae*, *Fusarium oxysporum* y *Pyrenochaeta*. La técnica del injerto apenas se ha utilizado en el pimiento y la berenjena, debido a los problemas de incompatibilidad con los diferentes portainjertos probados.

6. Factores climáticos

Temperatura, humedad relativa y luminosidad son parámetros climáticos que afectan a la fisiología de las plantas. Estos factores han de encontrarse a disposición del cultivo, junto con CO₂, agua y nutrientes, en las proporciones adecuadas para cada estado fenológico de la planta. Así, el material vegetal podrá desarrollar todo su potencial productivo. Un exceso de humedad relativa (>90%) o su defecto (<40%), unidas a temperaturas próximas a las mínimas y máximas biológicas de cada especie, induce a una falta o exceso de transpiración y defectos en la floración, fecundación y fructificación. En cuanto a la luminosidad, los conceptos que intervienen son la intensidad y la relación de duración día/noche. Las plantas que necesitan una relación día/noche mayor que uno son de «día largo», si necesitan una relación día/noche menor que uno son de «día corto» y si no les afecta la duración día/noche son indiferentes al fotoperiodo. En el cuadro III.4 del apéndice se resumen los requerimientos ambientales de algunas hortalizas.

⁵ A. M. GÓMEZ (1994), *El injerto como método de control de enfermedades del suelo en cucurbitáceas*, Monografías de la Sociedad Española de Fitopatología, n.º 1, editores: J. R. DÍAZ RUIZ y J. GARCÍA-JIMÉNEZ.

7. Apéndice

7.1. Datos estadísticos sobre cultivos hortícolas

Cuadro III.1

SUPERFICIE S (10³ ha), RENDIMIENTO R (10³ kg/ha) y PRODUCCIÓN P (10⁶ ptas.) DE LOS PRINCIPALES CULTIVOS PROTEGIDOS

Cultivo	Almería			Murcia			España		
	S	R	P	S	R	P	S	R	P
Sandía	4,3	43	5,8	—	—	0,02	9,9	36,3	11,3
Melón	4,8	27	6,0	0,4	45	0,4	11,3	23,6	12,2
Calabacín	2,2	52	5,3	—	—	0,2	2,6	52,4	6,2
Pepino	2,2	70	8,1	0,2	100	0,95	3,2	76,7	13,0
Tomate	2,7	67	7,9	1,7	93	6,7	9,6	73,7	30,8
Pimiento	5,7	41	17,0	1,2	78	7,0	8,6	48,0	30,3
Judía verde	5,9	8	8,6	—	—	0,18	10,0	11,7	21,0
Berenjena	0,8	51	1,9	—	—	0,03	1,2	49,3	2,9

Fuente: Anuario de Estadística Agrícola 1991. Madrid, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

7.2. Ciclos usuales de cultivo

Cuadro III.2

CICLOS USUALES DE CULTIVO BAJO INVERNADERO EN ALMERÍA Y MURCIA

Especies	Plantación		Duración	
	Murcia	Almería	Almería	Murcia
Pimiento corto	16/06 a 31/07	—	245-200	—
Pimiento largo	15/07 a 31/08	15/11 a 31/12	300-270	300-270
Tomate	01/08 a 15/10	15/08 a 15/11	300-225	190-240
Melón	15/01 a 15/02	10/02 a 15/07	165-150	120-80
Pepino holandés	01/08 a 15/10	—	210-140	—

Fuente: Estación experimental Las Palmerillas.

7.3. Densidad de plantación

Cuadro III.3

DENSIDAD USUAL DE PLANTACIÓN EN CULTIVOS BAJO INVERNADERO (10³ PLANTAS/ha)

Cultivos	Plantas/ha
Pimiento corto	20
Pimiento largo	20
Pepino holandés	15
Pepino corto	15
Tomate (poda a 1 tallo)	15
Tomate (poda a 2 tallos)	10
Sandía	5
Sandía injertada	3
Melón en suelo	15
Melón tutorado	10
Calabacín	5
Berenjena	10
Judía enrame	40 (1)
Judía mata baja	100 (2)

(1) Marco de plantación 1 m x 0,5 m con siembra en golpes y 3 ó 4 plantas /golpe.

(2) El cultivo se asocia con el final de la plantación de otoño intercalándose con la de primavera.

7.4. Requerimientos en temperatura, humedad relativa y luz de algunas especies

Cuadro III.4

REQUERIMIENTOS DE; TEMPERATURA (°C), HUMEDAD RELATIVA (%), LUZ (10³ LUX) Y FOTO PERÍODO (F)

Especie	Temperatura biológica		Temperatura óptima		Hum. relativa	Luz	
	Mínima	Máxima	Noche	Día		lux	F
Tomate	08-10	26-30	13-16	22-26	55-60	10-40	D.I.
Pepino	10-13	28-32	18-20	24-28	70-90	15-40	D.L.
Melón	12-14	30-34	18-21	24-30	60-80	—	D.L.
Pimiento	10-12	28-32	16-18	22-28	65-70	—	D.L.
Berenjena	09-10	30-32	15-18	22-26	65-70	—	D.L.
Judía verde	08-10	28-35	16-18	21-28	60-75	—	D.I.
Calabacín	08-10	30-34	15-18	24-30	65-80	—	D.I.
Sandía	10-12	30-35	18-20	24-30	65-75	—	D.I.

D.L.: Día Largo. D.I.: Día Indiferente.

7.5. Poda de los principales cultivos en invernadero

A continuación se describe la forma usual de poda y conducción de los cultivos.

Pimiento

La planta se poda a 2 ó 3 tallos en función de la densidad de plantación, con el fin de tener 6 tallos por metro cuadrado. Los tallos secundarios se quitan o se pinzan dejándoles de 1 a 3 hojas. El tutorado se realiza mediante cinta que baja del invernadero y sujeta a cada tallo o bien colocadas a ambos lados de la línea de cultivo a diferentes alturas.

Tomate de crecimiento indeterminado

La planta se deja sólo con el tallo principal, eliminando las brotaciones secundarias, pinzándose el mismo al final del cultivo. También podemos encontrar la poda a dos tallos.

Figura III.1

CONDUCCIÓN DEL PIMIENTO

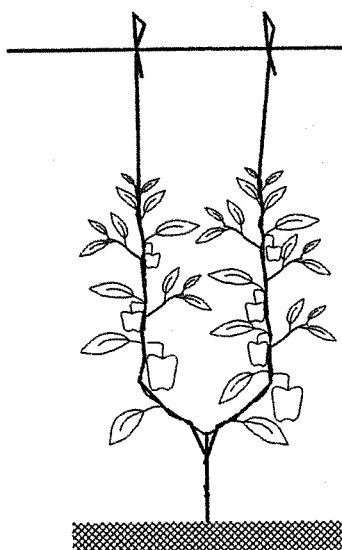
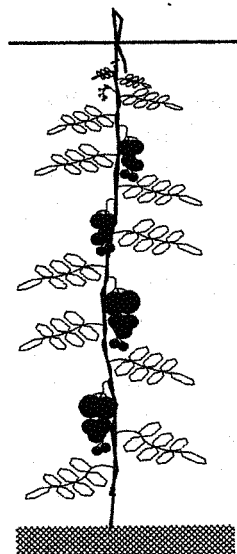


Figura III.2

CONDUCCIÓN DEL TOMATE



Pepino

Pepino tipo holandés o largo.

La planta se deja con el tallo principal, eliminándose los frutos de los primeros 50 cm y los tallos secundarios, hasta llegar al emparrillado, que sujeta los hilos sobre los que se tutora el cultivo. A partir de este punto se conduce hasta el siguiente elemento del emparrillado, permitiendo que ramifique con 2 a 4 tallos secundarios que se despuntan dejando en cada uno de 4 a 2 frutos.

Pepino tipo corto y tipo francés.

La planta se deja con el tallo principal eliminándose los secundarios hasta los primeros 50 cm. A partir de aquí éstos se dejan despuntándolos con 2 ó 3 hojas por tallo.

Figura III.3

CONDUCCIÓN
DEL PEPINO HOLANDÉS

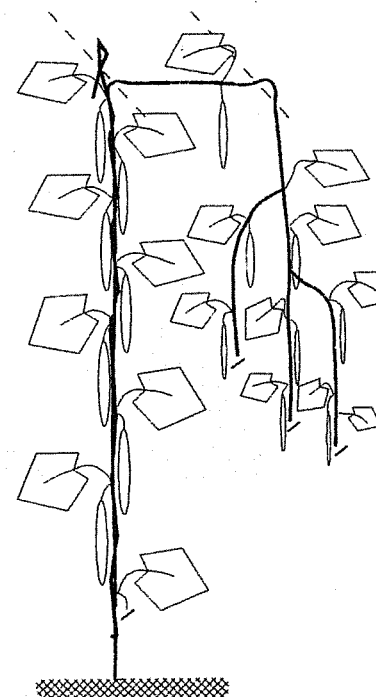


Figura III.4

CONDUCCIÓN
DEL PEPINO COTO



Melón tutorado.

La poda se realiza despuntando el tallo principal dejando 2 tallos secundarios. Los tallos terciarios, portadores de los frutos, se pinzan dejándoles dos hojas.

Melón sin tutorar.

La poda se realiza despuntando el tallo principal, dejando 2 ó 3 tallos secundarios. Éstos se despuntan dejando de 5 a 8 hojas. Los tallos terciarios de donde salen los frutos se pinzan utilizando, normalmente, para esta operación un latiguillo de alambre.

Figura III.5

CONDUCCIÓN DEL MELÓN TUTORADO

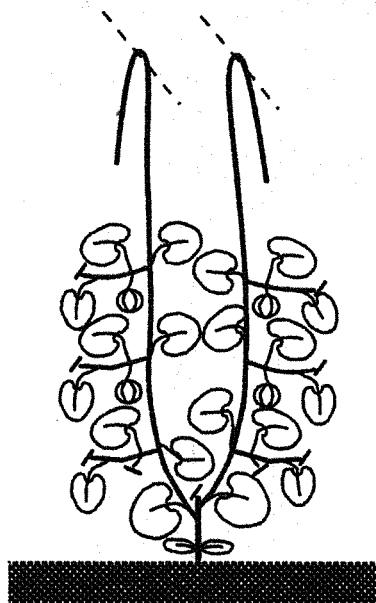
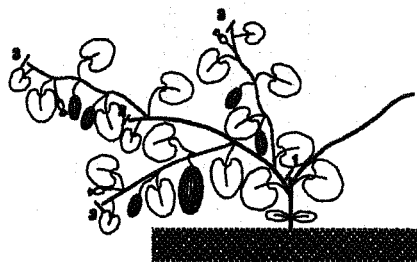


Figura III.6

CONDUCCIÓN DEL MELÓN SIN TUTORAR

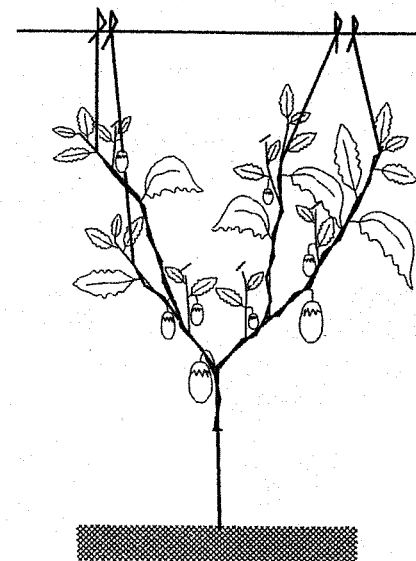


Berenjena

La poda consiste en dejar de 2 a 4 tallos por planta. Cuando se dejan 2 ó 3 tallos, a los tallos que salen de éstos se les dejan dos hojas y se pinzan. Cuando se dejan 4 tallos, o bien se realiza la operación anterior, o se dejan sin limpiar, con lo que la planta acaba con 8 ó 10 tallos.

Figura III.7

CONDUCCIÓN DE LA BERENJENA



7.6. Técnicas de realización del injerto

Para la realización del injerto se suelen emplear dos técnicas: injerto de aproximación e injerto de púa en hendidura, también llamado de cuña.

Injerto de aproximación

Se utiliza en sandía y algo en melón.

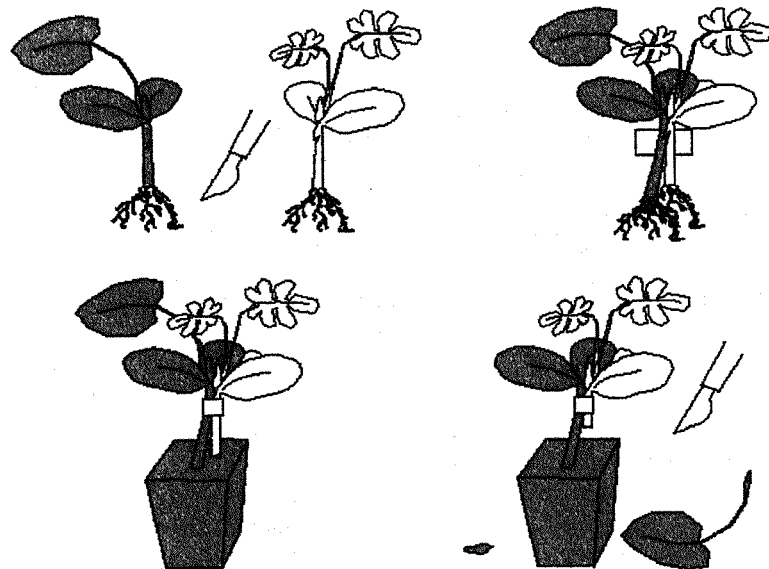
Para que la operación de injertar tenga éxito, es importante que en el momento de su realización tanto el patrón (calabaza) como la variedad tengan el desarrollo adecuado. En la variedad este estado se da cuando la

primera hoja verdadera está algo desarrollada y la siguiente lo inicia. El patrón se encontrará en un similar estado de desarrollo. Como norma general cuanto más pequeñas estén las plantas y cuanto más arriba, en el tronco de la calabaza, se haga el injerto, mejor. Para conseguir ese sincronismo entre el patrón y la variedad, se hará la siembra de éstos con el desfase necesario. El tiempo para alcanzar el desarrollo requerido va a depender de las condiciones ambientales, que en el caso de la sandía es mayor en la variedad. En condiciones de invernadero, el período de tiempo que transcurre hasta obtener plantas para realizar el injerto, oscila entre 2 ó 3 semanas para la variedad y de una a dos semanas para el patrón.

El proceso seguido para hacer el injerto de aproximación se puede ver en la figura III.8. Cogemos las plantas de patrón y de variedad de sus bandejas, sacudiendo los cepellones. En los tallos se hacen las incisiones, lo más próximas a los cotiledones, en sentido descendente en el patrón y ascendente en la variedad. A continuación, se introduce la variedad en el patrón y se fija la unión con una cinta. Las plantas, así unidas, se trasplantan. El patrón se despunta a la semana. Transcurridos unos diez días de esta operación se corta el pie de la variedad quedando las plantas, a los pocos días, dispuestas para ser trasplantadas al terreno de cultivo.

Figura III.8

INJERTO DE APROXIMACIÓN EN SANDÍA



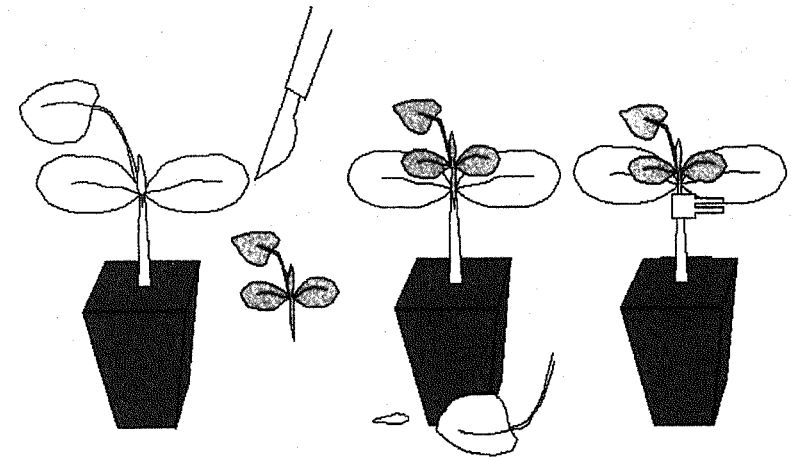
Injerto de púa en hendidura

Este tipo de injerto se emplea en cucurbitáceas y solanáceas.

El proceso seguido para su realización, en caso de sandía, se puede ver en la figura III.9. Para su realización hay que tener plantas, (patrón y variedad) con un estado de desarrollo adecuado (ver injerto de aproximación). La operación se inicia cortando la parte terminal del patrón, por encima de los cotiledones. A continuación, se hace una incisión de 1,5 cm en su tallo próximo a los cotiledones, donde se alojará la variedad. Se corta la variedad, por debajo de los cotiledones, realizando una cuña en el punto de corte, y se introduce en la hendidura hecha anteriormente en el patrón. La fijación de la variedad se realiza, usualmente con una pinza. Después de un período de consolidación, las plantas quedan dispuestas para ser trasplantadas.

Figura III.9

INJERTO DE PÚA EN HENDIDURA EN SANDÍA



En tomate se hace una variante de injerto, que no llega a ser una púa en hendidura (figura III.10). En el momento de hacer el injerto el patrón tiene una o dos hojas verdaderas, con un tallo de unos 2 ó 3 cm. Esto ocurre aproximadamente pasadas tres semanas desde su siembra. La variedad se siembra de una semana a diez días después que el patrón, para que en el momento del injerto tenga una o dos hojas verdaderas, como el patrón, es decir, las dos plantas deben tener un estado de desarrollo similar.

El injerto se realiza cortando el patrón transversalmente, por encima o por debajo de los cotiledones, en función del procedimiento de la forma de sujeción: pinza o canutillo de silicona. La variedad se corta transversalmente y al igual que el patrón, éste se realiza por encima o por debajo de los cotiledones. A continuación patrón y variedad se unen mediante uno de los dos procedimientos indicados.

Figura III.10

INJERTO DE PÚA EN HENDIDURA EN TOMATE



CAPÍTULO IV

EL RIEGO¹

J. López-Gálvez, J. Martínez y M.^a D. Fernández

La técnica del riego intenta mejorar la productividad de los cultivos. Para conseguirlo debe suministrar el agua que precisan las plantas, con el fin de obtener la producción cosechable óptima. Además, no debe ser agresivo con el suelo, por lo que tiene que evitar la erosión por arrastre, garantizar el adecuado balance salino y mantener la fertilidad.

1. Sistemas de riego por goteo

La mejora que supone la utilización de los sistemas de riego por goteo explica su implantación generalizada en los cultivos protegidos sobre enarenado y sustratos.

Estos sistemas de riego requieren para su funcionamiento el suministro de agua a presión, con valores comprendidos entre 50 y 200 kPa. Como consecuencia, cuando el agricultor no dispone de un servicio de agua a la demanda y con suficiente presión, se ve obligado a construir su propio embalse de regulación, así como una instalación de bombeo.

Los elementos esenciales en una instalación de riego por goteo son:

a) Equipo de filtración.

El equipo de filtración es el encargado de retener las partículas transportadas en suspensión por el agua de riego, que pueden originar el tapo-

¹ Referencias relacionadas con este capítulo se pueden encontrar en:

LOSADA, A. (1987), *El riego: Fundamentos hidráulicos*, Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 431 pp.

LOSADA, A. (1992), *Riegos: Fundamentos hidrológicos/métodos de aplicación*, ETSI Agrónomos, Madrid, 152 pp.

LOSADA, A., L. JUANA y J. MARTÍNEZ (1995), «Distribución racional del agua con sistemas de riego por goteo en invernadero», *Cuadernos de divulgación. Serie: Monografías sobre proyectos*, n.º 12, FIAPA-IFA.

namiento de los goteros, con el consiguiente perjuicio para el cultivo. Existen múltiples dispositivos para realizar esta operación: hidrociclones, filtros de arena, coladores de malla, coladores de anillas, etc, que de forma aislada o conjunta constituyen el equipo de filtración.

Entre las operaciones de mantenimiento de un sistema de riego por goteo destaca la limpieza periódica de los diferentes dispositivos de filtración. A tal efecto, conviene instalar dos manómetros, uno antes y otro después del equipo de filtración, para conocer el estado del mismo, y al alcanzar una pérdida de presión prefijada, efectuar la limpieza correspondiente.

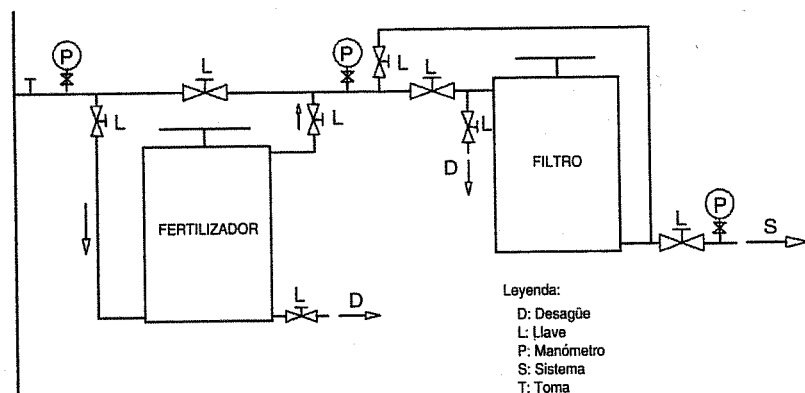
b) Equipo de fertilización.

Una de las grandes ventajas de los sistemas de riego por goteo es que permiten incorporar el abono con el agua de riego (fertilización o fertirriego). Esta operación se puede llevar a cabo con diferentes equipos, destacando, en orden de complejidad creciente: tanques de fertilización, inyector venturi y bombas dosificadoras.

El equipo de fertilización, junto con el equipo de filtración y, en ocasiones, con la instalación de bombeo, forman lo que se conoce con el nombre de cabeza del sistema de riego. A título de ejemplo, la figura IV.1 muestra el esquema de la cabeza de riego:

Figura IV.1

ESQUEMA DE LA CABEZA DEL SISTEMA DE RIEGO



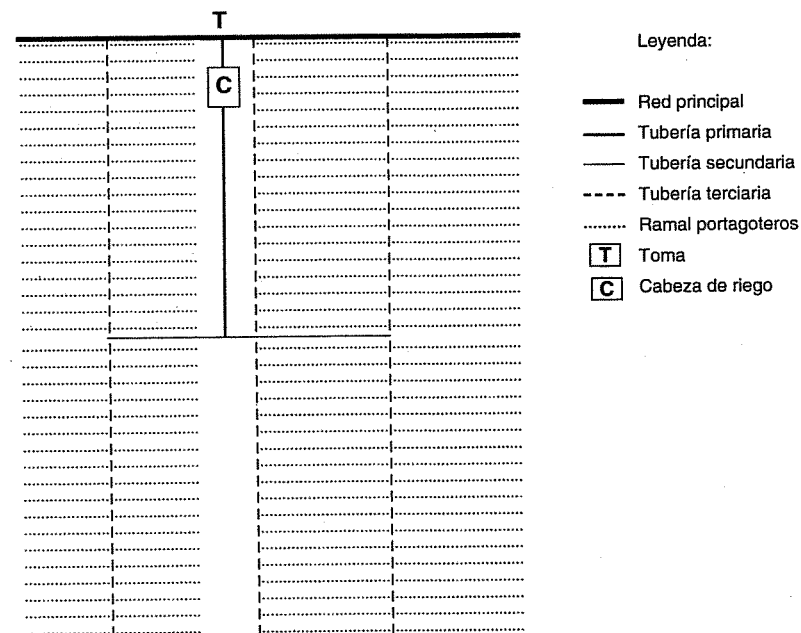
c) Red de distribución.

