

Manual de metodología sobre las enfermedades de los cereales



El CIMMYT es una organización internacional sin fines de lucro que está dedicada a la investigación científica y al adiestramiento. El CIMMYT, con sede central en México, está comprometido en un programa de investigación a nivel mundial para maíz, trigo y triticale con énfasis en producción alimentaria en países en desarrollo. Este es uno de los 13 centros internacionales sin propósitos de lucro que están involucrados en la investigación agrícola y adiestramiento, patrocinada por el Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional (GCAI). El GCAI está apoyado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO), el Banco Internacional para la Reconstrucción y el Desarrollo (Banco Mundial), y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). El GCAI cuenta con 45 países donadores, organizaciones internacionales y regionales y fundaciones privadas.

El Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) recibe apoyo de varias fuentes incluyendo las instituciones de ayuda internacional de Australia, Austria, Brasil, Canadá, China, la Comisión Económica Europea, Dinamarca, España, EUA, Filipinas, Francia, India, Irlanda, Italia, Japón, México, Noruega, los Países Bajos, Reino Unido, República Federal de Alemania, Suiza y el Banco Interamericano de Desarrollo, el Banco Internacional para la Reconstrucción y Desarrollo, el Centro Internacional para el Desarrollo de la Investigación, la Fundación Ford, la Fundación OPEP para el Desarrollo de la Investigación, la Fundación Rockefeller y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. La responsabilidad de esta publicación es sólo de CIMMYT.

Cita Correcta: Stubbs, R.W., J.M. Prescott, E.E. Saari y H.J. Dubin. Manual de metodología sobre las enfermedades de los cereales. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), México. 1986.

Manual de metodología sobre las enfermedades de los cereales

R.W. Stubbs

Instituut voor Plantenziektenkundig Onderzoek (IPO)
Wageningen, Países Bajos

y

**J.M. Prescott
E.E. Saari
H.J. Dubin**

Centro Internacional de Mejoramiento de
Maíz y Trigo, (CIMMYT) México

Publicado en 1986 por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) en cooperación con el Instituto de Investigación para la Protección Vegetal (IPO), Wageningen, Países Bajos.

La solicitud de esta publicación deberá enviarse a:

CIMMYT Publicaciones
Apdo. Postal 6-641
06600 México, D.F.
México

Edición: Alma McNab

Diseño y formación: Miguel Mellado E., José Manuel Fouilloux B., Rafael de la Colina F., Bertha Regalado M.

Tipografía: Silvia Bistrain R., Maricela A. de Ramos, Mónica Hernández González

Mecanografía: Patricia Martínez Ch.

Índice

			Página
			iii
Prólogo			
Primera Parte. Introducción			
Sección	1	Cereales: un panorama general	1
	1.1	Trigo	1
	1.2	Cebada	2
	1.3	Morfología y crecimiento de trigo y cebada	4
Segunda Parte. Las enfermedades y su evolución			
Sección	2	Principales enfermedades del trigo y la cebada	8
	2.1	Royas de los cereales	8
Sección	3	Desarrollo de las epifitias naturales	12
	3.1	Establecimiento de la enfermedad	12
	3.2	Propagación de la enfermedad	13
	3.3	Una forma sencilla de medir el aumento de la enfermedad	14
	3.4	Desarrollo de epifitias de roya en el campo	16
	3.5	Transporte de los organismos patógenos a grandes distancias	16
Sección	4	Encuestas sobre enfermedades de las plantas	19
	4.1	Técnicas básicas de la encuesta	19
	4.2	Principios generales de la evaluación de enfermedades	20
	4.3	Registro de enfermedades causadas por la roya de la cebada y el trigo	20
	4.4	Coeficiente medio de infección (CMI)	22
	4.5	Registro de otras enfermedades de los cereales	22
Tercera Parte. Desarrollo de variedades resistentes a las enfermedades			
Sección	5	Principios del mejoramiento para obtener variedades resistentes a las enfermedades	25
	5.1	Tipos de resistencia	25
	5.2	Modos de herencia	26
	5.3	Estrategias para mejorar la resistencia	27
	5.4	La práctica del fitomejoramiento	29
Sección	6	La fitopatología y el mejoramiento de los cereales	30
	6.1	Establecimiento de viveros para la observación de enfermedades	30
	6.2	Técnicas para intensificar y crear epifitias	31
	6.3	Justificación de la creación de epifitias artificiales	31
	6.4	Algunas importantes consideraciones técnicas en relación con la creación de epifitias	32
	6.5	Técnicas para la reunión de urediosporas de roya	34
	6.6	Almacenamiento de urediosporas de roya	34
	6.7	Técnicas para multiplicar el inóculo de roya	35
	6.8	Reunión, almacenamiento y multiplicación de inóculo de otras enfermedades de los cereales	36
	6.9	Técnicas de inoculación de enfermedades causadas por la roya	37
	6.10	Técnicas de inoculación para otras enfermedades de los cereales	38