En general, el sistema de distribución consiste en una red ramificada de tuberías de polietileno de baja densidad. El agua, sola o mezclada con los nutrientes, se distribuye a los subsectores o unidades de riego a través de una o varias tuberías principales y secundarias. Los diámetros más frecuentes de estas tuberías son 90, 75, 63 y 50 mm.

La unidad de riego presenta en su entrada una llave de paso y, generalmente, un manómetro. En ocasiones, se coloca también un regulador de presión, con el fin de asegurar un caudal de riego constante. En esencia, está formada por una tubería terciaria de la que se derivan los ramales portagoteros. Los diámetros usuales en la tubería terciaria son 50, 40, y 32 mm, y en los ramales portagoteros 12 y 16 mm. Dichos ramales, en cultivos en invernadero, suelen ser bastante cortos (inferiores a 25 m) y con separación entre 1 y 2 m. La figura IV.2 muestra el esquema de una red de distribución:

Figura IV.2

ESQUEMA DE UN SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO



d) Goteros.

Son los elementos básicos del sistema. Su función es aportar al cultivo el agua, los nutrientes y algunos productos fitosanitarios. En su interior presenta un recorrido largo y tortuoso donde se disipa la energía del agua, que descarga en forma de gotas. El caudal Q que emite cada gotero suele ser pequeño (entre 2 y 8 L/h) y es función de la presión del agua p en el punto de inserción con el sistema. La relación entre ambas variables viene definida por la fórmula de gasto del gotero, que es del tipo:

$$Q = k p^x \quad (1)$$

donde k es el coeficiente del gotero que depende de las unidades empleadas y x es el exponente hidráulico, cuyo valor, que depende del régimen de circulación del agua en su interior, varía entre cero y uno (ver apéndice 4.1).

En la práctica, el caudal real de un gotero rara vez se ajusta con precisión a su fórmula de gasto, ya que existen diversos factores que inducen variaciones en el mismo. Entre éstos pueden citarse la falta de uniformidad en el proceso de fabricación y el taponamiento con el uso.

El mercado ofrece una extensa gama de modelos y tipos de goteros. De entre ellos los más empleados, en invernadero cuando se cultiva en suelo o en enarenado, son los interlínea tipo laberinto. En cambio, cuando se dispone la plantación sobre un sustrato se utilizan goteros derivados provistos de microtubo y de pinza que facilitan la descarga al interior del recipiente en la proximidad de la planta.

2. Aplicación del riego con sistemas de goteo

El resultado del riego, en sistemas de goteo, depende de su diseño y de su manejo, factores que determinarán el agua total aportada en cada operación.

El diseño cuantificará la variación máxima de presión admisible en cada unidad de riego, dependiendo del tipo de gotero elegido. A esta variable se une el coeficiente de variación de fabricación del gotero y el grado de obturación producido por el uso, resultando que, en la práctica, cada gotero aporte una cantidad de agua diferente.

La uniformidad en la distribución hídrica debe ser el fin principal de un sistema de riego, reduciendo las inevitables pérdidas y la superficie insuficientemente regada, que condiciona la producción final. El coeficiente de uniformidad de Christiansen es un buen índice de dicha magnitud. Su valor viene dado por la expresión:

$$CU = 100 \left[1 - \frac{|\Delta Q|}{Q} \right] \quad (2)$$

donde $\bar{Q}$ es el gasto medio de los goteros y $|\Delta Q|$ es la desviación media de los gastos con respecto al gasto medio. A cada presión en cabeza de la unidad le corresponde un valor de CU. Un sistema de riego por goteo se considera adecuado cuando el valor del coeficiente de uniformidad es elevado, con valores superiores al 90%.

Sin embargo, un sistema correctamente diseñado puede ofrecer malos resultados de riego, ya que también intervienen las variables de operación elegidas por el regante. Estas últimas son la presión en cabeza y el tiempo de riego. Cada presión de funcionamiento en cabeza de la unidad determina una distribución de caudales. El tiempo de aplicación determina la cantidad de agua aportada.

Las necesidades hídricas de los cultivos recomiendan una aportación V_r por gotero y por riego. En la práctica, dicho objetivo es difícilmente alcanzable. Las diferencias de presión dentro del sistema de riego, la variación entre unidades de fábrica y el grado de obturación de los goteros son tres razones por las que la distribución de gastos no es uniforme.

La figura IV.3 representa las diferentes aportaciones V_i de los n goteros de un sistema de riego, ordenadas en orden decreciente. Dicha gráfica determina la superficie f suficientemente regada $V_i > V_r$ y la fracción restante $1-f$ donde el riego es deficitario $V_i < V_r$. En un caso se produce un exceso de aportación, considerado como pérdida V_p , suma del excedente $(V_i - V_r)$ de cada gotero, mientras que en el otro se da un déficit hídrico V_d , suma de las menores aportaciones $(V_r - V_i)$ de cada gotero.

También se determina el volumen medio aportado por cada gotero V_b , así como el volumen de agua útil V_n utilizado por el cultivo para evapotranspiración.

$$V_b = \frac{\sum V_i}{n} \quad (3)$$

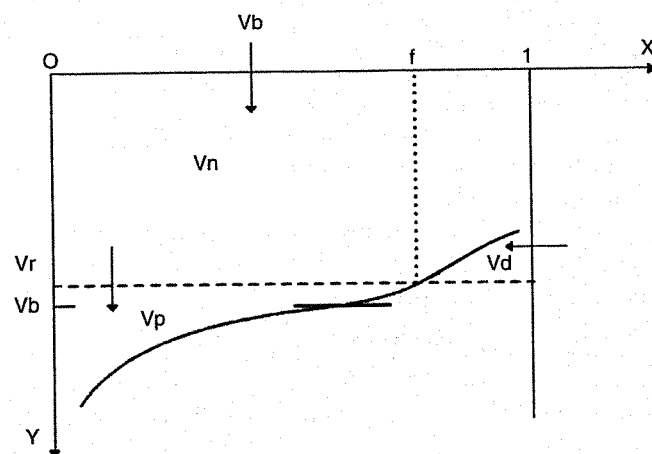
Para valorar la idoneidad de un riego, además de la uniformidad de distribución, hay que tener en cuenta otros índices, como son: el rendimiento de aplicación del agua R_a (relación entre el agua útil para el cultivo y la cantidad total aportada) y el coeficiente de déficit C_d (relación entre el volumen de agua no aplicado, pero requerido, y el volumen total requerido). El valor de estos índices depende, principalmente, del tiempo de aplicación del riego estando definidos por las expresiones siguientes:

$$R_a = \frac{V_n}{V_b} \quad (4)$$

$$C_d = \frac{V_d}{V_r} \quad (5)$$

Figura IV.3

DISTRIBUCIÓN DEL AGUA APLICADA CON UN SISTEMA DE GOTEO



Un incremento en este tiempo implica una disminución del coeficiente de déficit, pero lleva aparejado una disminución del rendimiento de aplicación. El compromiso óptimo entre estas dos variables determina el intervalo de operación del regante.

El estado fenológico del cultivo condiciona el grado de humedad mínimo necesario para su adecuado desarrollo y, por consiguiente, el coeficiente de déficit máximo permitido. Además, como el despilfarro de agua conlleva un coste adicional energético y de fertilizantes, existirá también un rendimiento de aplicación mínimo exigible. El agricultor deberá situarse entre ambos límites para conseguir mayores beneficios.

3. Programación

La programación de riegos trata de dar respuesta a dos preguntas:

- ¿Cuánta agua debo aportar al cultivo?
- ¿Cuándo debo aportársela?

Con sistemas de riego de alta frecuencia de aplicación, puede parecer que la respuesta a la segunda pregunta tiene un sentido más académico que real. Pero esto no es así, ya que las características del suelo o sustrato, el sistema de riego y la densidad de goteros van a determinar con distintos inter-

valos entre riegos, para la misma dosis de agua, la diferente localización de agua y nutrientes. Es necesario conocer el movimiento de agua y sales en cada caso, con el fin de optimizar el agua a aportar en cada riego. Los sistemas de goteo se caracterizan, además de por su alta frecuencia, porque los procesos de infiltración, distribución y evapotranspiración son casi simultáneos. Esta característica hace que, en la programación mediante balance hídrico, el papel del suelo como reserva de agua sea marginal.

Como respuesta a la primera pregunta cabe decir que todo programa de riego debe tender a mantener el suministro de agua a los cultivos en cantidades que optimicen la producción cosechable. Además, la concentración salina en el suelo, a largo plazo, no debe sobrepasar determinados umbrales, con el fin de mantener su productividad.

La aplicación de la ecuación de balance hídrico, a un sistema suelo-planta determinado, permite el cálculo de la evapotranspiración (ET), durante un tiempo dado:

$$ET = P + R \pm S \pm D \pm \Delta W \quad (6)$$

siendo P la precipitación, R el riego, S la escorrentía superficial, D el agua de drenaje o ascenso capilar y ΔW la variación en el contenido de agua del suelo en el período considerado

El concepto de ET integra el proceso de evaporación desde el suelo y el de transpiración de las plantas. Su valor se obtiene por medición directa de todos los términos que intervienen en la ecuación de balance.

En el caso del riego por goteo manejado con alta frecuencia es de esperar que ΔW sea próxima a cero, e igual debe ocurrir con el término S si el sistema se maneja adecuadamente y el terreno no presenta pendientes pronunciadas. La ecuación (6) se reducirá a:

$$ET = P + R \pm D \quad (7)$$

La expresión (7) es válida en invernaderos con cubierta plana que desaguan el agua de lluvia en su interior.

En invernaderos que evacúan toda el agua de lluvia al exterior ($P = 0$), la expresión de la ET es:

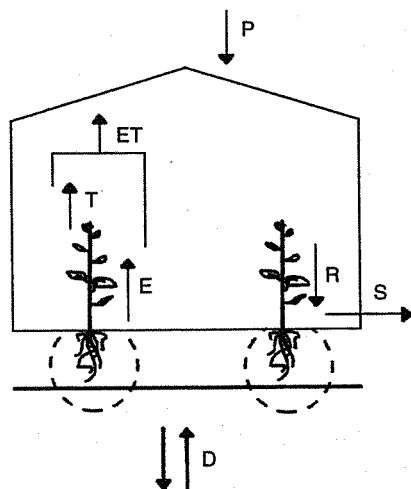
$$ET = R \pm D \quad (8)$$

Evapotranspiración de referencia

La ET es la suma de dos procesos difícilmente cuantificables por separado. Éstos dependen de parámetros climáticos, de cultivo y de la disponibilidad de agua en el suelo.

Figura IV.4

COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO
EN UN CULTIVO POR GOTEO EN INVERNADERO



Dada la complejidad para su determinación, se ha ideado el concepto de evapotranspiración de referencia (ET_o o ET_r). La ET_o o ET_r se refiere a la evapotranspiración de cultivos tipificados, de gramíneas (ET_o) o alfalfa (ET_r), en los que su ET sólo está condicionada por factores meteorológicos. Estos conceptos sirven como dato de partida para el cálculo de la evapotranspiración de cada cultivo (ET_c). Una y otra se relacionan mediante el coeficiente de cultivo (K_c).

$$ET_c = K_c \cdot ET_o \quad (9)$$

El coeficiente de cultivo viene afectado, fundamentalmente, por las características del cultivo, la fecha de siembra o trasplante, la duración del ciclo y la intensidad de desarrollo.

Los métodos de medición de la evapotranspiración pueden ser: hidrológicos (basados en el balance hídrico) y micrometeorológicos (basados en el transporte de vapor -aerodinámicos- y en el balance de energía). Sólo se comentarán los métodos hidrológicos. Éstos exigen el uso de lisímetros. Un lisímetro es un dispositivo que contiene un volumen conocido de suelo circundante, del que debe ser representativo, que permite recoger el agua de drenaje. Con él se pueden medir todos los términos de la ecuación del balance. Además, permite la calibración de las fórmulas empíricas.

Gráfico IV.1

CURVA TÍPICA DE K_c PARA UN CULTIVO DE TOMATE EN
INVERNADERO PARRAL TRANSPLANTADO EN OTOÑO

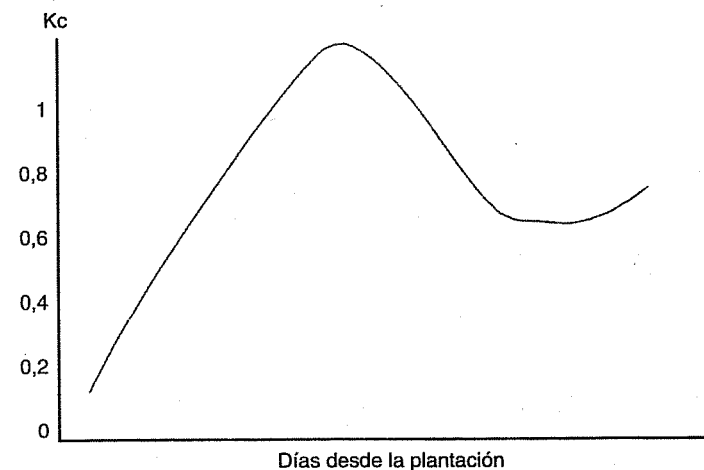


Figura IV.5

SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN LISÍMETRO DE DRENAJE
(COTAS EN cm)

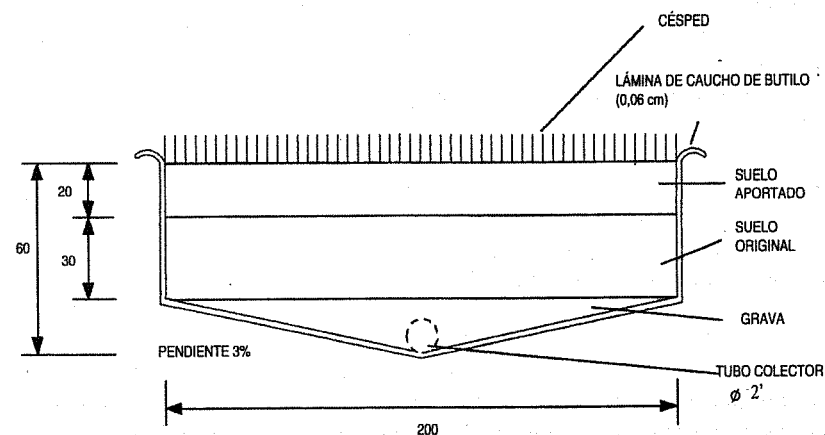
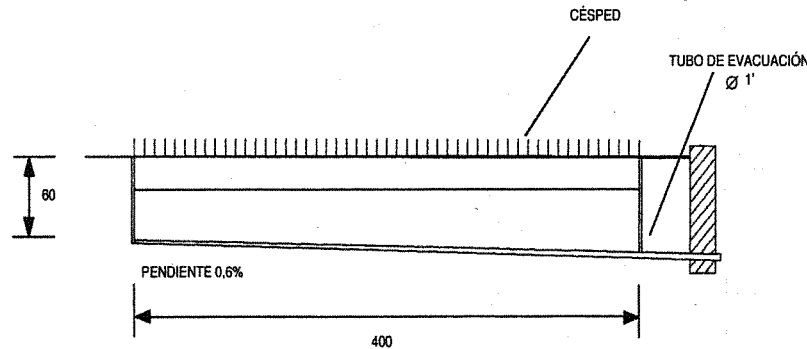


Figura IV.6

SECCIÓN LONGITUDINAL DE UN LISÍMETRO DE DRENAJE
(COTAS EN cm)



Los métodos de estimación de la ETo se basan en su correlación con datos meteorológicos. Se han desarrollado muchas fórmulas empíricas que hacen corresponder las medidas microclimáticas con una ET que supuestamente debe producirse. Los resultados derivados de estas relaciones empíricas sólo son válidas, en principio, para las condiciones climáticas donde el valor de sus parámetros ha sido previamente calibrado con medidas reales.

El apéndice 4.2 presenta una serie de métodos de estima de la ETo y su procedimiento de cálculo.

La cantidad de agua neta a aplicar en cada riego se deduce de la expresión 8.

$$R = ET - D \quad (10)$$

Si no existe una capa freática cercana a la superficie del suelo, la expresión anterior queda reducida a:

$$R = ET \quad (11)$$

Las aguas de riego tienen en mayor o menor medidas distintas sales en solución. La forma en que se distribuyen éstas, en el perfil de un suelo regado por goteo, depende fundamentalmente de su textura y estructura,

del caudal y uniformidad de distribución del agua del sistema, de la distribución radical y de la fracción de lavado. Se define la fracción de lavado (RL) como la mínima cantidad de drenaje necesaria para mantener la salinidad del suelo por debajo de un umbral, que afectaría a la producción de los cultivos. En el caso de riego por goteo se puede adoptar la siguiente expresión:

$$RL = \frac{CEa}{(2Max\ CEe)} \quad (12)$$

donde: CEa es la conductividad eléctrica del agua de riego y $Max\ CEe$ es la conductividad eléctrica del extracto de saturación máxima tolerable para un cultivo determinado (el cuadro IV.1 del apéndice muestra como el rendimiento de distintos cultivos es afectado por la salinidad).

Conocida la RL podemos obtener las necesidades de riego brutas (NRB) mediante la expresión:

$$NRB = \frac{R}{CU(1 - RL)} \quad (13)$$

Donde CU es el coeficiente de uniformidad en la distribución del agua del sistema.

Este control de sales en el campo regado supondría unas pérdidas por drenaje muy importantes. Para reducir éstas es preciso realizar experimentos que estudien los patrones de movimiento de agua y sales en los diferentes tipos de suelo. Dada la carencia de datos existentes en relación con este punto, se propone adoptar el siguiente criterio:

$$NRB = \frac{R}{CU} \text{ si } CU > (1 - RL) \quad (14)$$

O bien:

$$NRB = \frac{R}{(1 - RL)} \text{ si } CU > (1 - RL) \quad (15)$$

Otros métodos utilizados para la programación son:

– Los basados en medidas del suelo utilizando como parámetros el potencial matricial que se obtiene con la ayuda de tensiómetros. O mediante medidas del contenido de agua en suelo, que se puede determinar por el método gravimétrico, en el que el volumen de agua en el suelo se obtiene multiplicando el contenido gravimétrico de agua por la densidad aparente del suelo. También, el agua existente en el suelo se puede obtener mediante la sonda de neutrones, o con un equipo TDR.

– Los basados en medida de planta utilizando como parámetro el potencial hídrico de la planta o la temperatura del cultivo. En el primer caso se utiliza la cámara de presión y en el segundo sensores de radiación infrarroja.

4. Apéndice

4.1. Comportamiento hidráulico de los goteros

El gotero es el elemento clave dentro de una instalación de riego localizado ya que es el encargado de verter el agua al cultivo. Su comportamiento hidráulico queda definido por la fórmula de gasto del gotero y por el coeficiente de variación.

La fórmula de gasto del gotero es una función de tipo potencial que relaciona el gasto del gotero con la presión de funcionamiento. Su expresión es:

$$Q = k p^x \quad (16)$$

donde Q (L/h) es el gasto del gotero y p (kPa) es la presión del agua. Los parámetros característicos de gotero k y x se obtienen a partir de datos experimentales en una mesa de ensayo de goteros y mediante un análisis de regresión estadístico.

El coeficiente del gotero k es dimensional y depende principalmente de las características geométricas del gotero. El exponente de descarga, que es adimensional, es indicativo de la sensibilidad del gasto del gotero a los cambios de presión. Su valor, que está comprendido entre cero y la unidad, caracteriza el tipo de emisor y el tipo de régimen de circulación del flujo en el interior del gotero.

Cuando el valor del exponente de descarga del gotero es inferior a 0,2 se considera autocompensante. Estos goteros presentan un intervalo de presiones dentro del cual el gasto es prácticamente insensible a los cambios de presión. Esto se consigue mediante una membrana interna de material plástico deformable con la presión del agua, de modo que las dimensiones del orificio de salida son cambiantes.

Los goteros que carecen de esta propiedad particular se conocen con el nombre de goteros convencionales. Todos ellos pueden encuadrarse dentro de dos únicos grupos:

a) Goteros de orificio. Para el cálculo del caudal liberado por estos goteros es aplicable la ecuación de desagüe a través de un orificio:

$$Q = C_d A \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \quad (17)$$

donde C_d es el coeficiente de gasto o de desagüe, A es la sección de salida, ρ es la densidad del agua y el resto de variables como anteriormente se definieron.

b) Goteros de largo recorrido. En éstos la pérdida de carga se produce por el rozamiento del agua con las paredes de un estrecho conducto. Motivo por el cual para determinar el caudal de descarga es aplicable la ecuación de pérdidas de carga de Darcy-Weisbach:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{U^2}{2g} \quad (18)$$

donde h_f son las pérdidas de carga o de presión en la tubería, f es el factor de rozamiento, L es la longitud de la tubería, D es el diámetro interior de la tubería, U es la velocidad media de flujo y g la constante gravitatoria. En el caso particular de los goteros la pérdida de carga coincide con la presión de funcionamiento del gotero.

Cuando el régimen de circulación del agua en el interior de gotero es laminar el factor de rozamiento toma el valor:

$$f = \frac{64}{R} \quad (19)$$

donde R el número de Reynolds, cuyo valor viene dado por:

$$R = \frac{UD}{\nu} \quad (20)$$

siendo ν = viscosidad cinemática del fluido.

Sustituyendo el valor del coeficiente de fricción en la fórmula de Darcy-Weisbach y teniendo en cuenta que la velocidad media del flujo se encuentra linealmente relacionada con el caudal de desagüe del gotero se llega fácilmente a la relación:

$$h_f = k_1 Q \quad (21)$$

donde k_1 es una constante de proporcionalidad. Esta relación indica que cuando el régimen de circulación del flujo en el gotero es laminar el exponente de descarga toma el valor de la unidad. En estas condiciones la sensibilidad del gasto a las variaciones de presión es elevada.

Análogamente, cuando el régimen de circulación del agua es turbulento, debido a que el valor del coeficiente de fricción depende únicamente de la aspereza relativa de la pared de la tubería, la fórmula de Darcy-Weisbach queda reducida a:

$$h_f = k_2 Q^2 \quad (22)$$

donde k_2 es también una constante de proporcionalidad. Despejando el caudal en función de la presión se obtiene un valor del exponente de descarga del gotero igual a 0,5. Esto indica que en régimen turbulento la sensibilidad de gasto a los cambios de presión es menor que en régimen laminar.

El coeficiente de variación, como su nombre indica, es un índice representativo de la variabilidad existente en el funcionamiento de diferentes unidades de un mismo modelo de gotero. Su valor se calcula para la presión nominal de trabajo que normalmente es de 100 kPa y viene definido por la expresión:

$$Cv = \frac{s}{Q} 100 \quad (23)$$

donde Cv es el coeficiente de variación de fábrica correspondiente a una presión nominal, s es la desviación típica de los caudales observados en una muestra de goteros y Q es el gasto medio de dichos caudales. Valores pequeños de este índice corresponden con goteros de mayor calidad.

4.2. Métodos de estima de la ETo y procedimiento de cálculo²

PENMAN-FAO:

$$(24) \quad ETo = c \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} Rn_1 + \frac{\gamma}{\gamma + \Delta} \cdot 2,7 (1 + 0,01 U_2) \cdot DPV \right]$$

Donde:

c: es el factor de corrección

Δ : es la inclinación de la curva de presión de vapor, en kPa/°C

γ : es la constante psicrométrica, en kPa/°C

Rn_1 : es la radiación neta, en mm/día.

U_2 : es la velocidad del viento a 2 m de altura, en km/día.

DPV_1 : es el déficit de presión del vapor para la metodología Penman-FAO.

Para el cálculo de la DPV_1 es posible utilizar diferentes metodologías siendo la siguiente una de las más utilizada:

$$DPV_1 = (e_{s1} - e_{d1}) \quad (25)$$

donde e_{s1} es la presión de saturación de vapor y e_{d1} es la presión actual de vapor en kPa, calculados por las siguientes ecuaciones:

$$e_{s1} = 0,6108 \exp \left[\frac{17,27 \cdot T_{med}}{T_{med} + 237,3} \right] \quad (26)$$

$$\begin{aligned} e_{d1} &= e_{s1} \cdot HR_{med} / 100, \text{ en kPa} \\ \Delta &= 4098 e_{s1} / (T_{med} + 237,3)^2, \text{ en kPa/°C} \\ \gamma &= 0,0016286 P / \lambda, \text{ en kPa/°C} \end{aligned} \quad (27)$$

Donde T_{med} es la temperatura media diaria en °C, HR_{med} es la humedad relativa media en % y P es la presión atmosférica en kPa, calculada mediante:

$$P = 101,1[(293 - 0,0065Z)/293]^{5,256} \quad (28)$$

Donde Z es la altitud sobre el nivel del mar.

Siendo λ el calor latente de vaporización en MJ/kg calculado por:

$$\lambda = 2,501 - (2,361 \cdot 10^{-3}) T_{med} \quad (29)$$

$$Rn_1 = (1 - \alpha) R_s - R_b \quad (30)$$

Donde α es el albedo de la superficie (cultivos $\alpha=0,25$), R_s es la radiación solar global en mm/día y R_b es la radiación neta de onda larga. Una de las metodologías propuestas para el cálculo de R_b es:

$$R_b = (0,9n/N + 0,1) (0,34 - 0,139 \sqrt{e_d}) \sigma T^4 \quad (31)$$

En la que σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 4,9 \cdot 10^{-9}$ MJ/m² día °K⁴) T es la temperatura absoluta en °K ($T = T_{med} + 273,16$) y n/N es la relación entre las horas de sol real (n) y las horas de sol máxima posible para la fecha evaluada (N).

El valor de la corrección c puede calcularse por la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} c &= [892000 - 78100 U_d + 2190 U_d R_s + 4020 HR_{max} R_s \\ &+ 196 (U_d/U_n) U_d HR_{max} + 19,8 (U_d/U_n) U_d HR_{max} R_s \\ &+ 2,36 (U_d)^2 HR_{max} R_s - 8,6 (U_d/U_n)^2 U_d HR_{max} \\ &- 0,292 (U_d/U_n) (U_d)^2 (HR_{max})^2 R_s - 16,1 HR_{max} (R_s)^2] 10^{-6} \end{aligned}$$

Los límites de validez para la ecuación anterior, y cuando los datos de entrada lo superen, son los siguientes:

$$\begin{aligned} 3 \leq R_s \leq 12 \text{ mm/día} & \quad 30 \leq HR_{max} \leq 90\% \\ 0 \leq U_d \leq 9 \text{ m/s} & \quad 1 \leq U_d/U_n \leq 4 \end{aligned}$$

² JENSEN, M. E., BURMAN, R. D. y ALLEN, R. G (1990), *Evapotranspiration and irrigation water requirements*, Manual n.º 70. Am. Soc. of Civil Engineers: 327 pp.

Siendo:

U_d = velocidad del viento durante el día (7 a.m. a 7 p.m.).

U_n = velocidad del viento durante la noche.

RADIACIÓN FAO:

$$ET_o = b \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_s \right] - 0,3 \quad (32)$$

siendo b el factor de corrección, calculado por:

$$b = [10660 - 13 HR_{med} + 450 U_d - 2 HR_{med} U_d - 0,315 HR^2 - 11 U_d^2] 10^{-4}$$

TANQUE CLASE A FAO:

$$ET_o = k_p \cdot E_o \quad (33)$$

E_o es la evaporación del tanque en mm/día y k_p es el factor de corrección. El k_p varía si el tanque está instalado en una superficie con hierba o no. A continuación, se exponen las ecuaciones para un tanque instalado en una pradera.

$$K_p = 0,108 - 0,000331 U_2 + 0,0422 \ln(fetch) + 0,1434 \ln(HR_{med}) - 0,000631 [\ln(fetch)]^2 [\ln(HR_{med})]$$

Fetch= distancia a barlovento desde el borde de la pradera hasta el tanque.

Los límites máximo y mínimo de validez para la ecuación anterior son los siguientes:

$$\begin{aligned} 30 &\leq HR_{med} \leq 84\% \\ 84 &\leq U_2 \leq 700 \text{ km/día} \\ 1 &\leq fetch \leq 1000 \text{ m} \end{aligned}$$

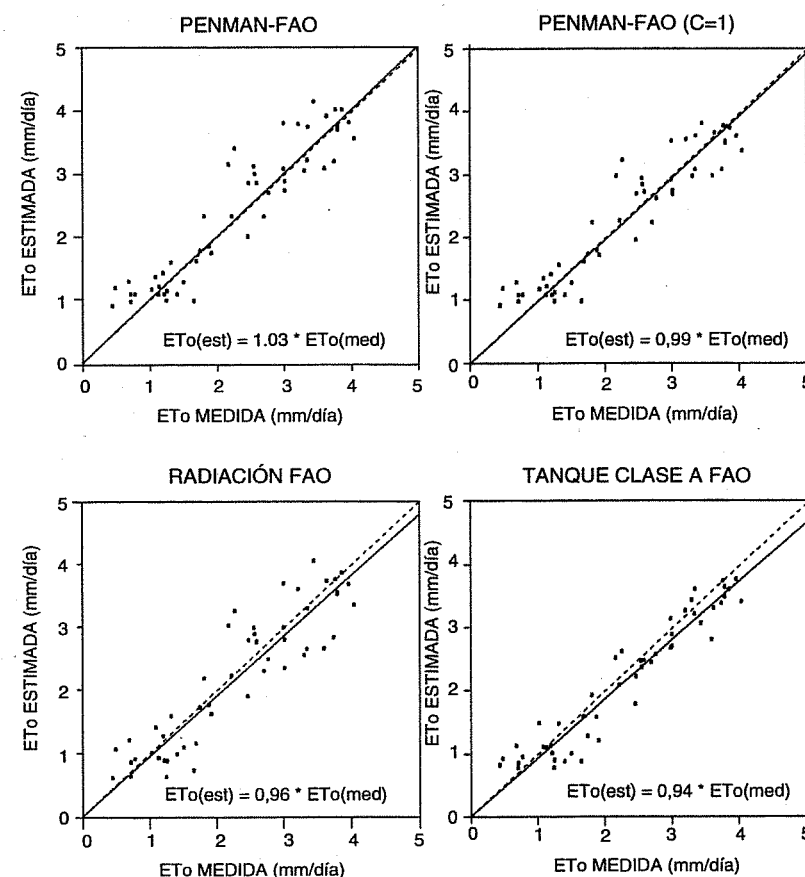
Cuando, los datos sean superiores a los límites, se tomarán estos valores extremos.

4.3. Estimación que de la ET_o hacen los métodos Penman-FAO, radiación-FAO y tanque clase A-FAO para el invernadero parral de Almería³.

³ FERNÁNDEZ, M.ª D., F. ORGAZ, F. VILLALOBOS y J. LÓPEZ-GÁLVEZ (1994), *Evaluación de métodos de cálculo de la evaporación de referencia bajo condiciones de invernadero en Almería*, XII Jornadas Técnicas Sobre Riegos, Pamplona-España, pp. 63-69.

Gráfico IV.2

COMPARACIÓN ENTRE LOS VALORES MEDIDOS EN INVERNADERO Y LOS ESTIMADOS POR LOS MÉTODOS RADIACIÓN-FAO, PENMAN-FAO CON Y SIN FACTOR DE CORRECCIÓN Y FAO-TANQUE CLASE A



4.4. Tolerancia a la salinidad de las principales hortalizas

Cuadro IV.1

TOLERANCIA A LA SALINIDAD DE LAS PRINCIPALES HORTALIZAS. DISMINUCIÓN DE RENDIMIENTOS⁴

Cultivo	0%		10%		25%		50%		Máx.
	CEe	CEa	CEe	CEa	CEe	CEa	CEe	CEa	CEe
Habas	1,6	1,1	2,6	1,8	4,2	2,0	6,8	4,5	12,0
Fresa	1,0	0,7	1,3	0,9	1,8	1,2	2,5	1,7	4,0
Remolacha	4,0	2,7	5,1	3,4	6,8	4,5	9,6	6,4	15,0
Brócoli	2,8	1,9	3,9	2,6	5,5	3,7	8,2	5,5	13,5
Tomate	2,5	1,7	3,5	2,3	5,0	3,4	7,6	5,0	12,5
Pepino	2,5	1,7	3,3	2,2	4,4	2,9	6,3	4,2	10,0
Melón	2,2	1,5	3,6	2,4	5,7	3,8	9,1	6,1	16,0
Espinacas	2,0	1,3	3,3	2,2	5,3	3,5	8,6	5,7	15,0
Coles	1,8	1,2	2,8	1,9	4,4	2,9	7,0	4,6	12,0
Patata	1,7	1,1	2,5	1,7	3,8	2,5	5,9	3,9	10,0
Maíz dulce	1,7	1,1	2,5	1,7	3,8	2,5	5,9	3,9	10,0
Pimiento	1,5	1,0	2,2	1,5	3,3	2,2	5,1	3,4	8,5
Lechuga	1,3	0,9	2,1	1,4	3,2	2,1	5,2	3,4	9,0
Rábano	1,2	0,8	2,0	1,3	3,1	2,1	5,0	3,4	9,0
Cebolla	1,2	0,8	1,8	1,2	2,8	1,8	4,3	2,9	7,5
Zanahoria	1,0	0,7	1,7	1,1	2,8	1,9	4,6	3,1	8,0
Judías	1,0	0,7	1,5	1,0	2,3	1,5	3,6	2,4	6,5

CEe = Conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo en dS/m a 25°C.

CEa = Conductividad eléctrica del agua de riego en dS/m a 25°C.

CEe máxima = La máxima conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo, en dS/m a 25°C que puede producirse debido a la absorción de agua de suelo por parte de los cultivos a fin de satisfacer su demanda de evapotranspiración.

⁴ Adaptado de: AYERS, R. S. y D. W. WESTCOT (1977), *Calidad del agua para la agricultura*, FAO: Riego y drenaje, 29.

CAPÍTULO V

LA FERTILIZACIÓN

J. López-Gálvez y C. Segovia

1. Fertilización de los cultivos

La mayoría de las plantas herbáceas están formadas en un 90% por agua, constituyendo la materia seca sólo un 10% del peso total (cuadro V.1).

La materia seca está compuesta en un 90% por carbono, hidrógeno y oxígeno. El carbono y parte del oxígeno lo toman las plantas del dióxido de carbono (CO₂) del aire, mientras que el hidrógeno y el resto del oxígeno les llega del agua. En los invernaderos son comunes las deficiencias en dióxido de carbono, aspecto que es necesario tener en cuenta al objeto de mejorar la productividad de los cultivos. El 10% del restante peso seco de la planta está compuesto por distintos elementos esenciales que deben ser suministrados mediante un adecuado programa de fertilización. Los actuales sistemas de riego por goteo permiten aportar en parte o en su totalidad los nutrientes a través de la red, siendo usual la programación simultánea de agua y nutrientes, técnica conocida como fertirriego o fertirrigación.

Los programas para reponer al suelo los elementos nutritivos gastados durante el ciclo de cultivo, utilizando fertilizantes químicos, empiezan a realizarse a finales del siglo pasado. Con anterioridad, lo usual era aportar periódicamente materia orgánica al suelo, o en establecer rotaciones de cultivos o prácticas de ocupación del suelo (año y vez, al tercio, etc.) tratando de mantener un buen grado de fertilidad para la posterior siembra. La llegada de los fertilizantes químicos hace que las técnicas citadas vayan cayendo en desuso, consiguiéndose intensificar la ocupación del suelo e incluso disminuir o anular la aportación de materia orgánica. Este hecho provoca la alteración de la estructura del suelo, dificultando el aprovechamiento de los fertilizantes minerales, dado que la función de la materia orgánica es, además de suministrar nutrientes, mantener la estructura del suelo.

Cuadro V.1

CONTENIDO DE ELEMENTOS (%) EN ÓRGANOS AÉREOS
DE JUDÍA CULTIVADA SOBRE SUELO ENARENADO
(cv. Strike cosecha 19.000 kg/ha. Helda 44.700 kg/ha)
Y DE TOMATE CULTIVADO EN DISTINTO MEDIO
(enarenado cv. Vemone cosecha 84.000 kg/ha y sustratos cv.
Daniela cosecha 170.000 kg/ha)

Elementos	Judía		Tomate	
	Strike	Helda	Vemone	Daniela
Agua	87,6	85,7	92,3	91,1
Mat. Seca	12,4	14,3	7,7	8,9
C, H y O*	90	90	90	90
Nitrógeno	2,96	2,83	2,34	2,09
Fósforo	0,35	0,32	0,35	0,54
Potasio	3,55	3,58	3,30	3,70
Calcio	1,32	0,86	1,39	1,30
Magnesio	0,60	0,58	0,68	0,55
Resto*	0,82	1,43	1,34	1,22

Nota: Datos obtenidos experimentalmente en la estación experimental 'Las Palmerillas' excepto los marcados con *. El agua empleada fue C_2S_1 .

La programación de la fertilización en invernadero depende, en gran medida, de la técnica de cultivo que se esté utilizando. Las plantas necesitan una serie de elementos esenciales para el desarrollo de su ciclo vital, de los cuales, seis son requeridos en cantidades relativamente grandes: nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre, y se denominan macronutrientes; y otros como hierro, manganeso, cobre, cinc, boro, molibdeno y cloro se requieren en cantidades muy pequeñas y se les llama micronutrientes. En los suelos están presentes cantidades relativamente grandes de estos elementos, pero a veces las plantas no pueden disponer de ellos, ya que no se encuentran en formas asimilables, debido a que pueden estar formando parte de estructuras y redes cristalinas de minerales primarios y secundarios, presentarse formando compuestos insolubles debido al pH o bien por no mantener un equilibrio adecuado con los otros elementos esenciales. En los cultivos en sustratos al no disponer de suelo debemos aportar todos los elementos en la solución nutritiva. Normalmente, los micronutrientes se adicionan en forma de quelatos para eliminar estos problemas.

Un programa de abonado debe tener en cuenta las siguientes variables:

- Especie y variedad de la planta.
- Medio de cultivo.

- Estado fenológico de la planta.
- Ciclo de cultivo.
- Sistema de riego.
- Contenido en nutrientes del suelo o sustrato.

Otro factor a tener presente es la aportación de iones por el agua de riego, que debemos considerar al programar la fertilización. Como es sabido la utilización de aguas salinas afecta al potencial hídrico en la planta, al disminuir el potencial osmótico, disminuyendo la transpiración. También las altas concentraciones de Na^+ y Cl^- , presentes en estas aguas, repercuten en la absorción de potasio y de nitrógeno, además del efecto tóxico específico de esos y otros iones.

2. Fertilización del suelo enarenado

En el suelo enarenado, inicialmente, se conseguía un adecuado mantenimiento de su fertilidad con aportaciones periódicas de materia orgánica. La programación de la fertilización mineral se realizaba incorporando como abonado de fondo (previo a la siembra o trasplante) todo el fósforo y el potasio, así como parte del nitrógeno. La cantidad restante de fertilizante nitrogenado se aportaba a lo largo del ciclo de cultivo.

El nitrógeno de fondo, cuando se aporta en forma de ión NH_4^+ , es retenido por el complejo de cambio, y en suelos de mineralogía íltica, una fracción puede ser fijada por las arcillas en forma poco asimilable. El nitrógeno de la urea tiene un comportamiento análogo al de los abonos amoniacales. Cuando el nitrógeno se aporta en forma de nitratos, éstos son solubles, se mantienen en la solución del suelo y no son retenidos por los coloides. Los nitratos descienden arrastrados por el agua y pueden perderse por lixiviación o sufrir el proceso inverso, concentrarse en la superficie por ascenso capilar en periodos de sequía, quedando en ambos casos fuera del alcance de las raíces. Aunque en el caso del enarenado este último aspecto de ascensión de sales por capilaridad no se produce, debido al efecto de acolchado de la arena que reduce notoriamente las pérdidas por evaporación, así como la doble ruptura de la capilaridad originada, además de por la arena, por la capa de estiércol.

El fósforo y el potasio al aportarlos de fondo no presentan la problemática del nitrógeno. Ambos elementos son poco móviles, ya que los fosfatos son fuertemente adsorbidos por el suelo o precipitan formando sales de muy baja solubilidad, dificultando su movilidad, mientras que el catión potasio puede ser retenido temporalmente por determinadas arcillas o por el complejo de cambio.

En la actualidad, el grado de fertilidad de los suelos enarenados, es bajo, debido a la menor aportación de estiércol y a la mayor intensifica-

ción de los cultivos. En consecuencia es necesario, para cubrir las necesidades de las plantas aportar los nutrientes. Éstos se aplican a través del sistema de riego mediante fertirriego. Los fertilizantes más utilizados, en fertirriego, que deben ser muy solubles, aparecen en el cuadro V.2.

Cuadro V.2

FERTILIZANTES MÁS UTILIZADOS EN FERTIRRIEGO

Fertilizantes	Solubilidad (g/l) 24°C	Índice*
Sulfato amónico	760	110 (A)
Nitrato amónico	1190	84 (A)
Nitrato cálcico	2600	20(B)
Urea	1190	84 (A)
Ácido nítrico: 59%	líquido	26 (A)
Fosf. monoamónico	400	65 (A)
Ácido fosfórico 70%	líquido	38 (A)
Nitrato potásico	335	26 (B)
Sulfato potásico**		ácida

Nota:

* Se refiere al índice de acidez o basicidad que se corresponde con la cantidad de cal viva necesaria para neutralizar el incremento de acidez del suelo (fertilizantes de reacción ácida) o producir un aumento de pH equivalente (fertilizantes de reacción básica). A = ácido y B = básico.

** Soluble en agua.

Consideraciones de índole técnico-económicas pueden hacer aconsejables utilizar los tres macronutrientes como fertilizantes de fondo y para ello se pueden utilizar fertilizantes de lenta liberación¹. Estos fertilizantes además de aportar nitrógeno, fósforo y potasio en cantidades variables aportan otros elementos como calcio y azufre. Pueden venir o no, recubiertos de una resina orgánica, termo o biodegradable y suelen tener una longevidad de unos seis meses. La utilización de esta técnica de abonado puede permitir la supresión de complejos programas de fertirriego nitrogenado, pero para ello sería necesario conocer los elementos asimilables en suelo, con el fin de cubrir las necesidades del cultivo en las primeras fases de desarrollo.

¹ LÓPEZ-GÁLVEZ, J., F. BRETONES, A. GALLEGO, J. C. LÓPEZ-HERNÁNDEZ, C. SEGOVIA y P. AGUILAR (1993), «Los fertilizantes de lenta liberación. Aplicación al cultivo de melón bajo invernadero», *Hortofruticultura*, n.º 9: pp. 43-46.

3. Fertilización de los sustratos

Las soluciones nutritivas tienen que aportar el agua y los elementos minerales que necesita el cultivo para su normal desarrollo. Hay dos aspectos fundamentales a tener en cuenta: los abonos utilizados para aportar macronutrientes tienen que ser muy solubles y la solución nutritiva tiene que adecuarse, en su composición, a las necesidades concretas de la planta en cada momento. Es evidente que no existe una solución universal que se pueda aplicar a todas las especies, ya que cada una tiene requerimientos concretos. Todas las soluciones deben llevar los macro y micronutrientes que precisen los cultivos. Los macronutrientes en forma de nitrato cálcico, nitrato potásico, sulfato amónico, nitrato amónico, sulfato potásico, fosfato potásico, sulfato magnésico y algunos micronutrientes como el boro y el molibdeno se aportan como sales, los restantes micronutrientes, fundamentalmente, hierro, cinc, manganeso y cobre, se aportan en forma de quelatos.

Sabido es que buena parte de las especies tiene su óptimo desarrollo en medio neutro o ligeramente ácido (pH 5 a 7). Por esta razón, otro aspecto a tener presente es el pH de la solución, pues afecta a la solubilidad y forma de los iones, lo que va a influir sobre la asimilación de los mismos. Así, hierro, manganeso, cinc y cobre, a pH básico, precipitan formando hidróxidos insolubles que no están disponibles para la planta. El fósforo, dependiendo de la acidez del medio, se puede encontrar bajo tres formas diferentes: PO_4H_2^- , forma predominante cuando el medio es ácido, que es la más asimilable por la planta, PO_4H^{2-} que predomina en medio básico y PO_4^{3-} con pH>9 (la utilización del fósforo es máxima a pH= 6,5-7). Además, el pH influye sobre el transporte de iones a través de las paredes celulares de la raíz de la planta. Para disminuir el pH del agua de riego se adiciona un ácido, siendo el más utilizado el ácido nítrico que, aparte de bajar el pH, aporta nitrógeno.

‘La nutrición vegetal es, por tanto, la base de la hidroponía. Cualquiera que intente emplear técnicas hidropónicas deberá tener suficientes conocimientos de nutrición vegetal. La nutrición de las plantas por medio de la utilización de soluciones de nutrientes será la llave del éxito en los cultivos hidropónicos’.

3.1. Soluciones nutritivas

Las soluciones nutritivas se obtienen disolviendo las sales fertilizantes en agua. Los fertilizantes empleados tienen que ser muy solubles y deben

² RESH, H. M. (1992), *Cultivos hidropónicos. Nuevas técnicas de producción*, 3.ª edición, Madrid: Mundi-Prensa, 369 pp.

de permanecer en solución para ser absorbidos por las plantas. Debemos tener en cuenta que la solubilidad de algunas sales desciende con la temperatura.

La elección de los fertilizantes, para preparar las soluciones nutritivas denominadas *soluciones madres*, debe venir determinada por su solubilidad y por su grado de pureza. Las sales fertilizantes más empleadas, su riqueza y solubilidad aparecen en el cuadro V.3.

Cuadro V.3

**FERTILIZANTES MÁS COMUNES UTILIZADOS
PARA CULTIVOS EN SUSTRATO, % RIQUEZA Y SOLUBILIDAD
A DIFERENTES TEMPERATURAS**

Fertilizante	% Riqueza	Solubilidad (g/l)		
		0°C	20°C	24°C
Nitrato de cal	N-NO ₃ = 14,4 N-NH ₄ = 1,1 Ca ²⁺ = 19	1020	1220	2600
Nitrato amónico	N-NO ₃ = 16,75 N-NH ₄ = 16,75	1180		1190
Ácido nítrico: 59%	N-NO ₃ = 12,6 (p/p)	Li	Li	Li
Ácido fosfórico: 75%	P ₂ O ₅ = 50 (p/p) P ₂ O ₅ = 54 (p/p)	Li	Li	Li
Nitrato potásico	N-NO ₃ = 13 K ₂ O = 46	133	316	
Sulfato potásico soluble	K ₂ O = 50 S ²⁺ + 0,4 + 0,6 + = 18			
Sulfato magnésico	MgO = 16 S ²⁺ + 0,4 + 0,6 + = 13	260	700	

Nota: Li = Líquido.