Bibliografía**40****Apéndices**

Apéndice	1	Características de las enfermedades del trigo	41
	A1.1	Enfermedades causadas por hongos	41
	A1.2	Enfermedades bacterianas	44
	A1.3	Virosis	44
	A1.4	Enfermedades causadas por nematodos	44
Apéndice	2	Características de las enfermedades de la cebada	45
	A2.1	Enfermedades causadas por hongos	45
	A2.2	Enfermedades bacterianas	46
	A2.3	Virosis	46
	A2.4	Enfermedades causadas por nematodos	46

Prólogo

Suman 27 los países del mundo en desarrollo que cultivan más de 100,000 hectáreas de trigo cada uno y que destinan más del 95% de su producción al consumo humano directo. Aun cuando los rendimientos promedio y la producción total han mostrado incrementos sustanciales en años recientes, las enfermedades del trigo son una de las principales causas, año con año, de la inestabilidad de los rendimientos en los países en desarrollo.

Los organismos patógenos más importantes de las enfermedades del trigo son parásitos obligados que pueden convertirse en nuevas formas virulentas capaces de atacar a variedades que antes fueron resistentes. Para evitar este peligro, fitopatólogos y fitomejoradores deben trabajar juntos para producir en forma continua nuevas variedades resistentes a las razas patógenas predominantes. Desafortunadamente, en muchos países no se han

establecido lazos fuertes entre los que practican estas dos disciplinas. Aun más, ha existido la tendencia por parte de los fitopatólogos a realizar una investigación más básica en vez de aplicar las técnicas de campo recién desarrolladas para causar epifitias y seleccionar materiales de fitomejoramiento.

En 1976, el Instituto de Investigación para la Protección Vegetal (IPO) de Wageningen, Países Bajos, y el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) de México iniciaron los Talleres Regionales sobre la Metodología de Enfermedades de Cereales para establecer o fortalecer las actividades de investigación fitopatológica en programas nacionales de mejoramiento del trigo en países en desarrollo. Estos talleres por lo general duran dos semanas que se han llevado a cabo en 11 lugares de todo el mundo. Alrededor de 290 científicos de 40 países en desarrollo han participado en los talleres.

Este manual, resultado de dichas actividades, presenta los temas principales que se trataron. Se espera que será ampliamente leído y consultado no sólo por los futuros participantes en los talleres, sino también por otros fitopatólogos de países en desarrollo. Mediante el repaso conciso de principios, así como también una clara descripción de las metodologías apropiadas a la investigación en países en desarrollo, esta obra promoverá la aplicación práctica de la fitopatología en programas de mejoramiento de trigo y otros cereales de grano pequeño.

Los autores desean agradecer al Ministerio de Relaciones Exteriores del Gobierno de los Países Bajos y al Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) el apoyo económico, logístico y material que hizo posible los talleres y, posteriormente, la publicación de este manual. Los comentarios y preguntas de los participantes en los talleres fueron muy útiles para mejorar las ponencias de las que surgió este manual.



Primera parte. Introducción

1. Cereales: un panorama general

Las plantas constituyen el 93% de la dieta mundial. Los cereales contribuyen dos terceras partes de los alimentos primarios y entre ellos, el trigo es el cultivo más importante. Los ocho principales cereales (trigo, maíz, arroz, cebada, sorgo, avena, mijo y centeno) ocupan 56% de la tierra arable del mundo y son la fuente principal de calorías y proteínas para la mayor parte de la población mundial (cuadro 1.1). El trigo, el maíz y el arroz representan el 80% de la producción mundial de cereales.