3.2. Criterios para preparar soluciones nutritivas

Análisis del agua de riego

El agua de riego lleva sales en disolución, siendo necesario conocer la concentración de las mismas y las posibles interacciones para preparar la solución nutritiva. Es frecuente que Ca²⁺ y Mg²⁺ estén en concentraciones altas, con el consiguiente problema para disolver fosfatos y sulfatos, si no se ha acidificado el medio.

Los iones Cl⁻ y Na⁺ normalmente se encuentran en las aguas de riego en cantidad suficiente para cubrir las necesidades de los cultivos.

Otro aspecto importante a conocer es el contenido en carbonatos y bicarbonatos del agua para corregir el pH.

Compatibilidad

Normalmente, las soluciones nutritivas que se emplean en fertirriego tanto para cultivo en suelo como en sustrato se preparan concentradas, para diluirlas posteriormente con el agua de riego. Es frecuente que estas soluciones nutritivas sean dos órdenes de magnitud más concentradas que la solución que se aplica al cultivo. Por tanto, en estas soluciones no se deben mezclar fosfatos y ciertos sulfatos con fertilizantes que contengan calcio, o en medio alcalino fertilizantes que contengan magnesio. En el cuadro V.4 aparece la compatibilidad entre fertilizantes.

Cuadro V.4

**FERTILIZANTES QUE PUEDEN SER O NO MEZCLADOS
EN LA SOLUCIÓN MADRE**

	Nitrato de cal	Nitrato de potasio	Sulfato amónico	Sulfato de potasio	Sulfato de magnesio
Nitrato de cal	—	sí	no	no	no
Nitrato de potasio	sí	—	sí	sí	sí
Sulfato amónico	no	sí	—	sí	sí
Sulfato de potasio	no	sí	sí	—	sí
Sulfato de magnesio	no	sí	sí	sí	—
Fosfato amónico	no	sí	sí	sí	sí*

* No se deben mezclar ni en seco ni en medio alcalino.

Preparación de las soluciones nutritivas o madres

Las soluciones madres se preparan empleándose al menos dos depósitos, ya que no se deben mezclar determinados compuestos.

En uno de los depósitos se aportará:

- Agua.
- Ácido nítrico, para corregir el pH.
- Nitrato cálcico.
- Nitrato magnésico.
- Quelatos de hierro.

Este recipiente puede contener todo o parte del potasio, bajo forma obligatoria de nitrato potásico.

En el otro depósito se aportará:

- Agua.
- Ácido nítrico, para compensar el efecto alcalinizante de los fosfatos y corregir el pH de la solución nutritiva.
- Fosfato.

Este recipiente puede contener todo o parte del nitrógeno, del potasio y del magnesio, pero bajo formas de sulfato, nitrato y fosfato. *El calcio no debe nunca aportarse en este recipiente* porque precipitaría formando sulfato cálcico y fosfato cálcico. Los micronutrientes se pueden poner aquí, pero *no los quelatos de hierro* por lo que comúnmente, se aportan en el otro recipiente.

3.3. Sistemas de incorporación de fertilizantes al agua de riego

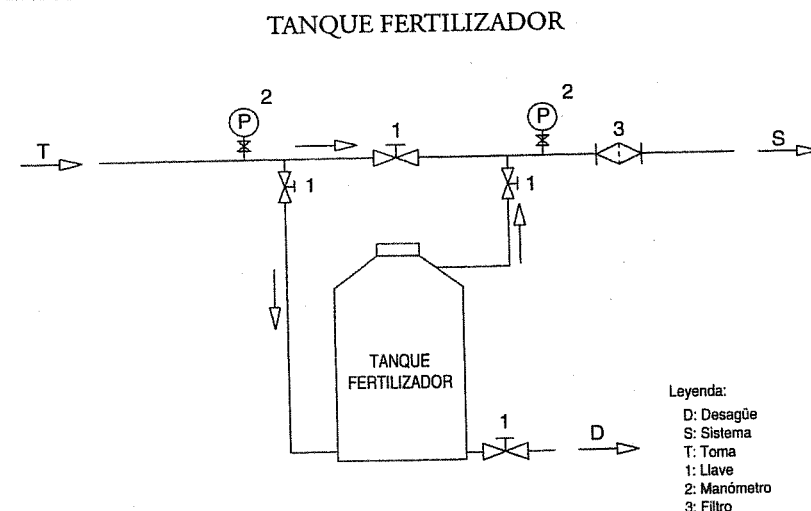
La incorporación de fertilizantes al agua de riego se realiza, en algún punto del sistema de distribución, por una serie de procedimientos que se describen más adelante.

El fertirriego se empezó a utilizar con el riego por inundación, por procedimientos manuales, y una forma usual de hacerlo era añadir el abono en la misma toma del agua de riego; pero el uso generalizado habría de corresponder a instalaciones de riego localizado. A mediados de la década de los 70 se empezó a mecanizar dicha operación. Se inició con tanques de fertilización y, al mismo tiempo, aunque en forma mucho menos extendida, con dispositivos de inyección en sistemas de impulsión. Posteriormente, se ha recurrido a otros procedimientos, entre los que destacan la incorporación de la solución a la aspiración de la bomba de riego, directamente o mediante venturis. Modernamente, se emplean equipos de fertirriego automáticos, controlados por programadores.

Tanque fertilizador

Se trata de un recipiente herméticamente cerrado, conectado en paralelo con la tubería principal del sistema de riego S. En su interior se encuentra la solución de fertilizantes, previamente preparada. La llave, colocada en la tubería principal, obliga a que parte del flujo de agua pase a través de dicho depósito. El flujo así derivado se mezcla con la solución, incorporándola al agua de riego.

Figura V.1



Los tanques de fertilización donde se deposita el abono, se fabrican, normalmente, de fibra (poliéster) o metálicos y quedan unidos al conducto principal de riego por dos mangueras flexibles. También disponen de otros elementos de control, como llaves y manómetros, que facilitan su manejo.

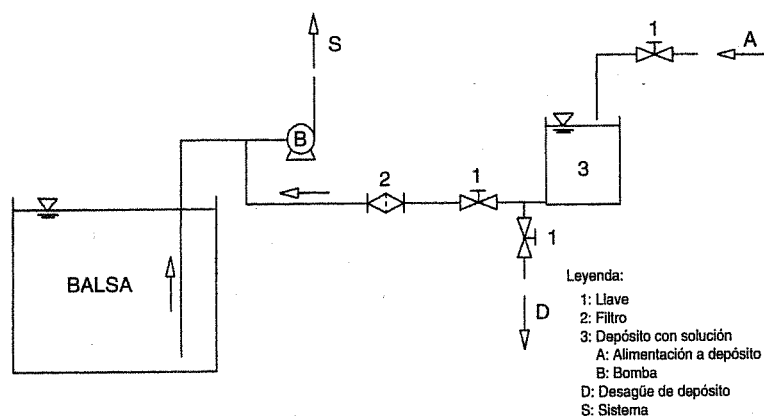
El tanque de fertilización, aislado de la red de riego, se llena. Después se abren parcialmente las llaves para provocar la succión de la solución de nutrientes que pasa a la red de riego. Como podía esperarse, la entrada del fertilizante en la red de riego se produce con poco control y falta de uniformidad.

Aspiración directa

Este método requiere una succión en el punto del sistema que recibe la solución fertilizante. Tal condición se cumple en la tubería de aspiración de un sistema de bombeo que se alimenta de una balsa cuyo nivel libre se encuentra a una cota inferior: la depresión allí producida succiona, junto al agua de riego de la balsa, la solución de nutrientes de un depósito auxiliar. Obviamente, esta solución se habrá preparado con anterioridad en la concentración deseada.

Figura V.2

ASPIRACIÓN DIRECTA



El depósito auxiliar, donde se prepara la solución de fertilizantes, queda conectado con el tubo de aspiración de la bomba de riego. Para preparar la solución de fertilizantes, éstos se colocan en el depósito, que se llena de agua. Después, se agita manualmente y se procede a la introducción de la solución resultante en la red de riego, abriéndose la llave, ya con la bomba de riego en marcha. El agricultor maneja fácilmente la salida de la solución al ser un depósito abierto.

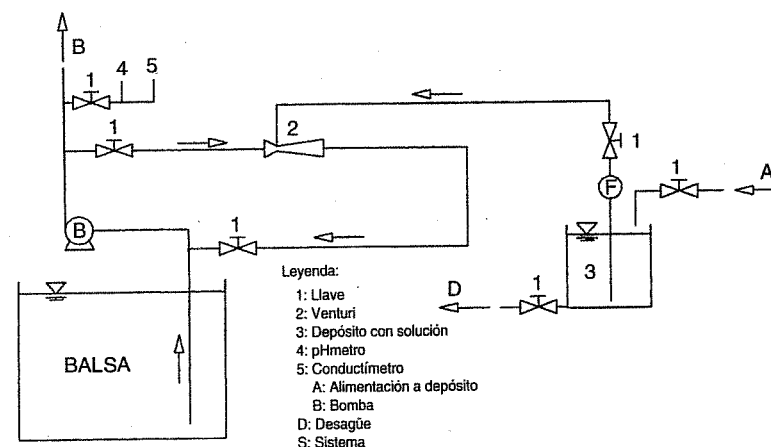
El sistema descrito ofrece en particular una gran facilidad para introducir la solución en la red, cuando la balsa está por debajo del nivel de la bomba. Si ésta trabaja en carga, la succión necesaria en la tubería de aspiración puede conseguirse produciendo una pérdida de carga mediante el cierre parcial de una llave intercalada a tal efecto.

Succión en venturi

Este método está basado en el principio de conservación de la energía del agua: puesto que la energía mecánica total se mantiene constante, el aumento de la velocidad que se produce en un estrechamiento del conducto obliga, en dicho punto, a una disminución de la presión. Esta depresión succiona los nutrientes, desde un depósito en el que se encuentra la solución de fertilizantes, incorporándolos al sistema de riego.

Figura V.3

SUCCIÓN EN VENTURI



Su implantación se está limitando a explotaciones donde no se dispone de energía eléctrica, lo que resulta asequible porque, al igual que ocurre con otros métodos pasivos, como el tanque fertilizador, no necesitan energía exterior para su funcionamiento.

Un sistema completo de fertirriego con venturis consta de:

- a) Tres depósitos, que se utilizan: uno para los fertilizantes con N - P - K, otro para los que contienen calcio y microelementos, y un tercero para el ácido nítrico, utilizado para regulación del pH y para limpieza del sistema.
- b) Tres venturis que succonan solución de cada uno de los depósitos y la van introduciendo en la red.
- c) Mangueras, llaves de regulación, rotámetros y aparatos de medida de la CE y el pH. Actualmente, estas mediciones se hacen con medidores continuos, lo que facilita el manejo.

La introducción de este sistema supuso un cambio en la concepción del fertirriego. Pudo así controlarse manualmente, en función del tiempo de riego, el aporte de fertilizantes. Este control se puede hacer de tres formas: a) mediante mediciones de pH y CE en el agua de riego con fertilizantes y, en función de éstas, actuando sobre las llaves que regulan los venturis. b) Con mediciones de los caudales de solución incorporados mediante los rotámetros a la salida de los depósitos, manipulando las llaves de regulación colocadas junto a los mismos. Y c) con la combinación de ambos sistemas, que es lo más usual.

Por lo general, el agua entra en el sistema de fertirriego en la tubería de impulsión de la bomba de riego, antes de los filtros, con una presión aproximada de 20 m.c.a. y vuelve a introducirse en la red de riego, ya con los fertilizantes, en el tramo de tubería de la aspiración de la bomba de riego.

Para hacer el aporte de fertilizantes, se preparan las soluciones en los diferentes depósitos, se abren las llaves que comunican el equipo de fertirriego con la red de riego, y se van incorporando las soluciones, por los venturis, al agua de riego. Para que se produzca succión es necesario que exista una mínima diferencia de presión de 5 m.c.a.

Cuando se dispone de energía eléctrica, el equipo de fertirriego con venturis, sin programador, se puede mejorar, con la incorporación de controladores de pH y CE autorregulantes. Estos controlan llaves motorizadas de doble línea de inyección, las cuales permiten que la CE se mantenga constante, sea cual sea el caudal de agua con fertilizantes. Esto se consigue porque dichas llaves motorizadas se abren o cierran en función de la conductividad marcada por la sonda de CE y la prefijada. Para el control del pH, los controladores citados gestionan la inyección, actuando sobre una bomba inyectora o una llave motorizada.

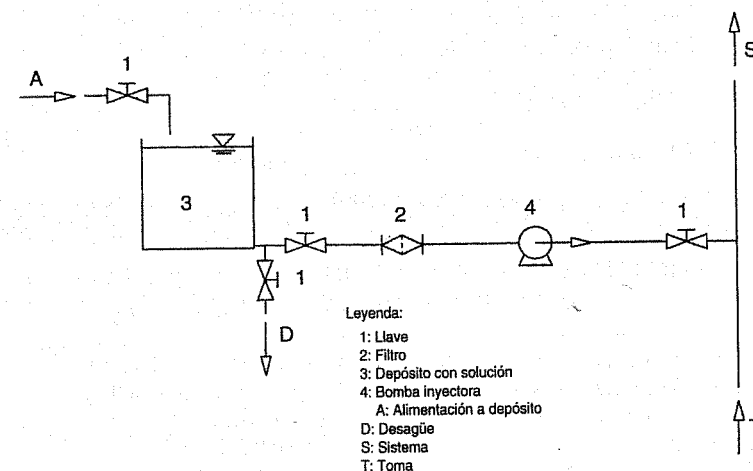
Bomba inyectora

Los tres procedimientos anteriores se pueden agrupar como métodos pasivos, en el sentido que no necesitan un aporte externo de energía para la incorporación de los nutrientes al agua de riego. Por el contrario, la inyección es un método activo, ya que el inyector es una bomba que aplica energía a la solución de fertilizantes, hasta superar la energía de la corriente del agua en la tubería principal del sistema.

La instalación consta, fundamentalmente, de un depósito donde se prepara la solución de fertilizantes y una bomba inyectora, de pistón o membrana, que puede ser hidráulica o accionada por energía eléctrica o por un motor de combustión. Completa el conjunto una serie de accesorios, como removedor en el depósito, mangueras, llaves, controles de nivel, etc.

Figura V.4

BOMBA INYECTORA



Para evitar la entrada de aire en la red de riego, se pueden utilizar varios mecanismos con hidroniveles que impiden que el depósito se vacíe completamente: a) boya, que permite que entre agua en el depósito a partir de que la solución llegue a un determinado nivel. b) Control de nivel en el depósito, que manda una señal eléctrica al inyector, para que se pare. Y c) control de nivel en el depósito, que manda una señal a una electrollave, colocada en el conducto de servicio del depósito, para que entre agua en el mismo.

Los fertilizantes se disuelven en el agua del depósito, usualmente con la ayuda de agitadores. Posteriormente, desde el depósito, la bomba los va inyectando en la red de riego. La inyección de los fertilizantes en el agua de riego se produce así de una forma más gradual y uniforme que con el tanque de fertilización.

4. Apéndice

4.1. Unidades y cambios de unidad

Pasar de un símbolo químico a otro con la misma unidad de masa (mg o g).

Ej: Pasar de K^+ a K_2O

Pm $K^+ = 39,102$; Pm $K_2O = 94,203$

Un átomo de potasio corresponde a media molécula de K_2O

$39,102 \text{ mg } K^+$ corresponden a $94,203/2 = 47,101 \text{ mg } K_2O$;

$1 \text{ mg de } K^+$ corresponde a $47,101/39,102 = 1,205 \text{ mg } K_2O$;

y $1 \text{ mg } K_2O$ corresponden a $39,102/47,101 = 0,830 \text{ mg } K^+$.

$K^+ \times 1,205 = K_2O$

en g o mg

$K_2O \times 0,830 = K^+$

Cuadro V.5

COEFICIENTES PARA PASAR DE UN SÍMBOLO QUÍMICO A OTRO,
CON LA MISMA UNIDAD DE MASA (mg o g)

$N(N-NO_3) \times 4,427 = NO_3^-$	$NO_3^- \times 0,226 = N(N-NO_3)$
$N(N-NH_4) \times 1,288 = NH_4^+$	$NH_4^+ \times 0,776 = N(N-NH_4)$
$P^{1+03+05+} \times 2,291 = P_2O_5$	$P_2O_5 \times 0,436 = P^{1+03+05+}$
$K^+ \times 1,205 = K_2O$	$K_2O \times 0,830 = K^+$
$Ca^{2+} \times 1,399 = CaO$	$CaO \times 0,715 = Ca^{2+}$
$Mg^{2+} \times 1,658 = MgO$	$MgO \times 0,603 = Mg^{2+}$

Pasar de milimoles a miligramos o micromoles. Para pasar de mg a mmol hay que dividir el primero por el peso atómico del ion correspondiente.

Ej: $2,5 \text{ mmol de } Ca^{2+} \rightarrow 2,5 \times 40,08 = 100,2 \text{ mg de } Ca^{2+}$

Ej: $11 \text{ } \mu\text{mol de } Fe^{2+03+} \rightarrow 11 \times 0,0558 = 0,6 \text{ mg de } Fe^{2+03+}$

Pasar de miliequivalentes a miligramos.

Ej: $4,5 \text{ meq de } NO_3^- \rightarrow 4,5 \times 62,004 = 279,02 \text{ mg } NO_3^-$

Pasar de miligramos a miliequivalentes.

Ej: $4,5 \text{ mg de } Ca^{2+} \rightarrow 4,5/20,04 = 0,224 \text{ meq } Ca^{2+}$

Coefficientes para pasar de miligramos a miliequivalentes

$\text{mg } N-NO_3 \times 0,071 = \text{meq } NO_3^-$	$\text{mg } NO_3^- \times 0,016 = \text{meq } NO_3^-$
$\text{mg } N-NH_4 \times 0,071 = \text{meq } NH_4^+$	$\text{mg } NH_4^+ \times 0,055 = \text{meq } NH_4^+$
$\text{mg } K^+ \times 0,026 = \text{meq } K^+$	$\text{mg } K_2O \times 0,021 = \text{meq } K^+$
$\text{mg } Ca^{2+} \times 0,050 = \text{meq } Ca^{2+}$	$\text{mg } CaO \times 0,036 = \text{meq } Ca^{2+}$
$\text{mg } Mg^{2+} \times 0,082 = \text{meq } Mg^{2+}$	$\text{mg } MgO \times 0,050 = \text{meq } Mg^{2+}$

Pasar de milimoles a miliequivalentes.

Ej: $1 \text{ mmol } Ca^{2+} = 40,08 \text{ mg } Ca^{2+} = 2 \text{ meq } Ca^{2+}$

Masa de milimoles y su correspondencia con miliequivalentes Masa de micromoles y su correspondiente con miligramos

$1 \text{ mmol } NO_3^- = 14,007 \text{ mg N } (62,004 \text{ mg } NO_3^-) = 1 \text{ meq } NO_3^-$
$1 \text{ mmol } NH_4^+ = 14,007 \text{ mg N } (18,039 \text{ mg } NH_4^+) = 1 \text{ meq } NH_4^+$
$1 \text{ mmol } P^{1+03+05+} = 30,974 \text{ mg } P^{1+03+05+} (70,971 \text{ mg } P_2O_5)$
$1 \text{ mmol } K^+ = 39,102 \text{ mg } K^+ (47,101 \text{ mg } K_2O) = 1 \text{ meq } K^+$
$1 \text{ mmol } Ca^{2+} = 40,08 \text{ mg } Ca^{2+} (56,079 \text{ mg } CaO) = 2 \text{ meq } Ca^{2+}$
$1 \text{ } \mu\text{mol } Al^{3+} = 0,0270 \text{ mg } Al^{3+}$
$1 \text{ } \mu\text{mol } Co^{2+03+} = 0,0589 \text{ mg } Co^{2+03+}$
$1 \text{ } \mu\text{mol } Cu^{+02+} = 0,0635 \text{ mg } Cu^{+02+}$
$1 \text{ } \mu\text{mol } Fe^{2+03+} = 0,0558 \text{ mg } Fe^{2+03+}$

Pasar de partes por millón a miligramo por litro.

$40 \text{ ppm } Ca^{2+} = 40 \text{ mg/L } Ca^{2+}$

4.2. Fertilizantes empleados y riquezas

Nitrógeno nítrico (NO_3^-) aportado bajo forma de:

- Nitrato de cal: $N-NO_3 = 14,4$; $N-NH_4 = 1,1$; $Ca^{2+} = 19$
- Nitrato potásico: $N-NO_3 = 13$; $K_2O = 46$
- Nitrato amónico: $N-NO_3 = 16,75$; $N-NH_4 = 16,75$
- Ácido nítrico: diversas riquezas ej: $59\% N-NO_3 = 12,6 \text{ (p/p)}$

Nitrógeno amoniacal (NH_4^+) aportado bajo forma de:

- Nitrato amónico: $N-NO_3 = 16,75$; $N-NH_4 = 16,75$;
y en menor cuantía se emplean también:
- Fosfato monoamónico: $N-NH_4 = 12$; $P_2O_5 = 60$
- Sulfato amónico: $N-NH_4 = 21$; $S^{2+04+06+} = 24$

Fósforo aportado bajo formas de:

- Ácido fosfórico: diversas riquezas ej: 70% con un contenido en P_2O_5 ,
 $= 50 \text{ (p/p)}$; 75% con un contenido en $P_2O_5 = 54 \text{ (p/p)}$;
y en menor proporción se utilizan también:
- Fosfato monoamónico: $N-NH_4 = 12$; $P_2O_5 = 60$
- Fosfato monopotásico: $P_2O_5 = 52$; $K_2O = 34$

Potasio aportado bajo forma de:

- Nitrato potásico: $N-NO_3 = 13$; $K_2O = 46$

- Sulfato potásico soluble: $K_2O = 50$; $S^{2+ \cdot 4+ \cdot 6+} = 18$; y en menor proporción:
- Fosfato monopotásico: $P_2O_5 = 52$; $K_2O = 34$

Calcio aportado bajo forma de:

- Nitrato de cal: $N-NO_3 = 14,4$; $N-NH_4 = 1,1$; $Ca^{2+} = 19$

Magnesio aportado bajo forma de:

- Sulfato magnésico: $MgO = 16$; $S^{2+ \cdot 4+ \cdot 6+} = 13$

Azufre de los sulfatos aportado bajo forma de:

- Sulfato potásico soluble: $K_2O = 50$; $S^{2+ \cdot 4+ \cdot 6+} = 18$
- Sulfato magnésico: $MgO = 16$; $S^{2+ \cdot 4+ \cdot 6+} = 13$; y en menor proporción:
- Sulfato amónico: $N-NH_4 = 21$; $S^{2+ \cdot 4+ \cdot 6+} = 24$.

También se emplean, aunque son de uso menos frecuente:

- Fosfato monoamónico - Riqueza: $N-NH_4 = 12$, $P_2O_5 = 60$ y solubilidad de 400 g/L a 24°C.
- Fosfato monopotásico - Riqueza: $P_2O_5 = 52$, $K_2O = 34$ y solubilidad de 230 g/L a 24°C.
- Sulfato amónico - Riqueza: $N-NH_4 = 21$, $S^{2+ \cdot 4+ \cdot 6+} = 24$ y solubilidad de 760 g/L a 24°C.