La producción triguera de los países en desarrollo durante la década de los 70 aumentó a una tasa anual de 4.8%, el mayor incremento de todos los cereales. Una elevada proporción de este crecimiento se obtuvo en los cinco principales países en desarrollo productores de dicho cereal, China, India, Paquistán, Turquía y Argentina (cuadro 1.2), que en conjunto aportan el 82% de toda la producción de los países en desarrollo. Entre de los principales productores, China registró los incrementos más marcados.

1.1 Trigo

A nivel mundial, es evidente que la producción triguera y las tierras sembradas con trigo se concentran en el hemisferio norte. Los principales tipos de trigo comercial son el trigo harinero y el trigo duro. El trigo harinero se cultiva en cerca del 90% del área triguera mundial y contribuye alrededor de 94% de la producción. El trigo duro tiene una distribución menos extensa y se siembra principalmente en África del Norte, el Cercano y Medio Oriente, la URSS, India, Italia, Francia, el norte de Estados Unidos y algunas regiones de Canadá.

Dado que es uno de los alimentos básicos más importantes del mundo, el trigo se consume en muchas formas. Su uso más importante es la fabricación de harina, la base de todos los panes, galletas y pasteles, pero además se emplea para hacer cereales para el desayuno, bulgur, cuscús y pastas. El trigo es también

una fuente comercial de almidón y se usa en una gran variedad de industrias, desde el procesamiento de alimentos hasta la fabricación de papel, desde la lavandería hasta la perforación de pozos petroleros.

La dependencia continua del trigo como uno de los alimentos esenciales a la nutrición mundial requiere que el nivel y la estabilidad de la producción sigan incrementándose para reducir la desnutrición hasta donde sea posible.

Clasificación de trigos. Las especies de trigo más importantes en la agricultura son *Triticum aestivum* ssp. *aestivum* (trigo harinero) y *T. turgidum* ssp. *durum* (trigo duro). En el cuadro 1.3 (página 3) se dan

detalles completos de las especies y subespecies del género *Triticum* que forman parte de la tribu *Triticeae* de la familia de las gramíneas. Estos y otros miembros de la tribu se presentan enseguida:

Tribu	Subtribu	Género
Triticeae	Triticinae	<i>Triticum</i> (trigo) <i>Aegilops</i> <i>Agropyron</i> <i>Haynaldia</i> <i>Secale</i> (centeno)
	Hordinae	<i>Elymus</i> <i>Hordeum</i> (cebada) <i>Sitanion</i>

Cuadro 1.1. Superficie y producción mundial de cereales en 1981, por cultivo.

Cultivo	Superficie		Producción	
	Hectáreas (miles)	% del total	Ton (miles)	% del total
Trigo	239,381	33	458,195	28
Maíz	134,024	18	451,704	27
Arroz	144,915	20	413,785	25
Cebada	79,751	11	158,488	10
Sorgo	47,762	7	71,984	4
Mijo	43,203	6	29,652	2
Avena	26,810	3	44,024	3
Centeno	15,302	2	24,443	1
Total	731,148	100	1,627,832	100

Fuente: Libro anual de la producción de FAO, 1981.

Cuadro 1.2. Incremento en la producción triguera de los principales países productores (en desarrollo).

Países	Producción (miles de ton)		Crecimiento anual en los 70 (%/o)
	1969-71	1978-81	
China	29,687	57,964	6.7
India	20,859	34,599	5.1
Turquía	11,423	17,054	4.0
Paquistán	6,796	10,698	4.5
Argentina	5,873	7,993	3.1