Micronutrientes.

Normalmente se utilizan *complejos de micronutrientes* en los que habitualmente el hierro, manganeso, cobre y cinc están quelatados y el molibdeno y el boro en forma de sales inorgánicas.

Las concentraciones en las que estos elementos se encuentran oscilan según las casas comerciales; como ejemplo de una de estas soluciones pondremos una cuya composición es: 7,5% hierro, 4% manganeso, 0,3% cobre, 0,5% cinc, 0,5% boro y 0,2% molibdeno. Para el hierro se utilizan también quelatos: Fe-EDDHA, Fe-HEDTA, Fe-DTPA, Fe-EDTA con un contenido en hierro que suele oscilar del 6 al 10%.

CAPÍTULO VI

LA SANIDAD DE LOS CULTIVOS

J. López-Gálvez y J. Carreño

Los insectos, ácaros y otras plagas afectan a la cantidad y a la calidad de la cosecha de las plantas cultivadas. La necesidad de desarrollar programas de prevención y control de plagas resulta evidente si se quiere mejorar la rentabilidad del cultivo.

Las enfermedades infecciosas ocasionan, en no pocos casos, la ruina del agricultor. Las plantas infectadas deben ser rápidamente identificadas y en algunos casos apartadas del campo. La prevención juega un importante papel en el control de las enfermedades, ya que fungicidas y bactericidas no son tan efectivos como insecticidas y acaricidas. Siendo esencial controlar las vías de introducción de estos problemas (estiércol, sustrato, material vegetal, agua de riego y vectores). Para ello, se precisará disponer de invernaderos herméticos y mantener el entorno de la zona de cultivo limpio de plantas huéspedes.

1. Problemas en el semillero

Los principales problemas sanitarios se presentan en la parte aérea de las plantas, aunque también hay daños por enfermedades en la raíz.

La actividad en los semilleros es continua durante todo el año, siendo las épocas de mayor ocupación de mayo a agosto, y de diciembre a febrero, períodos previos a las plantaciones de los cultivos realizados en el ciclo de otoño y de primavera, respectivamente. A continuación se enumeran los principales problemas en esos períodos.

1.1. Problemas sanitarios en el período mayo a agosto

Plagas

Insectos. Destacan en primer lugar los trips, *Frankliniella occidentalis*, seguidos de las moscas blancas, *Trialeurodes vaporariorum* y *Bemisia tabaci*.

La presencia de estos insectos es muy problemática por ser transmisores de virus. Importantes también son los minadores, *Liriomyza* spp.. Y por último, las larvas de lepidópteros noctuidos y pulgones, entre los primeros *Spodoptera* spp., *Heliothis* spp., *Autographa gamma*, *Chrysodeixis chalcites*, etc.; entre los segundos *Myzus* spp., *Aphis* spp., etc.

Ácaros. Raramente son problema, aunque pueden aparecer focos aislados, sobre todo de araña blanca, *Polyphagotarsonemus latus*.

Enfermedades

Hongos. Los más importantes son los que afectan al sistema radical y al cuello de la raíz: *Pythium* spp., *Phytophthora* spp., *Rhizoctonia solani* y muy recientemente en algunos casos *Chalara elegans* o *Thielaviopsis basicola*.

Bacterias. A señalar *Xanthomonas campestris* pv. *vesicatoria*, que afecta principalmente a solanáceas (pimiento).

Virus. Ocasionalmente pueden aparecer problemas por virosis, siendo el más común el virus del bronceado (TSWV) en pimiento.

1.2. Problemas sanitarios en el período diciembre a febrero

Plagas

Insectos y ácaros. Las especies que causan daños son las mismas que en el período de mayo a agosto, aunque con una incidencia menor, iniciándose los problemas hacia finales de febrero. Sólo los trips y las moscas blancas se tratan de una forma preventiva, con mucha menor frecuencia que en el otro período.

Enfermedades

Hongos y bacterias. Además de los hongos, antes citados, que afectan al sistema radical y al cuello de la raíz, se dan casos de *Fusarium oxysporum*, que produce daños en melón. Este cultivo también puede presentar ataques de mildiu, *Pseudoperonospora cubensis* y de *Didymella bryoniae*. En este período se producen daños por bacteriosis en col china y por alternaria, *Alternaria solani*, en sandía, aunque cada vez con menor incidencia. En el caso de las plantas injertadas (de sandía sobre calabaza), el punto de injerto se puede ver afectado por: *Didymella bryoniae*, *Botrytis cinerea* y bacteriosis, problemas que se ven favorecidos cuando se dan condiciones de humedad muy elevada junto a temperaturas suaves. A veces se presentan en los portainjertos de calabaza problemas de oidio, *Sphaerotheca fuliginea*.

2. Problemas en el invernadero

Gran parte de los problemas sanitarios, producidos por plagas o enfermedades, se pueden presentar indistintamente a lo largo de todo el año¹. La mayor incidencia de unos u otros va a depender de la temperatura y/o de la humedad relativa. En los meses calurosos (mayo a octubre), aumentan las plagas. Por el contrario, en los meses de mayor humedad relativa (noviembre a febrero), con máximas absolutas que alcanzan la saturación, es mayor la incidencia de enfermedades. A continuación se relacionan los problemas sanitarios más destacados que presentan los cultivos de invernadero en el área mediterránea de España.

2.1. Plagas de la parte aérea

Trips. La especie más importante por su incidencia económica es *Frankliniella occidentalis*. Afecta a todos los cultivos hortícolas, principalmente a pimiento, tomate y berenjena. Sus ataques son más intensos con temperaturas moderadas. Produce daños sobre frutos, principalmente, pero sobre todo ocasiona pérdidas muy importantes en los cultivos por transmitir el virus del bronceado (TSWV).

Moscas blancas. Dos son las especies que ocasionan daños: *Trialeurodes vaporariorum* y *Bemisia tabaci*. Afectan a todos los cultivos hortícolas. Ambas producen daños directos sobre las hojas al alimentarse, e indirectos al instalarse negrilla o fumagina sobre la melaza que generan, pero han pasado a ser más problemáticas por ser también transmisoras de virus.

Minadores. De entre las distintas especies de *Liriomyza* que afectan a los cultivos destacan: *Liriomyza trifolii* y *Liriomyza huidobrensis*. Causan problemas, fundamentalmente, en judía, tomate, berenjena, pepino, melón y sandía. Los daños los ocasionan las larvas, que al alimentarse dentro de hojas y tallos, producen las galerías que caracterizan a esta plaga.

Larvas de lepidópteros noctuidos. Destaca *Spodoptera exigua* que afecta sobre todo a pimiento, sandía y pepino. Son también importantes *Heliothis armigera* en tomate y los plúsidos *Autographa gamma* y *Chrysodeixis chalcites* que atacan principalmente en tomate, pimiento y judía. Los daños de *Spodoptera* spp. se manifiestan en las hojas, apareciendo éstas con agujeros, o en frutos roídos como ocurre en sandía, o por la penetración de orugas en los frutos, caso del pimiento. *Heliothis armigera* centra sus

¹ Junta de Andalucía (1994), «Sanidad vegetal en la horticultura protegida». Cursos superiores 1/94, coordinador: Ramón Moreno Vázquez.

Sociedad Española de Fitopatología (1994), *Enfermedades de las cucurbitáceas en España*, editores: J. R. DÍAZ y J. GARCÍA-JIMÉNEZ.

ataques, principalmente, en tomate donde roe hojas y penetra en tallos y frutos. Los plúsidus producen sobre todo daños en las hojas por su gran voracidad.

Pulgones. *Myzus persicae* ataca principalmente a tomate, pimiento y calabacín, mientras que *Aphis gossypii* se instala sobre todo en cucurbitáceas: pepino, calabacín, melón y sandía. Ambas plagas producen daños directos sobre las hojas, fundamentalmente a las más jóvenes, provocando deformaciones y enrollamientos; daños indirectos al instalarse hongos del tipo de las fumaginas (negrillas) sobre la melaza que generan; y ocasionan daños muy graves por ser transmisores de virus.

Ácaros. Destaca la araña roja, *Tetranychus urticae*, que afecta principalmente a los cultivos de tomate, berenjena, pepino, judía, melón y sandía; produciendo daños en las hojas fundamentalmente, y en los frutos en judía y sandía. Importantes también son los daños producidos por la araña blanca, *Polyphagotarsonemus latus*, en pimiento, berenjena, tomate, judía y pepino; cultivos en los que ocasiona deformaciones en las hojas menos desarrolladas. Otro ácaro, que afecta sólo a tomate, es el vasates, *Aculops lycopersici*, que produce un color bronceado en tallos y hojas, llegando a desecarlas y agrietamiento en frutos.

2.2. Plagas de la raíz

Nematodos. Son la plaga que tiene mayor incidencia en el sistema radical de las plantas. Entre éstos destacan *Meloidogyne* spp., que provocan graves daños en las raíces, produciéndoles agallas o nódulos e impidiendo su normal desarrollo. Afectan a todos los cultivos, aunque los daños son más graves en pepino, melón, tomate y judía.

2.3. Enfermedades

Las enfermedades más frecuentes en los cultivos bajo invernadero son las producidas por hongos. Éstos llegan a infectar la planta por varias vías: agua de riego, semillas, polvo del suelo transportado por el viento, sustratos orgánicos y bandejas de cultivo contaminadas, restos vegetales abandonados dentro o fuera del invernadero, insectos y el hombre². A continuación se citan los hongos, bacterias y virus que mayores problemas producen.

Hongos. Los hongos se agrupan en este apartado en: a) hongos del suelo y b) hongos aéreos, según el lugar de la planta donde se manifiestan

sus daños. Los primeros lo hacen en cuello de la raíz, sistema radical y sistema vascular, mientras que los segundos aparecen en los órganos aéreos.

a) Hongos del suelo. *Pythium* spp., *Phytophthora* spp. y *Rhizoctonia solani*, producen daños que se localizan en el cuello de la raíz, provocando distintas formas de podredumbres. Se ven afectados por alguno o varios de los hongos citados los cultivos de: pepino, calabacín, judía, tomate, pimiento, berenjena, melón y sandía. Otra grave enfermedad de suelo es provocada por *Fusarium oxysporum* en cultivos de: tomate, melón y sandía, produciendo graves daños vasculares. Se dan casos de verticiliosis, provocados por *Verticillium dahliae*, sobre todo en cultivos de berenjena, ocasionando daños en el sistema vascular. En cultivos en sustratos (judía, melón y sandía) se presentan ataques de *Chalara elegans*, que ocasiona una podredumbre negra del sistema radical³.

b) Hongos aéreos. Los hongos aéreos más frecuentes son:

Botrytis cinerea, provoca una podredumbre blanda y gris en cualquier órgano aéreo de la planta. Todos los cultivos hortícolas pueden verse afectados por esta enfermedad, siendo más frecuente en: tomate, pimiento, berenjena, pepino, calabacín y judía.

Sclerotinia sclerotiorum, al igual que la especie anterior afecta a todos los órganos aéreos de la planta, produciendo podredumbres blandas, en la mayoría de los cultivos.

Pseudoperonospora cubensis, causante del mildiu de las cucurbitáceas, produce graves daños en pepino, melón y, ocasionalmente, en sandía, produciendo manchas en las hojas.

Sphaeroteca fuliginea productora del oidio de las cucurbitáceas. Los daños se localizan fundamentalmente en las hojas, donde se instalan formando manchas blancas con aspecto polvoriento.

Leveillula taurica, origina la oidiopsis, produce daños principalmente en pimiento y tomate, formando manchas en las hojas.

Phytophthora infestans, causante del mildiu del tomate, provoca daños en tallos, hojas y frutos.

Didymella bryoniae, afecta principalmente a pepino, melón y sandía, cultivos en los que ocasiona podredumbres en tallos y frutos, así como manchas en las hojas.

Alternaria spp., las solanáceas (tomate y berenjena) son las más afectadas por este hongo, siendo sus síntomas manchas en hojas, tallos y frutos.

² GÓMEZ VAZQUEZ, J. (1993), *Sanidad fúngica de los semilleros*, Comunicación I+D Agroalimentaria 1/93, 26 pp., DGIT y FA y P. Junta de Andalucía.

³ APARICIO SALMERÓN, V., M. D. RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, V. GÓMEZ GARCÍA, E. SAEZ ALONSO, J. E. BELDA SUÁREZ, E. CASADO RAMÍREZ, J. LASTRES GARCÍA-TESTÓN y M. TORRES GIL (1995), *Plagas y enfermedades de los principales cultivos hortícolas de la provincia de Almería: control racional*, Comunicaciones I+D Agroalimentaria 11/95, 260 pp., Dirección General de Investigación Agraria, Junta de Andalucía.

Bacterias. Entre las bacterias que ocasionan enfermedades y daños importantes, destacan:

Pseudomonas corrugata, ocasiona daños en tomate, provocando en los tallos la «médula negra».

Xanthomonas campestris pv. *vesicatoria*, provoca daños particularmente en pimiento, produciendo manchas necróticas en hojas y frutos.

Xanthomonas campestris pv. *cucurbitae*, afecta a pepino, apareciendo manchas en las hojas.

Pseudomonas syringae pv. *lachrymans*, en cucurbitáceas, ocasiona podredumbres y manchas.

Pseudomonas syringae pv. *tomato*, afecta a tomate, produciendo manchas en hojas, tallos y frutos.

Erwinia carotovora subsp. *carotovora*, ataca fundamentalmente a calabacín y a tomate, ocasionando daños a los tallos y, en menor medida, a los frutos.

Virus. Los virus ocasionan daños importantes en los cultivos. No pueden invadir las plantas por sí solos, necesitan agentes transmisores, llamados vectores, u otras condiciones, como heridas, que les permitan penetrar en los organismos donde deben vivir. Entre los que afectan a los cultivos hortícolas merecen especial mención los siguientes, que se han agrupado según su forma de transmisión:

Por trips. Éstos transmiten el virus del bronceado del tomate, TSWV, «Tomato Spotted Wilt Virus», que ocasiona grandes daños en pimiento y tomate.

Por el hongo del suelo *Olpidium radicale*, y por semillas⁴. Son los transmisores del virus del cribado del melón, MNSV, «Melon Necrotic Spot Virus», que afecta a melón y sandía.

Por moscas blancas. *Trialeurodes vaporariorum* es el agente transmisor del virus del amarilleamiento del pepino, CuYV, «Cucumber Yellow Virus», que provoca daños en pepino, melón y calabacín. *Bemisia tabaci* transmite el virus del rizado amarillo del tomate, también llamado virus de la cuchara del tomate, TYLCV, «Tomato Yellow Leaf Curl Virus», que afecta a tomate, produciendo, entre otros síntomas, la característica deformación de las hojas parecida a una cuchara.

Por pulgones. Éstos son vectores de los siguientes virus:

Virus del mosaico del pepino, CMV, «Cucumber Mosaic Virus», que ocasiona daños en solanáceas (pimiento) y en cucurbitáceas (melón).

⁴ JUÁREZ, M., A. ORTEGA y C. JORDA (1994), «Variabilidad del virus del cribado. Un enemigo de las Cucurbitáceas en expansión en España», *Hortofruticultura*, 11, pp. 37-40.

Virus Y de la patata, PVY, «Potato Virus Y», que produce alteraciones en solanáceas, sobre todo en pimiento.

Virus del mosaico amarillo del calabacín, ZYMV, «Zucchini Yellow Mosaic Virus», que afecta a cucurbitáceas.

Virus del mosaico de la sandía-2, WMV-2, «Watermelon Mosaic Virus-2», que provoca daños en cucurbitáceas.

Por heridas, ocasionadas en operaciones culturales o por el roce o contacto entre las hojas de las plantas. Son las vías de entrada del virus del moteado suave del pimiento, PMMV, «Pepper Mild Mottle Virus», que afecta a este cultivo. Y también del virus del mosaico del tomate, ToMV, «Tomato Mosaic Virus». Estos virus también se transmiten por las semillas.

Por semillas. En ellas se transmiten el virus del mosaico de la calabaza, SqMV, «Squash Mosaic Virus». También el virus del mosaico del tabaco, TMV, «Tobacco Mosaic Virus», que afecta a pimiento⁵. Así como los virus citados anteriormente: MNSV, PMMV y ToMV.

Independientemente de lo anteriormente citado, conviene tener en cuenta que hay un conjunto de daños: necrosis apical, asfixia radicular, clorosis, etc., que no tienen su origen en agentes bióticos o infecciosos. Son producidos por un mal manejo de los cultivos y/o por malas condiciones ambientales o de suelo: golpes de sol, heladas, encharcamientos, fitotoxicidad, carencias, etc.

3. Control sanitario

En la sanidad de los cultivos intervienen, entre otras causas: el área de cultivo, la variedad, la calidad de las semillas, el manejo de las plantas en el semillero, la fecha de siembra o plantación, la densidad y marco de siembra o plantación, el manejo del cultivo, las características y manejo del invernadero y por supuesto la formación profesional del agricultor y el asesoramiento técnico. Con el fin de minimizar los problemas sanitarios de los cultivos es conveniente combinar diferentes formas de control, pudiendo recurrirse a: productos fitosanitarios, medios físicos (como el empleo de mallas antitrips, materiales plásticos en suelo y en recubrimiento de depósitos reguladores de agua, etc.), lucha biológica y medidas culturales. Cuando los cultivos se encuentren afectados por algún problema, se deberá realizar un diagnóstico de la causa, siendo preciso contar

⁵ CUADRADO GÓMEZ, I. M., E. SAEZ ALONSO y E. JUAN RODRÍGUEZ (1993), «Diagnóstico específico de razas de virus del mosaico del tabaco (TMV) en pimiento. I. Identificación de las razas del TMV que están afectando los cultivos de pimiento en Almería», *Información Técnica*, n.º 20/92, 36 pp., D.G.I.T. y F.A. y P. Junta de Andalucía.

con una buena asistencia técnica. Entre las prácticas utilizadas, para controlar las plagas y enfermedades y mantener los cultivos con un grado de sanidad aceptable, destacan las siguientes:

- El empleo de variedades con resistencia o tolerancia a enfermedades y a plagas (por ejemplo determinadas variedades de tomate resistentes a algunos nematodos)

- La adquisición de semillas con control sanitario y desinfectadas.

- La utilización de plantas de semillero sanas.

- La elección de ciclos de cultivo que eviten épocas de gran riesgo, como ocurre con las siembras tempranas de calabacín en verano, que son más sensibles a tener problemas de virosis.

- La adopción de densidades de plantación y podas adecuadas.

- La mejora de las condiciones ambientales de los invernaderos, para lo que se precisa dotarlos de sistemas de ventilación, con el fin de bajar la humedad relativa y mejorar las temperaturas extremas.

- La eliminación de restos de plantas y frutos atacados, así como de malas hierbas, tanto dentro del invernadero como en su entorno, para evitar que hagan de reservorios y fuentes de inóculo en el caso de las enfermedades, o de focos de infestación en el caso de las plagas.

- La utilización de plantas injertadas para evitar problemas con origen en el suelo, práctica muy extendida en el cultivo de la sandía.

- El cerramiento de balsas y canalillas para impedir la contaminación del agua de riego.

- El control del riego para evitar que se produzcan excesos de humedad y encharcamientos.

- La protección del suelo con plástico, grava u otro material que impida que salpique tierra a las plantas o a los sustratos, llevando inóculo de hongos.

- La desinfección de las herramientas utilizadas para recolecciones o podas.

- El control químico, que es la forma más utilizada en la actualidad. La mayor concienciación de los consumidores sobre los efectos nocivos de los productos fitosanitarios y la creciente racionalización en su empleo por parte de los agricultores (mejor conocimiento del problema y mayor rendimiento de aplicación), está provocando un doble efecto. De una parte, que otros métodos vayan ganando terreno, y de otra que se empleen menos cantidades de agroquímicos. La adecuada utilización de productos fitosanitarios debe tener presente los siguientes puntos:

- a) Los problemas sanitarios producidos por enfermedades deben tratarse de forma preventiva o al aparecer los primeros síntomas.

- b) El control de un problema determinado se hará utilizando los productos específicos, debiendo evitar aquellos que sean agresivos con la

fauna auxiliar (depredadores o parasitoides) así como con insectos (abejas o abejorros) necesarios en la polinización de distintas especies.

- c) La repetición sucesiva de un producto no es conveniente, siendo adecuado alternar entre distintas materias activas para evitar resistencias.

- d) Los productos utilizados deben estar indicados para los cultivos a tratar, respetando los plazos de seguridad.

- e) Las mezclas de diferentes productos pueden acarrear problemas de fitotoxicidad.

En los semilleros, para hacer frente a los problemas sanitarios, se emplea, casi exclusivamente, la lucha química, por varios motivos, entre los que destacan: los plazos de seguridad, de prácticamente la totalidad de los productos fitosanitarios, no son un limitante para su utilización; intentan evitar la presencia de plagas que son vectores de transmisión de virosis, por lo que no se plantean la lucha biológica como un complemento a la lucha química. La elevada vulnerabilidad de las plantas por su pequeño tamaño, unida a un medio de cultivo muy favorable para el desarrollo de algunos de los problemas citados, da lugar a que los tratamientos se hagan de forma preventiva y con gran frecuencia. Actualmente la lucha química se está haciendo con un número muy limitado de materias activas de insecticidas, en torno a una docena, y con aproximadamente el triple de materias activas de fungicidas. Para favorecer las condiciones sanitarias de los semilleros se presta una especial atención a la estanqueidad o hermetismo de los invernaderos, utilizando para ello mallas antitrips y, en algunos casos, estructuras más sofisticadas.

3.1. Desinfección del suelo y de los sustratos

Para evitar problemas sanitarios en los suelos y sustratos lo aconsejable sería hacer una rotación de cultivos en la que se alternen distintos géneros (solanáceas, cucurbitáceas, crucíferas) y especies.

La determinación del estado sanitario del suelo es difícil, decidiendo la conveniencia o no de realizar la desinfección en función de la sintomatología del cultivo precedente. En el caso de los cultivos bajo invernadero la desinfección se suele realizar preventivamente y casi todos los años. Los métodos utilizados son los siguientes:

- Incorporación al agua de riego de productos fitosanitarios. Usualmente antes de hacer la desinfección se pone el suelo en tempero, regando aproximadamente con una semana de antelación. Tanto este riego, como el de aplicación de los productos, suele ser por goteo, ya que en la mayoría de los invernaderos no se pueden hacer por inundación, como sería deseable. El goteo no hace una desinfección de toda la superficie e incluso

puede haber problemas de exceso de producto en las áreas donde se aplica. Los productos más utilizados son el Dicloropropeno, contra nematodos, y Metam Potasio y Metam Sodio con un efecto polivalente: nematicida, insecticida, fungicida y herbicida, en función de la dosis que se emplee.

– Solarización sola o solarización más aplicación de productos fitosanitarios. La solarización se ha desarrollado en los últimos años. Consiste en colocar sobre el suelo, previamente regado, un plástico transparente, normalmente de 40-50 micras, durante un mínimo de 45 días a dos meses, que suelen ser los de junio, julio o agosto. La solarización debe realizarse inmediatamente después de quitar el cultivo, para que la actividad de la fauna y flora del suelo no haya disminuido. Es una técnica que se está extendiendo año tras año, aunque no suele hacerse sola, sino en combinación con la aplicación de los desinfectantes enumerados en el punto anterior.

– Aplicación de Bromuro de Metilo más Cloropicrina. Puede aplicarse en frío o en caliente. Previamente a su incorporación se pone el suelo en tempero, regando aproximadamente una semana antes. Normalmente se encargan de su aplicación empresas especializadas, que suelen calentar el producto para favorecer su distribución. Se colocan plásticos, normalmente de 25 micras, sobre el suelo en la mitad de la superficie a desinfectar, y luego se cambian de lugar cubriendo la otra mitad de la superficie. Estas desinfecciones son polivalentes y muy eficaces cuando se hacen correctamente, aunque después de varias desinfecciones de este tipo, al eliminar en los suelos toda la actividad biológica, tanto la negativa como la positiva, las reinfecciones que se producen obligan a hacer desinfecciones cada dos o tres años. Por otra parte, el bromo es un producto que en algunos cultivos puede aparecer en los tejidos vegetales; también al liberarse a la atmósfera interviene en la destrucción de la capa de ozono, por estos motivos se está limitando su uso⁶.

3.2. Los productos fitosanitarios

El total de materias activas disponibles en el mercado español supera en la actualidad las 420, contando los usuarios con una amplia gama donde elegir⁷.

En función de su utilización, los productos fitosanitarios se clasifican en diferentes grupos: insecticidas, fungicidas, acaricidas, nematicidas, bactericidas, herbicidas, etc.

⁶ DUCOM, P., J. FRITSCH, A. BAUDRY, J.-P. MORZIÈRES y M. GUINET (1995), «La désinfection des sols et des substrats au bromure de méthyle: situation actuelle et perspectives», *PHM Revue Horticole*, Février, 356: pp. 6-14.

⁷ LIÑÁN, C. (1994), *Vademecum 1995 de productos fitosanitarios y nutricionales*, Liñán ed., Madrid.

Los insecticidas son los productos más utilizados, seguidos de los fungicidas⁸. Dentro del grupo de los insecticidas se están poniendo en el mercado, desde finales de los años 80, nuevos productos, como los reguladores del crecimiento de los insectos (RCI), que pretenden ser selectivos contra la plaga a combatir y más respetuosos con el hombre y el ambiente. Estos agroquímicos han venido a sumarse a los biológicos, como el *Bacillus thuringiensis*, siendo cada vez más utilizados, de forma que están desplazando a las formulaciones clásicas de clorados, carbamatos, fosforados y piretroides. En fungicidas se tiende a utilizar productos sistémicos y al abandono de inorgánicos+carbamatos. Los fungicidas sistémicos tienen mayor selectividad que los no sistémicos y se pueden aportar de forma localizada sin perder eficacia, siendo posible aplicarlos conjuntamente con enemigos naturales.

Actualmente hay dos tendencias en la programación del control sanitario de los invernaderos:

- a) Aplicación de productos fitosanitarios de forma preventiva.
- b) Aplicación de productos cuando se observa el problema.

La última tendencia es la más generalizada en los invernaderos pasivos de bajo coste de inversión.

3.3. Métodos de aplicación

Hay numerosos métodos de aplicación de los productos fitosanitarios, siendo los más usuales: la pulverización, el «cacharreo», la aportación de productos mediante el sistema de riego, el espolvoreo, la nebulización y la fumigación. Cada método tiene sus ventajas e inconvenientes y algunos (caso del espolvoreo) requieren formulaciones específicas de pesticidas.

La pulverización es la forma predominante. Consiste en mezclar los productos con un líquido, normalmente agua, y después distribuir el caldo sobre el cultivo. Para su ejecución las explotaciones suelen contar con instalaciones fijas, compuestas por un depósito o «balsilla», donde se prepara el caldo, la bomba, de membrana o de pistón, y una red de tubería, de hierro galvanizado o de polietileno de alta densidad, que se distribuye por los invernaderos, existiendo en cada uno de ellos llaves de control, a las que se conecta una manguera flexible que lleva en su extremo la «pistola» o

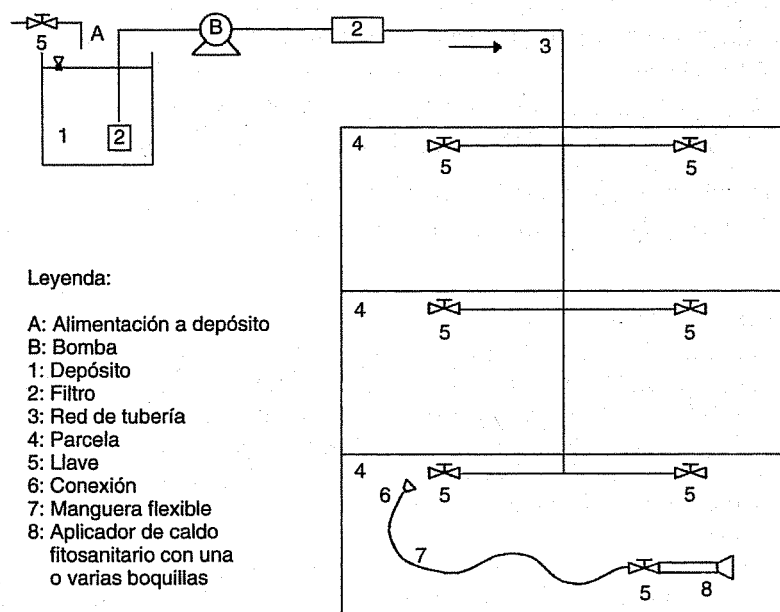
⁸ Agro noticias C-G, *Mercado español de fitosanitarios*, 1994. Año VII, abril 1995, n.º 27: 16 pp.

LÓPEZ-GÁLVEZ, J., J. SÁNCHEZ y E. VIÑUELA (1990), «El uso de productos fitosanitarios en un cultivo de pimiento bajo abrigo plástico, en Almería», *Phytoma España*. n.º 151 pp. 3-19.

«lanza» que aplica el caldo fitosanitario (ver figura VI.1). Éste se introduce en la red a presiones que oscilan entre 30 a 35 kg/cm² en el caso de bombas de membrana, y a unos 40 kg/cm² cuando son bombas de pistón y sale por las boquillas a una presión de 15 a 20 kg/cm². En algunos casos las explotaciones tienen cubas arrastradas por tractores. Cuando los cultivos son pequeños se suelen emplear pulverizadores manuales de mochila para las pulverizaciones.

Figura VI.1

INSTALACIÓN FIJA PARA TRATAMIENTOS POR PULVERIZACIÓN



El «cacharreo» consiste en aplicar los caldos fitosanitarios, sin presión, en los cuellos de las raíces de las plantas. Se suele hacer empleando el equipo de pulverización y, en algunos casos, un cubo del que se va tomando, con un pequeño recipiente, la cantidad de caldo que se aplica a cada planta. Esta forma de aplicación se utiliza fundamentalmente para la realización de tratamientos con fungicidas preventivos de problemas que afectan al cuello de la raíz de plantas jóvenes.

La incorporación de productos fitosanitarios mediante el sistema de riego, para su aplicación a los cultivos, es una práctica usual con algunos productos. Para que el tratamiento aplicado resulte eficaz, es muy importante que la instalación de riego por goteo tenga una buena uniformidad. Entre los productos fitosanitarios que más frecuentemente así se aplican destacan los nematicidas, siendo los más utilizados el Fenamifos y el Oxa-milo, y los productos fitosanitarios con acción fungicida contra hongos que actúan en el cuello de la raíz o en el sistema radical, como son Propa-mocarb, Benomilo o Etridiazol. A veces se aplican juntos en el mismo riego el Propamocarb y el Metil Tiofanato. Otros productos, todos sisté-micos, que frecuentemente se aplican de este modo son el fungicida antioidio Etirimol y los insecticidas Círomazina e Imidacloprid.

El espolvoreo como forma de aplicación de productos fitosanitarios es una técnica cada vez menos empleada. Tuvo un resurgir importante en la segunda mitad de los años ochenta, fundamentalmente para combatir los ataques de trips, que tuvieron una cierta virulencia en buena parte del territorio español, ya que produce una mejor cobertura de las plantas que la pulverización. Los equipos más utilizados son espolvoreadores con mochila y con motor, aunque cuando los cultivos son pequeños se suele utilizar el «saquillo», que consiste en un saco de arpillera lleno del polvo para espolvoreo, que se sacude sobre las plantas.

La nebulización de productos fitosanitarios, realizada con nebulizadores térmicos, llamados «cañones», se utilizó en la época antes citada y por el mismo motivo. Actualmente ha disminuido mucho el empleo de esta forma de aplicación. Normalmente, las explotaciones no tienen el equipo necesario, que se contrata conjuntamente con el trabajo de aplicación de los productos fitosanitarios.

La fumigación es la aplicación de un gas, sólo se utiliza, de una forma generalizada, para la aplicación del Bromuro de Metilo más Cloropicrina, que ya ha sido descrita. La peligrosidad que implica la manipulación de este producto, además de la necesidad de disponer del equipo necesario (caldera con serpentín y báscula) hace que su aplicación se contrate con empresas especializadas.

3.4. El control integrado

El control integrado se fundamenta en el empleo simultáneo de medios biológicos y químicos, además de técnicas culturales, para mejorar la sanidad de los cultivos. La finalidad pretendida es ofrecer cosechas menos contami-nadas por residuos de pesticidas, y la mejora ambiental. Esta práctica aún no está suficientemente implantada entre los productores españoles. No obs-tante sus perspectivas de evolución a medio plazo son elevadas, porque hay un gran interés comercial e institucional en su desarrollo y puesta a punto.

La lucha biológica recurre a la fauna auxiliar (depredadores y parasitoides) y a la aplicación de productos biológicos (patógenos) con la finalidad de que las poblaciones de plagas no afecten la productividad de los cultivos. Los depredadores más empleados son: *Phytoseiulus persimilis* contra *Tetranychus urticae*; *Amblyseius* spp. y *Orius* spp. contra trips; *Aphidoletes aphidimyza*, *Chrysoperla carnea* y *Coccinella septempunctata* contra pulgones. Los parasitoides más utilizados son *Aphidius matricariae* contra pulgones; *Dacnusa sibirica* y *Diglyphus isaea* contra minadores y *Encarsia formosa* contra la mosca blanca *Trialeurodes vaporariorum*. Entre los patógenos utilizados destaca *Bacillus thuringiensis* contra lepidópteros.

El óptimo de reproducción de las especies anteriores requiere de unas adecuadas condiciones ambientales. Las condiciones, que deben reunir los invernaderos pasivos, para que la lucha biológica pueda aplicarse con alguna eficacia, son:

- Material de cerramiento sin perforar.
- Suficiente ventilación.
- Evitar entrada de plagas y vectores cerrando las aberturas con la malla adecuada.
- Conseguir condiciones de temperatura y humedad que permitan a la fauna, aportada al campo de cultivo, vivir y reproducirse.

Además de:

- Mantener limpio el entorno de la zona de cultivo.
- Cuidar las medidas higiénicas relacionadas con las operaciones culturales.

Para controlar las enfermedades, por ahora, se puede recurrir a medidas culturales, productos químicos, material vegetal mejorado genéticamente y otras medidas, como puede ser el empleo de materiales plásticos fotoselectivos para impedir el desarrollo de determinadas enfermedades fúngicas⁹.

4. Apéndice

4.1. Materias activas más utilizadas

Insecticidas, acaricidas y nematocidas

Para trips: Formetanato, Metamidofos, Acrinatrín, Metiocarb, Malation, etc.

Para larvas de lepidópteros noctuidos: Flufenoxuron, Hexaflumuron, *Bacillus thuringiensis*, etc.

Para moscas blancas: Imidacloprid, Metomilo, Buprofezin, etc.

Para pulgones: Imidacloprid, Pirimicarb, etc.

Para minadores: Abamectina, Ciromazina, etc.

Para araña roja: Abamectina, Amitraz, etc.

Para vasates del tomate: Abamectina, Endosulfan+Azufre, Bromopropilato, etc.

Para araña blanca: Endosulfan, Dicofol, Azufre, Bromopropilato, etc.

Para nematodos: Dicloropropeno, Fenamifos, Oxamilo, Carbofurano, Bromuro de metilo+Cloropirina, etc.

Fungicidas y bactericidas

Para podredumbres provocadas por *Botrytis cinerea*, *Sclerotinia Sclerotiorum* y *Didymella bryoniae*: Procimidona, Iprodiona, Benomilo, Carben-dazima, Dietofencarb, Tebuconazol, Vinclozolina, Pirimetanil, Metil Tiofanato, Clozolinato, etc.

Para oidio y oidiopsis: Quinometionato, Etirimol, Triadimenol, Ciproconazol, Penconazol, Pirifenox, Tetraconazol, Azufre, Bupirimato, Fenarimol, Nuarimol, Hexaconazol, etc.

Para mildiu: Metalaxil, Oxadixil, Mancozeb, Benalaxil, Fosetil-Al, Diclofluanida, Cimoxanilo, Ofurace, etc.

Para alternaria: Difenconazol, Cimoxanilo, Mancozeb, Polioxina-B, Oxadixil, etc.

Para hongos del suelo: Propamocarb, Pencicuron, Etridiazol, Metil Tolclofos, Metil Tiofanato, Benomilo, Carbendazima, Quinosol, Flutolanil, Tiram, Bromuro de metilo+Cloropirina.

Para bacterias: Cobre principalmente en forma de oxiclورو, Kasugamicina, etc.

⁹ HONDA Y., T. TOKI y T.YUNOKI (1977), «Control of gray mold of greenhouse cucumber and tomato by inhibiting sporulation», *Plant Disease Report*, vol. 61, n.º 12, december 1977.

CAPÍTULO VII

EL ANÁLISIS ECONÓMICO Y AMBIENTAL

J. M. Naredo y J. López-Gálvez

1. Introducción

Originariamente, la producción agraria se consideraba fruto de una unión entre el Cielo y la Tierra. Las prácticas agrícolas mantuvieron durante largo tiempo un sentido ritual orientado a facilitar tal unión con ánimo de acrecentar su productividad¹. La actitud de colaboración con la naturaleza, coherente con esas visiones creacionistas, se mantuvo hasta bien entrado el siglo XVIII². Sin embargo, la aceptación del principio de conservación de la energía y la materia, supuso el abandono de las ideas creacionistas y sirvió de base para el nacimiento de la química agrícola³. Tras milenios de considerar a la Madre-Tierra como fuente de toda riqueza, se pasó a verla como una simple reserva de agua y de nutrientes: el balance de estos elementos acabó erigiéndose en el instrumento básico del razonamiento agronómico. La inicial veneración de la Madre-Tierra se tornó así en ignorancia de sus funciones, preocupando sólo lo que entraba y salía de ella, objeto de registro en el balance. El mismo Justus von Liebig, padre de la química agrícola, pensaba a mediados del siglo pasado, que la sostenibilidad de la agricultura dependía de que se pudiera cerrar el ciclo de nutrientes devolviendo a los campos la materia orgánica que de ellos había salido.

¹ Copérnico en *De revolutionibus* y Aristóteles en *De animalibus* recogían la misma idea: «La tierra concibe por el sol y de él queda preñada, dando a luz todos los años». Esta visión organicista del mundo, que describe Platón en su *Timeo*, predominó desde la Antigüedad hasta el advenimiento de la moderna ciencia experimental.

² El nacimiento de la agronomía como ciencia se sitúa en el período que va desde la publicación de los *Principia* de Newton en 1687, hasta la del *Traité élémentaire de chimie* de Lavoisier en 1789.

³ Boussingault, Mulder y Liebig fundaron la química agrícola sobre el principio de conservación de la energía y la materia. Siendo el más reputado padre de la agricultura química Justus von Liebig en su libro básico *La química aplicada a la agricultura y a la fisiología*, 1840.

La obtención, el desarrollo y la aplicación de fertilizantes sintéticos, acaecido tras la Segunda Guerra Mundial en el marco de la llamada «**revolución verde**», alejó el fantasma de la escasez de recursos sentido con anterioridad, posibilitando la reposición de los nutrientes extraídos por las cosechas sin pensar ya en cerrar el ciclo de materiales. Junto al esquema del balance, se impuso la «ley de mínimos», como guía de la gestión de los cultivos: se trataba de identificar en el suelo aquellos elementos cuya penuria limitaba el desarrollo de las plantas para suplir, mediante el riego y el abonado, esos factores limitantes.

En estrecha analogía con el enfoque agronómico del balance y la ley de mínimos, acabó surgiendo el enfoque económico de la «función de producción». Esta función establecía la relación formal entre las *entradas* de factores y las *salidas* de producto, sin referencias a lo que ocurría dentro y fuera del proceso. Multiplicando las cantidades de factores aplicados y de productos obtenidos por sus precios respectivos se llegaba a las funciones de coste y de ingreso, cuya diferencia arrojaba el margen de beneficio que el análisis económico trataba de maximizar. Es decir, se trasladaba así el problema a términos monetarios estableciendo una ley de conservación del valor y un principio de maximización (sujetos a las restricciones técnicas derivadas de la función de producción). En general, el reducido peso de los fertilizantes y el agua en el coste de los cultivos indujo a no escatimar su uso, asociando rendimiento y beneficio en el proceso de maximización indicado.

Pero a la vez que decayeron las preocupaciones iniciales sobre la escasez de recursos, empezaron a surgir otras sobre el exceso de residuos: se vio que el empleo masivo y continuado de agroquímicos podía llevar a la «mineralización» o pérdida de estructura de los suelos, y a la contaminación de las aguas por lixiviación de los productos aplicados. Tras más de un siglo de razonar con la «ley de mínimos» y de sugerir a los agricultores la conveniencia de reponer con largueza las extracciones de las plantas, la mayor sensibilidad por el deterioro de los suelos y las aguas está empujando ahora a mejorar la eficiencia del regadío y de los fertilizantes para definir los topes «máximos» recomendables de riego y abonado capaces de compatibilizar, en cada cultivo, rendimientos elevados con contaminación reducida.

Los cambios tan radicales que conlleva el paso de sistemas agrarios «tradicionales» a «modernos» hacen que el aparato conceptual del balance, en agronomía, y de la función de producción, en economía, resulte insuficiente para su comparación. En efecto, en los sistemas «tradicionales» los agricultores trataban de colaborar con la Madre-Tierra en la reposición en ciclo cerrado de la mayoría de los insumos. En los «modernos» se cuenta lo menos posible con la Madre-Tierra tendiendo a comprar los medios de producción y a vender los productos, al igual que ocurre en las plantas

industriales. Esta equiparación culmina en el caso de la ganadería en estabulación permanente y de la agricultura hidropónica (en la que se compra todo lo que se incorpora al proceso de producción, incluido el CO₂ en el último caso). El análisis para la comparación de estos sistemas agrarios con los tradicionales, precisa, para su correcta interpretación, de la modelación de su funcionamiento físico con independencia de su proyección económico-mercantil. Para ello, es necesario echar mano de la ecología (y las ciencias de la naturaleza por ella utilizadas) y no sólo de la agronomía del balance y de la economía de la función de producción. En definitiva, estos instrumentos se revelan excesivamente simples para explicar el funcionamiento y de la evolución de sistemas biológicos tan complejos como son los agrarios. Como veremos, este excesivo esquematismo se hace sentir con fuerza incluso en la comparación de sistemas de cultivo, tan simples y artificiales, como la que se lleva a cabo en la parte especial de este volumen.

2. Objeto

Los capítulos anteriores han pasado revista al estado de las técnicas de cultivo orientadas a aportar las condiciones de microclima, de prácticas de cultivo, de suelo, de agua, de nutrientes y de sanidad necesarias para que las plantas puedan prosperar. Este capítulo versa sobre cuáles han de ser los enfoques económicos que permiten enjuiciar cada uno de esos aspectos parciales, en relación con el proceso productivo global en el que intervienen.

Empezaremos recordando que para discutir y comparar la economía de varios procesos, conducentes a una misma finalidad productiva, es necesario precisar bien dónde empiezan y dónde terminan los mismos. Aclarar estos extremos, tanto en términos físicos como monetarios, resulta fundamental para evitar la confusión en que se incurre cuando se comparan procesos que persiguen la misma finalidad, pero que tienen exigencias y consecuencias cuantitativa o cualitativamente diferentes. Sobre todo cuando, al alterar los límites del análisis, surgen resultados contradictorios en el enjuiciamiento de dichos procesos, invalidando las excesivas pretensiones de generalidad que, en ocasiones, revisten los razonamientos parciales. Por ejemplo, si queremos comparar la economía de tres plantas generadoras de energía eléctrica, una hidroeléctrica, otra térmica y otra nuclear, hemos de llevar el análisis más allá del funcionamiento físico y monetario de las plantas en sí, para ocuparnos de las muy diferentes exigencias y consecuencias de dichas plantas. La primera de ellas, al apoyarse en una energía renovable, una vez implantada no requiere recursos ni genera residuos, por lo que el análisis ha de limitarse a la propia vida de la planta. Sin embargo, la segunda reclama el uso y deterioro de combustibles fósiles y la

emisión de contaminantes atmosféricos, por lo que la generalización de este tipo de instalaciones origina trastornos climáticos con consecuencias tan amplias como imprevisibles. Y la tercera, no sólo se nutre también de determinados reservas de minerales concentrados en la corteza terrestre, sino que entraña mayores riesgos de funcionamiento y, sobre todo, origina residuos tóxicos y peligrosos, algunos de los cuales permanecen activos durante milenios, con consecuencias todavía más amplias e imprevisibles que la anterior. El conocimiento de estos extremos resulta clave para informar sobre los juicios de valor que comporta este tipo de decisiones, que no puede evitar el estudio de unos costes monetarios influidos en cada caso por las peculiaridades del marco institucional y del tratamiento que se quiera dar a la custodia de los residuos o a la estimación de posibles daños.

Normalmente, se entiende por «ambiente» de un proceso productivo el medio físico en que éste se desarrolla. Viene determinado por los *recursos* que existían antes de haber sido valorados y utilizados en dicho proceso, y por los *residuos* que éste devuelve al medio físico cuando ya, por definición, carecen de valor. Aspectos éstos que, unidos al deterioro del medio físico que origina su manejo (por ejemplo, por lavado de nitrógeno, erosión, etc.), suelen escapar del universo de la economía ordinaria. El análisis ambiental surge así, como objeto de estudio, de la cortedad de miras de ese enfoque económico usual y se diluye cuando adoptamos uno más amplio y abierto. El «ambiente» no debe tomarse como un «sector» más a analizar tras revisar los aspectos productivos de un proceso. La clave de un análisis económico-ambiental acertado reside en la aplicación de enfoques multidimensionales que faciliten el cruce de los distintos niveles de análisis, evitando que alguno eclipse a los demás y oscurezca las posibles contradicciones observadas entre ellos.

Caben dos formas de llevar la reflexión económica sobre las cuestiones ambientales. Una, tratando de valorar las «externalidades» ambientales mediante imputaciones razonables, para someterlas al enfoque coste-beneficio, propio de la economía ordinaria. Otra, aplicando sobre ellas el aparato conceptual de las ciencias de la naturaleza, que razonan desde la perspectiva de los propios *recursos*, para analizar los *residuos* y pérdidas en los procesos y reflexionar sobre la estabilidad de éstos. Ambos caminos deben complementarse, ya que, por una parte, no cabe esperar que el primero pueda cubrir satisfactoriamente el vacío analítico que su propia red teórica ha generado y, por otra, tampoco el segundo debe permanecer ajeno a las valoraciones monetarias relacionadas con los procesos objeto de estudio, si se quiere facilitar la incidencia práctica de sus análisis.