El origen del trigo. Como todos los cultivos, el trigo se derivó de ancestros silvestres mediante un proceso de domesticación realizado por el hombre, que probablemente se inició en el período neolítico. El primer trigo que se cultivó parece haber sido *Triticum monococcum* (carraón). Esta especie tiene siete pares de cromosomas (14 en total) y se considera diploide. Se han observado en zonas de Asia Occidental (figura 1.1) poblaciones puras de carroaón que crecen en estrecha asociación con otro miembro de la misma subtribu, específicamente, *Aegilops speltoides*. Los estudios citológicos demuestran que la segunda forma primaria de trigo cultivado, *Triticum turgidum* ssp. *dicoccum* (escanda), probablemente se originó mediante una cruce intergenérica entre esas dos especies. Como sus dos juegos de cromosomas (con siete pares cada uno) son diferentes, esta cruce tuvo que doblar el número de cromosomas para ser fecunda. Esto explica el hecho de que la escanda,

que es un tetraploide, posea 14 pares, o sea 28 cromosomas (cuatro veces el conjunto básico de siete y dos veces el del carroaón). Se cree que una cruce intergenérica posterior entre la escanda cultivada y *Aegilops squarrosa* silvestre (mediante el mismo proceso de duplicación de los cromosomas) dio lugar a la evolución de los trigo hexaploides o harineros (con seis veces el conjunto básico de cromosomas, o sea 42 cromosomas, formados por 21 pares). Esta secuencia evolutiva se representa en el siguiente diagrama:

1.2 Cebada

Aunque de menos importancia que el trigo en el contexto de la producción de cereales mundial, la cebada es un grano básico en muchas regiones, sobre todo en las que las condiciones de producción son pobres y la precipitación pluvial es escasa y esporádica. Bajo tales condiciones, la cebada, que rinde una producción mayor por unidad de agua, a menudo es el único cultivo económicamente factible.

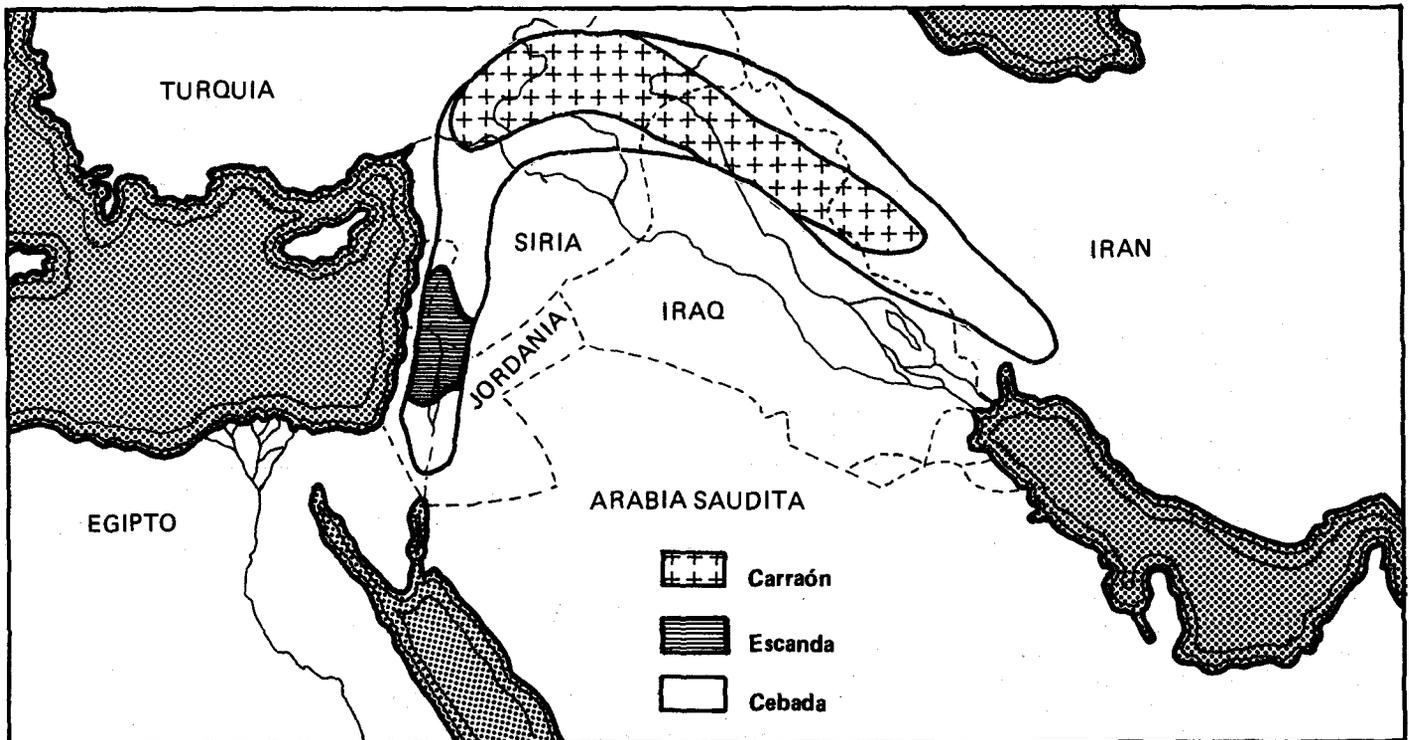
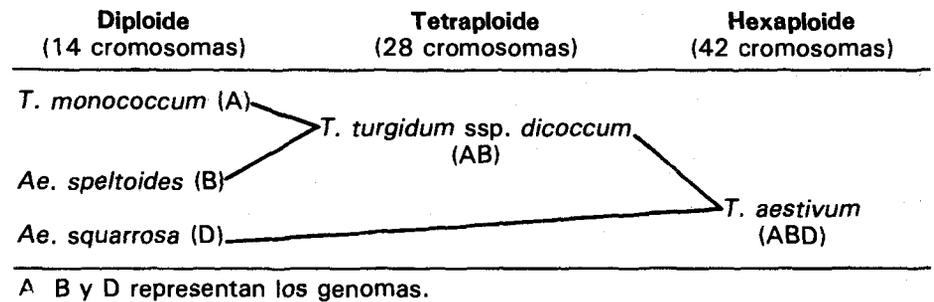