En el presente trabajo utilizaremos ambos caminos, advirtiendo que la naturaleza abierta y multidimensional de los enfoques adoptados hace que la problemática «ambiental» aparezca tratada junto con el estudio del rendimiento, el coste físico y las pérdidas en los procesos, sin dar lugar a un

apartado específico. Por ello, el análisis de sus «externalidades» se aborda junto con la evaluación financiera de las opciones de producción consideradas. La problemática «ambiental» no da lugar así a un capítulo independiente de los destinados a la evaluación física y financiera de los procesos. La amplitud de los enfoques adoptados permite tratar directamente en ellos tal problemática, con mayor consistencia de lo que comúnmente se hace cuando, tras análisis convencionalmente sumarios e incompletos del funcionamiento físico de los procesos productivos, se añaden sendos capítulos sobre sus incidencias «ambientales», para cubrir el expediente de cara a las nuevas exigencias.

En el caso que nos ocupa, el de la agricultura intensiva, podemos sintetizar la intersección entre las distintas escalas de agregación espacial y temporal, con los aspectos tocantes con la gestión, tal y como figura en el cuadro VII.1. La agregación espacial puede ir desde el invernadero hasta la comarca, y las unidades de gestión que se ocupan de ellos, en el actual marco institucional, desde la finca o explotación agraria hasta el municipio al que pertenecen. La agregación temporal de los flujos suele tomar como primeros escalones de referencia la campaña de cultivo y el ejercicio contable del año correspondiente. Podría razonarse después sobre su evolución a medio y largo plazo, atendiendo a los períodos de amortización de los distintos elementos que componen el inmovilizado material de la explotación y asegurando que el proyecto llegue a agotar la vida útil de las instalaciones sin quebranto patrimonial alguno. En lo que concierne a los aspectos relacionados con la gestión, podríamos distinguir, al menos, entre las dimensiones monetarias, físicas, territoriales y socio-institucionales de los mismos, teniendo en cuenta que deberían interaccionar entre sí, aunque las instancias que se preocupan de cada una de ellas son diferentes y suelen permanecer inconexas. Por ejemplo, el agricultor razona sobre las dimensiones monetarias del negocio agrario, el ayuntamiento sobre las dimensiones territoriales y recaudatorias, ..., la Unión Europea (UE) actúa sobre el marco institucional bajo las presiones más diversas, sin que exista clara conciencia de sus repercusiones mutuas (recordemos cómo la negociación pesquera con Marruecos, del año 1995, derivó a otorgar a este país ventajas en la exportación de tomate que incidirían negativamente sobre los agricultores del sureste español, que fueron en principio vetadas por otros países comunitarios).

Desde la perspectiva microeconómica, el empresario o agricultor se suele centrar, en primer lugar, sobre los aspectos monetarios y, en segundo lugar, sobre los físicos relacionados con los rendimientos del cultivo, en la medida en la que inciden sobre los primeros. Se intenta asegurar así la propia existencia de la explotación agraria sin ir más allá de la viabilidad técnica y económica de procesos productivos determinados. Las preocupaciones estéticas o ambientales son en este nivel poco determinantes,

dependiendo sólo de la sensibilidad de los agricultores, a no ser que pongan en peligro el futuro inmediato del sistema de explotación. Por el contrario, las cuestiones ambientales y territoriales deben ocupar un lugar importante desde perspectivas de las distintas administraciones implicadas, para atajar determinadas consecuencias de la gestión que inciden negativamente sobre las zonas, forzando su deterioro mediante contaminación, malversación o esquilmo de los recursos naturales y paisajísticos.

Se apuntan así, al menos, dos ámbitos de racionalidad diferentes, aunque relacionados en la práctica. Uno, el de las unidades elementales que, movidas por el motor de lo monetario, inciden en términos agregados sobre el otro ámbito, el territorial y ambiental. El problema estriba en que la racionalidad coste-beneficio que guía el comportamiento individual de los agricultores puede ocasionar, y en nuestro caso ocasiona, como más adelante veremos, irracionalidades y despropósitos globales. De ahí que parezca conveniente tender puentes entre ambos ámbitos de racionalidad en la gestión, para compatibilizar los objetivos de rentabilidad a corto plazo de las fincas, con aquellos otros que dictan la adecuación al territorio y la sostenibilidad a medio y largo plazo del sistema de explotación que utilizan. Y ahí entra en juego la otra dimensión de análisis mencionado: el socio-institucional, que apunta a tender esos puentes a base de diseñar marcos institucionales que compatibilicen los dos extremos indicados, tratando de primar el uso de técnicas de cultivo y de gestión de recursos «sostenibles». Evidentemente, la implantación de esos marcos institucionales, capaces de adaptar la tecnología y las «fuerzas del mercado» a las limitaciones y posibilidades que ofrece la explotación duradera de los recursos naturales de los territorios, se ha de gestar en la escala político-administrativa correspondiente. Ésta va más allá de la municipal, alcanzando, en el caso de España, a la autonómica, a la del Estado central y a la de la propia Unión Europea.

Para tender puentes con solvencia entre los ámbitos mencionados hay que considerar las exigencias y las consecuencias que para ellos tienen los procesos que se pretenden enjuiciar. Convendrá diferenciar entre la eficiencia parcial de estos últimos y su eficiencia global, incluyendo la cadena de procesos con ellos relacionados.

Nuestro objeto específico de estudio es el ámbito de los cultivos sobre sustratos inertes que precisan de un proceso de fabricación y enarenado. En la comparación correspondiente, puede hacerse necesario llevar el campo de estudio más allá del funcionamiento, y de las exigencias directas en recursos y residuos de los sistemas de cultivo. Este límite sería suficiente en el caso del enarenado, pero no en el de los sustratos, que demandan procesos previos de fabricación y posteriores de recogida, tratamiento e instalación en vertedero de los mismos una vez desechados. En el epígrafe 7.2 del apéndice se da un esquema que ilustra sobre las diferencias que se

operan entre las exigencias de cada sistema de cultivo. Todos requieren materias primas de origen extractivo. Pero el enarenado las reclama directamente (suelo, arena y humus o estiércol) mientras que el cultivo en sustratos lo hace indirectamente (rocas de origen volcánico) para la fabricación de los propios sustratos, mediante procesos exigentes en energía fósil y, por lo tanto, contaminantes. También se observan diferencias en lo referente a los residuos sólidos: en el enarenado se incorporan generalmente al suelo sin problemas, pero los sustratos tienen una vida útil de dos años tras la cual se convierten en residuos, reclamando como mínimo procesos de compactación y traslados a vertedero ya que su descontaminación y reciclado resulta problemático⁴.

A continuación nos referiremos a la incidencia ambiental de estos procesos, además de centrarnos, como es lógico, en analizar el comportamiento y los resultados de los sistemas de cultivo investigados. Para llevar a buen fin el doble objetivo propuesto, tendremos que ampliar hacia la problemática de los recursos y de los residuos, los enfoques del balance y de la función de producción, habituales en agronomía y en economía.

3. Método

Veamos las limitaciones que comporta la forma en la que comúnmente se aplican el enfoque del *balance*, en agronomía, y el de la *función de producción*, en economía, para sugerir después el modo de ampliarlos.

El dogma interpretativo del *balance* de nutrientes se impuso a principios del siglo XIX en agronomía, tras los trabajos de Saussure, Liebig y Boussingault, como aplicación a este campo del principio de *conservación* propio del enfoque mecanicista que, por aquel entonces, orientaba el quehacer científico⁵. Los animales y las plantas eran considerados así como convertidores mecánicos cuyas exigencias «alimenticias» interesaba conocer, para potenciar sus aptitudes productivas paliando las posibles carencias del medio, que actuaban como factores «limitantes» o frenos a la producción. Armados con el aparato conceptual instaurado por Lavoisier como base de la química moderna y contando con una analítica cada vez más afinada, se trataba de cifrar el balance entre las entradas que abastecían la «máquina» vegetal y sus salidas productivas, al igual que la partida doble lo venía haciendo en la economía para los ingresos y los gastos monetarios. La combustión de la materia vegetal fresca permitía analizar en las cenizas resultantes las sales extraídas por la cosecha, soslayando la problemática compleji-

⁴ BENOIT, F. y N. CEUSTERMANS (1994), *Polyurethane ether foam (PUR) a Belgian ecologically sound substrate for soilless growing*, vol. 1º, 13th International Congress of CIPA, Verona (Italia).

⁵ DAGONET, F. (1973), *Des révolutions vertes. Histoire et principes de l'Agronomie*, París, Hermann.

dad de los intercambios de la planta con la atmósfera y el suelo (referidos básicamente al carbono, al hidrógeno y al oxígeno que, junto con el agua, componen cerca del 99% del peso fresco de los vegetales) así como el tema de los residuos y el deterioro del medio (suelo, acuíferos...).

La extremada simplificación que supuso centrar el análisis en sustancias que representan sólo el 1% de los materiales extraídos, encontró el apoyo empírico necesario para salir adelante debido a la escasez de sales propia de las zonas de clima húmedo frío. Se convertía ese uno por cien en el verdadero «factor limitante» de la agricultura de los países situados al norte de la Pirineos. Sin embargo, la mayor diversidad (y complejidad) de suelos, climas, especies y ecosistemas propia de los países mediterráneos, recorta el potencial explicativo de trasladar tales esquematismos a la agricultura de estos países: por contraposición a los países nortueuropeos, el exceso de sales, y la escasez de agua, constituyen a menudo el principal problema al que ha de enfrentarse la agricultura mediterránea.

En lo que concierne a la «función de producción» hay que decir que, tal y como se ha venido presentando normalmente en los manuales de teoría económica, no permite analizar el funcionamiento interno ni la incidencia externa (sobre el «ambiente») de los procesos de producción. Tampoco enjuiciar con amplitud la naturaleza y las consecuencias de los cambios tecnológicos, ni la viabilidad a largo plazo de los sistemas resultantes⁶. La desatención usual del análisis económico, tanto hacia lo que ocurre «dentro» del proceso de producción como hacia las relaciones con su «ambiente», es la consecuencia lógica de la representación que la teoría económica acostumbra a hacer de dicho proceso mediante un vector ($P, a, b, c, \dots$) que nos relaciona, a través de una función $P=f(a, b, c, \dots)$, las cantidades de producto (P) con las cantidades de factores ($a, b, c, \dots$). Al representar el proceso de producción mediante una forma particular de función (la denominada en matemáticas *función punto*, por ser representable como tal en un espacio euclidiano), se da a entender que no existen otras posibilidades de representar matemáticamente dicho proceso.

La función de producción arriba expresada viene a ofrecernos una información comparable, no tanto a la de una receta de cocina (como dicen manuales de economía tan divulgados como los de Boulding, Bowley, Scheneider, Pigou... o Samuelson)⁷ como a la lista de ingredientes que suele figurar encima de ella en los libros de cocina: «para obtener un bizcocho se requiere, 1 huevo, 2 tazas de leche, etc.». Entre las limitaciones que

se derivan de representar un proceso mediante una lista de ingredientes monetizables que entran y salen en el mismo, caben destacar las siguientes:

1.º Al identificar un proceso sólo con sus unidades de principio y fin, se induce a no tener en cuenta lo que ocurre tanto entre esos límites como fuera de los mismos. Además, los cambios de tecnología o de escala aparecen como meros problemas cuantitativos o de agregación por suma, y no se detectan los cambios cualitativos en el comportamiento y la viabilidad del sistema.

2.º Al establecer que el proceso de entradas y salidas empieza en t_0 y termina en t_1 , normalmente se hace abstracción de lo que ocurre antes de t_0 y después de t_1 . Con ello se puede obviar, por ejemplo, que la buena rentabilidad del presente puede venir apoyada por el esquileo de una fertilidad o unos acuíferos acumulados durante milenios.

3.º Al registrar sólo aquellos elementos físicos que son objeto de valoración monetaria, se hace abstracción de los otros elementos que intervienen en el proceso, ya sean como recursos naturales, no valorados, o como residuos que, por definición, carecen de valor.

4.º Al practicar el hábito de razonar sobre una determinada lista de ingredientes, se tiende a olvidar que no tiene por qué ser ni la única ni la más eficiente para obtener el producto deseado. Por ejemplo, que un cultivo se puede realizar al aire libre o bajo diversos abrigos o invernaderos, sobre distintos tipos de suelo o sustrato, utilizando diferentes sistemas de riego, etc.

5.º Por último, al omitir el tiempo, como variable explícita, la versión clásica de la función de producción se acomoda mejor a representar los procesos industriales. Éstos utilizan los equipos de forma homogénea en el tiempo, poniendo *en línea* todos los eslabones de la cadena de producción. Ahora bien, sus dificultades de representación se acentúan en aquellos procesos donde las instalaciones han de ser utilizados de forma parcial y escalonada, como ocurre con las labores agrarias a lo largo de la campaña⁸.

A continuación, trataremos de razonar sobre el balance completo de materiales, estableciendo un *catálogo de posibles recetas* con todos sus «ingredientes» y sus resultados, incluidos los residuos. Hay que advertir que la representación de este *catálogo* escapa a la *función punto* antes mencionada, para dar lugar a lo que en matemáticas se denomina una *ecuación funcional* (cuya expresión geométrica habría que buscarla en otros espacios abstractos distintos del euclidiano). En este caso, la representación del proceso de producción vendría dada por una colección de *funciones de punto*, que configu-

⁶ NAREDO, J. M. (1987), *La economía en evolución*, Madrid: Siglo XXI (reed. 1996), XXXVI + 568 pp.

NAREDO, J. M. y J. LÓPEZ-GÁLVEZ (1994), «Información técnica y gestión del uso del agua en los regadíos españoles», *Revista de Estudios Agro-Sociales*, 167, enero-marzo 1994: 185-207 pp.

⁷ GEORGESCU-ROEGEN, N. (1996), *La Ley de la Entropía y el proceso económico*, Madrid: Fundación Argentaria y Visor Dis., 545 pp.

⁸ GEORGESCU-ROEGEN, N. (1969), «Process in farming versus process in manufacturing: a problem of balance development», en U. PAPI y Ch. NUNN, eds., *Economic Problems of Agriculture in Industrial Societies*, Londres: Macmillan, y Nueva York: St Martin's Press, pp. 497-528, reedit. en (1976), *Energy and economic myths*. Institutional and analytical essays, Nueva York, Pergamon, xxviii + 380 pp.

raría la *ecuación funcional* arriba mencionada y por una colección de vectores de cantidades (ampliados a lo no monetizable) en vez de por un solo vector.

En el caso de la agricultura, la falta de conocimiento sobre el funcionamiento físico concreto de los procesos de producción ha dificultado sistemáticamente la aplicación de enfoques analíticos que vayan más allá de las versiones restringidas del balance y de la función de producción antes apuntadas. En efecto, la información física disponible se limita comúnmente a aquellos *insumos* y producciones que son objeto de transacción mercantil, permaneciendo en la sombra el resto de los procesos. Los sistemas agrarios aparecen así como una especie de *caja negra* en la que introducen *inputs* monetarios y se obtiene, sin saber muy bien cómo, un producto vendible. Sin embargo, para enjuiciar la eficiencia técnico-económico (y la incidencia ambiental) de varios procesos de producción, no sólo es necesario aplicar el instrumental analítico adecuado, sino también disponer de información solvente sobre el funcionamiento de los mismos. Afortunadamente, el experimento cuyos resultados se analizan en la parte especial de este trabajo aporta una riqueza inusual de datos sobre el funcionamiento de los sistemas de producción que se pretenden enjuiciar. La información ha sido recabada a partir de los métodos e instrumentos de medida que se indican en los capítulos temáticos correspondientes. Dedicando así una atención razonable a precisar el origen y la fiabilidad de los datos obtenidos sobre los que se apoya el enjuiciamiento de los resultados para facilitar, de acuerdo con las exigencias del juego científico, su posible contraste con otras experiencias similares.

4. Análisis físico de los procesos productivos

El análisis económico de los procesos del mundo físico se apoyará en las enseñanzas de esa economía de la física que es la Termodinámica. Dentro de los procesos físicos, en general, vamos a referirnos a aquel subconjunto particular de procesos llamados económicos, que se caracterizan porque el hombre les infunde un propósito productivo⁹.

Todo proceso económico conlleva una entrada de recursos, una salida (deseada) de productos y otra salida (indeseada) de pérdidas. Todas ellas son medibles y presentables en unidades físicas vinculadas al Sistema Internacional de Unidades sobre el que reposa la ciencia cuantitativa. Así, podemos medir en unidades energéticas los requerimientos de recursos (F), los resultados en productos (P) y las pérdidas (I), y representar el proceso a través de la siguiente expresión:

⁹ VALERO, A. (1993), «La termoeconomía: ¿Una ciencia de los recursos naturales?», en NAREDO, J. M. y PARRA, F. (eds.) *Hacia una ciencia de los recursos naturales*, Madrid: Siglo XXI, pp. 57-58.

$$F = P + I$$

(1)

Recordemos que el Primer Principio de la Termodinámica, o Ley de la Conservación de la Energía, se traduce, para lo que ahora nos preocupa, en que la energía útil contenida en los recursos ha de transformarse íntegramente en uno de los dos componentes indicados: productos o pérdidas. A su vez, el Segundo Principio de la Termodinámica, o Ley de la Entropía, indica que la transformación de recursos en productos siempre ha de entrañar la pérdida de parte de la energía inicialmente utilizable en forma de recursos. Es decir, que en todo proceso productivo el cambio cualitativo deseado (por ejemplo, de energía térmica en eléctrica o en mecánica) se ha de saldar globalmente con una pérdida del recurso disponible (energía útil). Por todo ello, es siempre $F > P$, o también $I > 0$ (F sería la energía empleada en forma de recursos para provocar el cambio de calidad deseado que se plasma en la obtención de P y de pérdida irreversible I, que puede adoptar la forma de pérdidas de calidad interna del sistema y de residuos emitidos al exterior del mismo).

Los principios enunciados gobiernan el funcionamiento de todos los procesos materiales, alcanzando a sus dimensiones físicas, químicas y biológicas. Su campo de aplicación va mucho más allá de los sistemas que, de ordinario, se relacionan con las manifestaciones más conocidas de la energía (y con los productos llamados «energéticos») para regir también los movimientos de materiales, con sus correspondientes cambios de estado y calidad, que se operan en la biosfera y, por ende, en los sistemas agrarios. Lo anterior no quiere decir que pensemos que la Termodinámica debe eclipsar o sustituir a esa otra Economía de la Naturaleza que es la Ecología y, en general, a las otras ramas del conocimiento que son de utilidad para orientar la gestión de los sistemas agrarios; pero sí que, en el enjuiciamiento de los sistemas agrarios artificiales que ahora nos ocupan, el aparato conceptual de la Termodinámica resulta de más utilidad que aquellos de la Ecología o, pongamos por caso, de la Edafología. Así, la «sostenibilidad» de los sistemas de agricultura con suelos artificiales no viene condicionada por el suelo ni estudiada por las ciencias que se ocupan de él, sino por la salud de los acuíferos de los que se nutren y a los que envían los lixiviados.

En el caso del sistema de cultivo enarenado, su sostenibilidad viene asegurada, en lo que al suelo se refiere, por la labor de «retranqueo». Se dispone de evidencia empírica sobre parcelas que cuentan con más de cuarenta años de cultivo ininterrumpido sin que se observe una caída de los rendimientos; no obstante, en la evaluación financiera cifharemos prudentemente en cuarenta años la vida útil del suelo en el cultivo enarenado, que puede ser indefinida si se maneja correctamente. La relación de los sistemas agrarios aquí estudiados con la naturaleza se limita fundamentalmente a la energía solar, al agua y a los nutrientes aplicados, además de a la

extracción, transporte y reutilización o vertido de los elementos de la corteza terrestre que requiere su implantación y mantenimiento.

El enfoque esbozado en los párrafos anteriores permite enjuiciar la economía de los procesos. A tal efecto, se cuantifica su *rendimiento* para la obtención de producto mediante la relación P/F. Ésta indica las unidades de producto por unidad de recursos empleados. Su inversa, es decir, su *coste* físico unitario, es la relación F/P, la cual muestra las unidades de recursos requeridas para la obtención de una unidad de producto. Los *residuos* generados (R) son siempre el resultado del uso que se haga de los *recursos*, pues aumentan en razón directa a la ineficiencia, es decir, al coste físico de los procesos. Por ello, resulta poco consistente la pretensión de controlarlos sin preocuparse de mejorar éstos. La utilización de los ratios de *rendimiento* o de *coste* unitario se pueden complementar con ratios de *pérdidas* I/P o de *residuos* R/P, en tanto que ratios de *contaminación*.

Interesa subrayar también que muchas veces la mejora del rendimiento de un proceso descansa sobre la posibilidad de sacar fuera del mismo parte de los *costes* (y su correspondiente irreversibilidad). Por ejemplo, se puede mejorar el rendimiento (y reducir la contaminación) de una máquina de vapor utilizando en su lugar un motor eléctrico, con sólo desplazar la mayor parte del coste y la contaminación a la central térmica de carbón que facilita la electricidad (cuando con la máquina de vapor era innecesario el proceso previo de obtención de electricidad). Evidentemente, sería engañoso limitarnos a apreciar el mayor rendimiento del motor eléctrico, haciendo abstracción del resto de los procesos implicados: al cálculo del rendimiento y del coste parcial de cada proceso hay que añadir, al menos, en ambos casos el del rendimiento global en la conversión de carbón en energía mecánica, directamente, en el primer caso, y pasando por la obtención previa de electricidad, en el segundo. Merece la pena insistir en este punto, porque el análisis económico comúnmente realizado desde la óptica de la empresa en cuestión, busca mejorar el rendimiento, reduciendo los costes parciales de los procesos que transcurren en el seno de la misma haciendo abstracción del resto. A esto se añade que la gestión de la empresa se orienta, en última instancia, por la brújula de la rentabilidad monetaria, y no por el rendimiento físico. Además, esa brújula no valora la función realizada por la naturaleza como proveedora de recursos naturales, cuya obtención por la industria humana tendría un coste físico y monetario evidente. Tampoco su función como planta de reciclaje o dilución de residuos artificiales. Por todo ello, nos encontramos con que la empresa considerada es una máquina potentísima para generar «externalidades» negativas. A lo que habría que añadir otras instancias administrativas que busquen salvaguardar el ambiente de determinadas áreas geográficas sin tener en cuenta las restantes. Por ejemplo, una eliminación local de desechos de centrales nucleares cuando éstos son transportados, para su almacenamiento, a un lugar distante de donde se originaron.

El enfoque termodinámico permite llevar el objeto de estudio más allá del valor y de la rentabilidad parcial de cada uno de los procesos. El objetivo podría ser abarcarlos en toda su globalidad física, con independencia de que sean o no objeto de valoración monetaria. De esa forma, sus rendimientos y su coste físico no se verían afectados por las contingencias de esta valoración monetaria, dependiente del marco institucional, de la distribución de la renta y de la propia idiosincrasia y subjetividad de los agentes económicos. Se apreciarían así las posibles contradicciones entre rentabilidad monetaria y rendimiento en términos físicos. Se podría detectar si la valoración monetaria prima, en un instante dado, la puesta en marcha de procesos físicamente ineficientes, costosos y contaminantes. Esto tiene interés para orientar retoques en el marco institucional necesarios para evitar que tal cosa ocurra.