Figura 1.1. Distribución natural de trigos y cebadas ancestrales (según Isaac, 1970).

La URSS, Europa y Asia producen en conjunto alrededor del 84% de la cebada que se cosecha en cerca del 80% de la superficie mundial sembrada con dicho cereal. La mayor parte de esta producción se destina al alimento animal, especialmente en los países más prósperos. Sin embargo, muchos de los países en el sur y el este de Asia, así como en el norte y el este de África dedican una parte sustancial de su producción de cebada al alimento humano. Por lo tanto, en estos países la cebada desempeña una función crítica en la nutrición.

Clasificación de la cebada. La clasificación de la cebada es bastante más sencilla que la del trigo debido a que existe una sola especie cultivada, *Hordeum vulgare*. Como en el trigo, el género *Hordeum* pertenece a la tribu *Triticeae* de la

familia de las gramíneas. Se considera que *Hordeum vulgare* consta de tres subespecies.

ssp. *hexastichum* cebada de seis hileras
 ssp. *distichum* cebada de dos hileras
 ssp. *irregulare* cebada irregular

Estas subespecies se distinguen por el número de espiguillas que producen granos en cada uno de los nudos de la espiga; en los tipos de dos hileras sólo una de las tres espiguillas es fecunda, en tanto que en las variedades de seis hileras las tres espiguillas producen granos.

Origen de la cebada. Las únicas formas verdaderamente silvestres de *Hordeum* son las de dos hileras. A pesar de las discusiones al respecto, ahora se considera que las cebadas que se cultivan en la actualidad, al igual que los trigos, se domesticaron

en la región de Asia Occidental. Todavía se encuentran grandes poblaciones de cebada silvestre de dos hileras en esta zona. La figura 1.1 muestra la distribución natural de cebadas y trigos ancestrales. Se supone que fue en estas zonas donde las formas cultivadas evolucionaron.

Los primeros indicios del cultivo de cebadas de dos hileras, encontrados al pie de las montañas Zagros en Iraq, se remontan a cerca del año 7000 antes de Cristo. Al parecer, las variedades de seis hileras evolucionaron en una época posterior y los estudios citogenéticos han demostrado que su evolución quizá sea el resultado de una sola mutación recesiva. A partir del año 500 antes de Cristo, ambos tipos se distribuyeron ampliamente en todo el Cercano Oriente y, en una fecha posterior, en Europa.

Cuadro 1.3. Características del género *Triticum*.