En la parte especial de este volumen, se aplican los enfoques antes descritos al análisis de los sistemas de cultivo utilizados en el experimento objeto de estudio (comparación entre el sistema de cultivo en enarenado y en sustrato), distinguiendo entre los procesos de instalación de tales sistemas y los procesos de cultivo propiamente dichos. Se calculan para ello los ratios de coste y contaminación correspondientes a cada una de las opciones consideradas. En este trabajo, se obtienen directamente los rendimientos y ratios de contaminación sobre la información cuantitativa disponible, por estimarlos más eficaces para el propósito del estudio. El cálculo se materializa relacionando cada uno de los principales recursos, o medios de producción utilizados, con la cosecha y con los residuos obtenidos en cada caso. Ello permite cuantificar un abanico de valores concretos de las funciones punto correspondientes a diez opciones, cinco de suelo o sustrato por dos de calidad de agua, que forman parte de la ecuación funcional de producción correspondiente a un cultivo de tomate, durante las dos campañas estudiadas. Además, se aborda el cálculo global de estos ratios después de expresar en unidades energéticas los medios empleados y las cosechas obtenidas¹⁰.

El abanico de datos obtenidos es insuficiente para estimar las funciones punto indicadas y, menos aún, la ecuación funcional de producción de tomate de la que formarían parte. No obstante abren el camino para mejorar el conocimiento de éstas, informando sobre los márgenes de variabilidad, en los que se desenvuelven los datos, y la incidencia que tienen sobre los mismos determinadas opciones o prácticas de cultivo a las que en ocasiones se prestaba poca atención. Los amplios márgenes de variabilidad en los que se mueven los datos, en las diez opciones técnicas y las dos campa-

¹⁰ NAREDO, J. M. y P. CAMPOS (1980), «Los balances energéticos de la agricultura española», *Agricultura y Sociedad*, 15. Reproducido en NAREDO, J. M. (1996), *La evolución de la agricultura en España (1940-1998)*, Granada, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Granada, pp. 303-411.

nias de cultivo de tomate consideradas en este trabajo, denotan la magnitud de los errores a los que puede inducir la aplicación de datos esquemáticos de funciones de producción importadas de otras realidades, como representativas del cultivo de tomate en invernadero en cualquier tiempo y lugar.

5. Análisis de la rentabilidad financiera de los procesos productivos

A diferencia del análisis del rendimiento físico de los procesos productivos tratado en el apartado anterior, el análisis de la rentabilidad de éstos se encuentra plenamente formalizado desde hace tiempo. Sus fundamentos e instrumentos aparecen expuestos en multitud de manuales de economía de la empresa, a la vez que la obtención de los indicadores básicos de rentabilidad aparece como una opción normal para el usuario en los habituales programas de cálculo. En este trabajo, se han utilizado como punto de referencia metodológico las *Normas prácticas para la evaluación financiera de inversiones agrarias*, y se han realizado los cálculos con la ayuda del programa EVALIN que une las virtudes de claridad y concisión¹¹. Una versión más amplia y un instrumental más completo puede encontrarse en el manual de *Evaluación económica y financiera de las inversiones agrarias*¹². Completando el objeto de estudio usualmente abarcado por este tipo de obras, se dispone entre otros del manual relativo a la forma de recabar y ordenar la información necesaria para realizar un *Seguimiento y evaluación de proyectos en agricultura*¹³.

La puesta en marcha de un proceso productivo presupone la *inversión* de un capital monetario (K), con el propósito de obtener unos *ingresos netos* (o *flujos netos de caja*) anuales ($R_1; R_2; \dots; R_n$), durante el período de (n) años de vida útil de las instalaciones. Estos tres conjuntos de datos permiten analizar la *rentabilidad* del proyecto a partir de varios criterios consistentes en comparar los *flujos de caja* con la *inversión* requerida para obtenerlos, a fin de comprobar si aquellos compensan o no suficientemente el desembolso de ésta. El primer problema que plantea tal comparación viene dado por el desfase temporal observado entre el desembolso en la inversión y la obtención escalonada de los ingresos, que otorga un carácter heterogéneo a las unidades monetarias en que se cifran estos flujos. Este problema se resuelve aceptando como algo axiomático que todo inversor prefiere los flujos monetarios presentes a los futuros. Al reflejar esa inclina-

ción en el tipo de interés de mercado (en tanto por uno) (i), se supone que cualquier inversor preferirá percibir Q pesetas en el presente a hacerlo dentro de tres años, ya que podría colocarlas a interés compuesto durante esos tres años y obtener $Q(1+i)^3$ pesetas. O también, que podría obtener Q pesetas dentro de tres años colocando hoy $Q/(1+i)^3$ pesetas a interés compuesto, con lo cual podemos decir que Q pesetas del tercer año equivaldrían a $Q(1+i)^3$ pesetas actuales. Tenemos, pues, un método para «actualizar» los valores de los *flujos de caja* que se esperan obtener a lo largo de la vida del proyecto: basta con dividirlos por $(1+i)^j$, siendo j el año correspondiente a cada flujo.

Una vez visto el modo generalmente admitido de «actualizar», paliando así la heterogeneidad de las unidades monetarias correspondientes a años distintos, nos encontramos en condiciones de explicar la naturaleza de los dos indicadores más utilizados para enjuiciar la rentabilidad financiera de los proyectos de inversión: el *Valor Actual Neto* (VAN) y la *Tasa Interna de Rendimiento* (TIR).

El VAN es el resultado de restar a la suma de los *ingresos netos* o *flujos netos de caja*, convenientemente *actualizados*, el importe de la *inversión*. Si el pago de ésta no está fraccionado, tenemos que el VAN del proyecto sería:

$$VAN = \frac{R_1}{(1+i)} + \frac{R_2}{(1+i)^2} + \frac{R_3}{(1+i)^3} + \dots + \frac{R_n}{(1+i)^n} - K \quad (2)$$

Un VAN positivo indica que el proyecto es financieramente viable, ya que es capaz de retribuir el dinero inmovilizado en el mismo (K) algo mejor de lo que lo haría el tipo de interés considerado. Si el VAN es negativo, el proyecto se estima financieramente poco recomendable, habida cuenta de que no es capaz de retribuir la inversión ni siquiera como lo haría el tipo de interés.

La TIR es el tipo de interés que permitiría igualar la suma de los *flujos netos de caja actualizados* con el valor de la *inversión*. Si el pago de ésta no está fraccionado, la TIR sería el tipo de interés (λ) al que se cumpliría la siguiente igualdad:

$$K = \sum_{j=1}^n \frac{R_j}{(1+\lambda)^j} \quad (3)$$

Vemos, pues, que la TIR viene a ser el tipo de interés al que podría retribuir el proyecto el dinero invertido en el mismo. En consecuencia, si el valor de la TIR (λ) es superior al tipo de interés de mercado (i), podemos considerar financieramente viable el proyecto, y si ocurre lo contrario es inviable. Evidentemente, cuanto mayor sean la TIR y el VAN, más

¹¹ ROMERO, C. (1992), *Normas prácticas para la evaluación financiera de inversiones agrarias*, Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, Banco de Crédito Agrícola, 119 pp.

¹² CEÑA, F. y C. ROMERO (1989), *Evaluación Económica y Financiera de Inversiones Agrarias*, Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, Banco de Crédito Agrícola, 2.ª edición, 352 pp.

¹³ CASLEY, D. J. y K. KUMAR (1990), *Seguimiento y evaluación de proyectos en agricultura*, Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, Banco Mundial, 168 pp.

atractivo financieramente se presenta el proyecto, al mostrar una elevada rentabilidad financiera. En lo que sigue, utilizaremos la TIR para enjuiciar la rentabilidad financiera de los tratamientos considerados en la parte especial.

El cálculo de las TIR se realizará, en primer lugar, de acuerdo con lo que actualmente están ingresando por la venta de las cosechas y pagando por los medios de producción los agricultores de la zona donde se ha realizado el trabajo experimental. Estos flujos monetarios no tienen en cuenta los impactos negativos que sobre el «ambiente» ocasionan los residuos vertidos y los recursos utilizados, que pueden dar al traste con el propio sistema de producción. Después se calcularán y compararán de nuevo las TIR incluyendo entre los costes las principales «externalidades» que originan cada uno de los procesos investigados, viendo hasta que punto se alteran los resultados iniciales. Para ello, se precisa valorar tales «externalidades».

Mención expresa reclaman los métodos de valoración de «externalidades» que han dado lugar a un importante volumen de literatura en el campo de la llamada *Economía Ambiental*, pues tales métodos son la llave que abre a objetos físicos y territoriales que carecían de valor la puerta de entrada al campo de la economía usual, para que ésta pueda incluirlos en sus análisis coste-beneficio. Como no es cosa de detenernos aquí en la descripción de tales métodos, remitimos al lector interesado a los manuales específicos sobre el tema¹⁴. Advirtamos, no obstante, que tales métodos se pueden dividir entre los que se basan en el sentir de las poblaciones, expresado bien directamente bien a través de sus comportamientos o apreciaciones indirectas, y los que se apoyan en el coste de reparación o reposición de los deterioros ocasionados. Los primeros tienen la virtud, y la flaqueza, de venir condicionados por la subjetividad y la renta de las personas, los segundos, por el sistema de precios vigente que a su vez depende del marco institucional, de la distribución de la renta, etc. En los países en los que, como ocurre en los EEUU, existe más experiencia histórica de litigios sobre estos temas, los tribunales suelen atenerse más al coste de reposición o restauración para estimar el importe de las indemnizaciones de los «daños» ambientales, por considerarlo como algo más objetivo¹⁵.

En nuestro planteamiento, se valora: a) El recurso agua recurriendo al coste de desalación y bombeo del agua del mar, que tendrían que sufragar

los agricultores de la zona una vez deteriorados los acuíferos, de los que se nutren, por sobreexplotación, contaminación e intrusión marina (en este caso el agua del mar sustituiría la actualmente disponible en el subsuelo). b) Los costes de traslado a vertedero, de compactación y tratamiento, en los que habría que incurrir para paliar la incidencia negativa de los sustratos desechados. Estos son los dos aspectos diferenciales básicos en la incidencia ambiental de los cinco procesos objeto de estudio (dejando sin valorar otros residuos que, aún siendo considerados en términos físicos, no varían en dichos procesos como es, por ejemplo, el plástico de la cubierta o la estructura del invernadero). Hacemos también algunas consideraciones sobre la incidencia territorial del sistema, atendiendo a las actividades extractivas que requiere su implantación (arena y tierra en el enarenado y rocas volcánicas en los sustratos), así como al conflicto con otros usos del territorio y a sus consecuencias desde el punto de vista de su ordenación.

En cualquier caso, hay que advertir que la mayor parte de los trabajos de valoración de «externalidades» hacen referencia al impacto de instalaciones concretas o cambios de usos sobre poblaciones preestablecidas o territorios cuyos recursos naturales o ambientales los hacían acreedores de cierta protección. Pero, entre la literatura consultada, no hemos encontrado antecedentes de estudios sobre la valoración de un cambio de uso del territorio tan singular como el ocurrido en el Campo de Dalías y de sus posibles «impactos»: un territorio casi desértico en población y vegetación que pasa a convertirse en teatro de una de las agriculturas más intensivas de la península Ibérica.

6. Aplicación de un enfoque global a los procesos de producción

Este epígrafe trata sobre la integración de impactos físicos y de rentabilidad monetaria en el marco territorial e institucional que la condiciona. La lectura de los dos apartados precedentes ilustra sobre los dos enfoques diferentes que informan la gestión en el mundo físico y en el financiero. Los análisis del *rendimiento* físico y de la *rentabilidad* financiera de los procesos suelen practicarse de modo independiente por los especialistas, dificultando la integración de ambos aspectos entre sí, además de con aquellos otros territoriales y socio-institucionales en las distintas escalas de agregación. Es más, muchas veces los ingenieros y técnicos buscan más la *eficacia* (parcial) que el *rendimiento* (general) de los procesos, siempre que tal *eficacia* favorezca la *rentabilidad* financiera (entendiendo por *eficacia* la ganancia en simplicidad, certidumbre y rapidez en la consecución de un determinado propósito inmediato). Sin embargo se puede y se debe relacionar el aparato conceptual descrito en los dos apartados anteriores, a fin de des-

¹⁴ AZQUETA, D. (1994), *Valoración económica de la calidad ambiental*, Madrid: McGraw-Hill, 299 pp.

REIRA, P. (1994), *Manual de valoración contingente*, Madrid: Instituto de Estudios Fiscales, Ministerio de Economía y Hacienda, 188 pp.

¹⁵ EBERLE, W. D. y F. G. HAYDEN (1991), «Crítica de la valoración contingente y del coste del viaje como métodos para la evaluación de los recursos naturales y los ecosistemas». *Journal of economic Issues*, vol. XXV, n.º 3, septiembre 1991. Hay traducción en castellano en ALCÁNTARA, V. y F. AGUILERA (eds) (1994), *De la economía ambiental a la economía ecológica*, Barcelona. FUHEM-Icaria, 404 pp.

velar las posibles contradicciones que se operan entre *eficacia*, *rendimiento* y *rentabilidad*.

La conexión entre los enfoques termodinámicos y aquellos otros de la economía *usual* se opera en la medida en que los ingresos brutos, obtenidos a lo largo de la vida útil de un proceso, resultan de multiplicar las cantidades de producto obtenido (medibles en unidades físicas) por sus precios (expresados en unidades monetarias) y en que los gastos resultan de multiplicar las cantidades físicas de recursos utilizadas por sus precios¹⁶. Lo cual permite hacer que los ingresos del proceso excedan a sus gastos de funcionamiento, condición necesaria, aunque no suficiente, para que sea financieramente rentable. La diferencia entre ingresos y gastos debe arrojar así un saldo positivo, denominado en economía *valor añadido* que, minorado de otros gastos ajenos a las cantidades de recursos utilizadas (por ejemplo, la retribución a la mano de obra), origina los *ingresos netos* o *flujos netos de caja (R)* a los que nos referimos en el apartado anterior.

Advirtamos que el contraste que se acusa entre los saldos de pérdidas (o residuos) y los de valores añadidos (o ingresos netos) que, respectivamente, calculan la termodinámica y la economía *usual*, para un mismo proceso, se explica porque la revalorización observada entre el precio de los recursos y el de los productos supera en intensidad a las pérdidas físicas ocasionadas en el proceso e, incluso, porque hay recursos que se utilizan a precio cero. De esta manera, la mencionada revalorización hace que el *rendimiento* físico, siempre inferior a la unidad, pueda dar lugar a una *rentabilidad* monetaria superior a la unidad que se plasma en los saldos positivos indicados. El hecho de que la radiación solar sea la principal fuente de energía utilizada en los sistemas agrarios, así como el de que el carácter renovable y «libre» de esta fuente induzca a no tenerla en cuenta entre sus costes físicos y monetarios, explica el «milagro» de que tales sistemas hayan venido arrojando tradicionalmente rendimientos mayores que la unidad, no sólo monetarios sino también físicos. Sin embargo, el creciente empleo de medios de producción aplicados por unidad de cosecha hizo decaer el rendimiento físico de la agricultura moderna, hasta situarla por debajo de la unidad, equiparándola con los procesos industriales. En la agricultura intensiva que nos ocupa, la energía aplicada por el hombre en el proceso, excluida la radiación solar, supera a la recogida en forma de cosecha.

Conviene subrayar que el peso que tiene el rendimiento físico en el uso de un determinado recurso sobre la *rentabilidad* financiera del proceso, depende de cuál sea el precio de dicho recurso. Así, el manteni-

miento de la *rentabilidad* ha podido compatibilizarse con la pérdida de rendimiento global de los insumos que han venido experimentando los sistemas agrarios a medida que aumentaba su aplicación, gracias a la escasa valoración relativa de éstos. Las mayores preocupaciones «ambientales» invierten ahora este proceso, desplazando la atención sobre la eficiencia (y la contaminación) de los procesos. Para ello se les da más peso en la evaluación financiera de los proyectos, ora valorando más los recursos, ora penalizando más los residuos. Estimamos que el tratamiento integrado del funcionamiento físico y monetario de los procesos es fundamental para apreciar la «sensibilidad» financiera de los proyectos a determinadas medidas «ambientales» que alteren el precio de los recursos utilizados, y de los costes monetarios, elevando el precio de los recursos utilizados, y de los contaminantes emitidos, o incentivando determinadas reconversiones. Aspecto éste cuyo conocimiento es imprescindible si queremos saber el margen de maniobra que ofrecen los «instrumentos económicos» para mejorar el *rendimiento* global de los distintos procesos (y reducir su contaminación) sin echar por tierra su rentabilidad. Los esquemas que se dan en los apartados 7.3 y 7.4 del apéndice muestran cómo se deberían contemplar las entradas y salidas en el sistema agrario del invernadero al que habría que asignar valores en términos físicos y monetarios.

En este libro se analiza técnica y económicamente el sistema de cultivo en sustratos y en enarenado. De aquí que este capítulo haya centrado la incidencia ambiental que conllevan estas técnicas de cultivo. No obstante, problemas más graves y preocupantes en el área donde se ha realizado el experimento, son los de sobreexplotación de acuíferos, la contaminación por productos fitosanitarios y el propio impacto visual que el sistema ofrece por la nula ordenación del territorio.

¹⁶ NAREDO, J. M. y A. VALERO (1989), «Sobre la conexión entre termodinámica y economía convencional», *Información Comercial Española*, junio-julio, 1989, pp. 7-16.

7. Apéndice

7.1. Marco Institucional

Cuadro VII.1

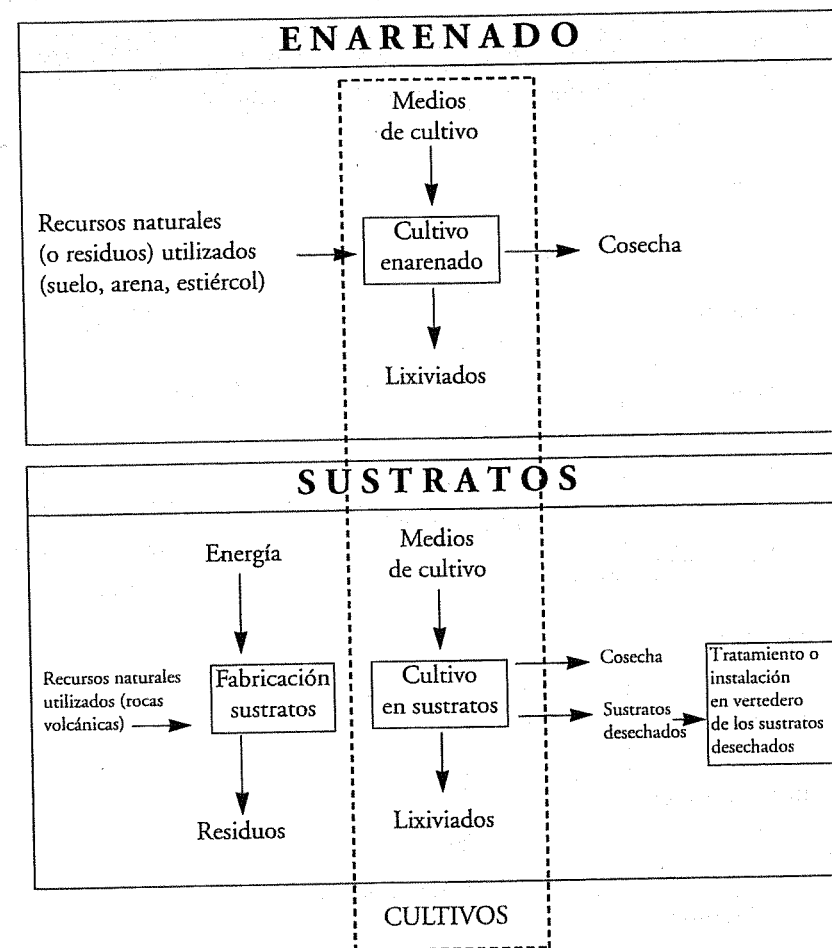
ESCALAS DE AGREGACIÓN ESPACIAL Y SU INTERACCIÓN CON LA GESTIÓN

Escala		Gestión			
		A	B	C	D
1	Invernadero Finca o explotación		+	++	
2	Comarca Municipio	++	+		++
3	Región Comunidad Autónoma	+	+		++
4	Estado Administración Central			+	++
5	Europa U.E.		+		++

- ++ Interés prioritario
 + Interés secundario
 A Dimensión Territorial
 B Dimensión Física
 C Dimensión Monetaria
 D Dimensión Socio-Institucional

7.2. Procesos del enarenado y de los sustratos

El siguiente esquema ilustra sobre las diferencias que hay entre el enarenado y los sustratos.

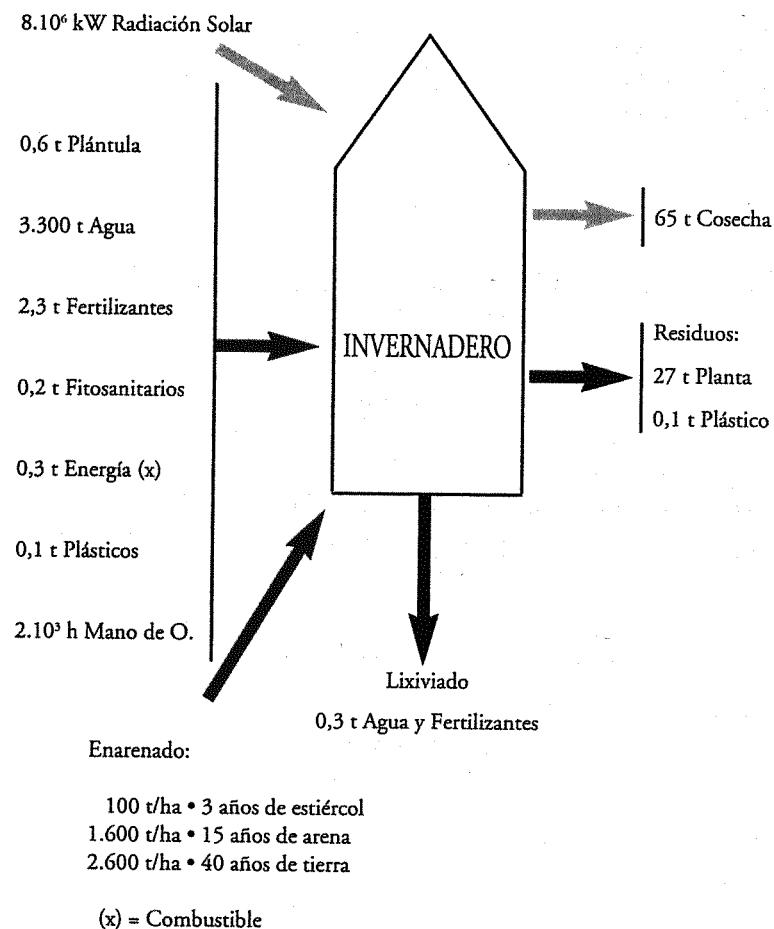


7.3. Balance físico

El siguiente esquema representa el balance físico de 1 ha de invernadero con cultivo de pimiento (t=toneladas).

Figura VII.1

BALANCE FÍSICO DE INVERNADERO



7.4. Balance monetario

El siguiente esquema representa el balance monetario de 1 ha de invernadero con cultivo de pimiento. Las cifras corresponden a la campaña 94/95 y se dan en 10³ pta.

Figura VII.2

BALANCE MONETARIO DE INVERNADERO