Nombre científico	Nombre común	Número de cromosomas (n)	Fórmula del genoma	Tipo de semilla*	Probable región de origen
Diploides					
<i>T. monococcum</i>	Carraón	7	AA	H	Armenia, Georgia, Turquía
Tetraploides					
<i>T. turgidum</i>					
ssp. <i>dicoccum</i>	Escanda	14	AABB	H	Georgia, Abisinia
ssp. <i>durum</i>	Duro	14	AABB	N	Abisinia, Mediterráneo
ssp. <i>turgidum</i>	Rivet	14	AABB	N	Abisinia, Sur de Europa
ssp. <i>polonicum</i>	Polaco	14	AABB	N	Abisinia, Mediterráneo
ssp. <i>carthlicum</i>	Persa	14	AABB	N	Georgia, Armenia, Noreste de Turquía
ssp. <i>turanicum</i>	Khorasan	14	AABB	N	Mediterráneo, Cercano Oriente
<i>T. timopheevii</i>	—	14	AAGG	H	Oeste de Georgia, Abisinia
Hexaploides					
<i>T. aestivum</i>					
ssp. <i>spelta</i>	Espelta	21	AABBDD	H	Austria, Alemania
ssp. <i>macha</i>	Macha	21	AABBDD	H	Oeste de Georgia
ssp. <i>vavilovii</i>	Vavilov	21	AABBDD	H	Armenia Turca
ssp. <i>aestivum</i>	Trigo harinero	21	AABBDD	N	Suroeste de Asia, Europa Central
ssp. <i>compactum</i>	Club	21	AABBDD	N	Afganistán, Armenia
ssp. <i>sphaerococcum</i>	Shot	21	AABBDD	N	Noroeste de India

Fuente: Martin *et al.*, 1976.

* N: desnudo; H: cubierto.

1.3 Morfología y crecimiento de trigo y cebada

La semilla o grano de los cereales (técnicamente la cariopsis) está formado por tres partes principales: el pericarpio o cubierta protectora que rodea y encierra toda la semilla, el embrión o germen que es la planta en estado de latencia, y el endosperma que es el alimento almacenado utilizado por el embrión para crecer desde la germinación hasta que la plántula tiene suficiente tejido fotosintético para alimentarse a sí misma (figura 1.2).

En el proceso de la germinación, el embrión, en estado de latencia dentro de la semilla seca, inicia su crecimiento al encontrarse en condiciones ambientales favorables. Durante la germinación, el embrión se dilata y rompe el pericarpio; a partir de esta rotura se desarrollan la radícula (raíz) y la plúmula (brote) (figura 1.3).

Los factores que afectan la germinación incluyen el suministro de agua, la concentración de oxígeno, la temperatura del suelo, la luz, la viabilidad de la semilla, el tamaño de la semilla, el grado de madurez del embrión, las infecciones por microorganismos, el daño al pericarpio y el grado de latencia inherente de la semilla (se refleja en la presencia en el pericarpio de sustancias químicas inhibitorias de la germinación).

Desde la emergencia de la plántula en la superficie del suelo hasta la producción de semillas maduras, el crecimiento de la planta de trigo o de cebada se puede dividir en varias etapas (algunas veces simultáneas). Zadoks *et al.* (1974) las clasificaron de la siguiente manera:

1. Crecimiento de la plántula. Las hojas se despliegan, desde la aparición de la primera a través del coleoptilo hasta que brota la lígula de la hoja bandera.
2. Macollamiento. Brotes adicionales (secundarios) surgen de la corona de la planta.

3. Alargamiento del tallo. El primerseudotallo está erecto y aparecen los nudos; la vaina de la hoja superior no está hinchada por la espiga.
4. Embuchamiento. La espiga es evidente en la hoja superior llamada hoja bandera.
5. Emisión de la espiga. La espiga emerge de la vaina.
6. Floración. Las florecillas se abren; el polen se desprende.
7. Estado lechoso. El ovario fecundado alcanza el tamaño de la semilla madura; su contenido se vuelve blanco y opaco.
8. Estado masoso. El contenido del ovario se solidifica.
9. Madurez. La semilla se endurece y está lista para cosecharse.

En la figura 1.4 y su guía correspondiente (página 6) se presenta una escala más detallada de los estadios identificados por Zadoks.

La espiga de la planta de trigo o de cebada está compuesta de varias espiguillas distribuidas a lo largo de ambos lados del raquis. Cada espiguilla está integrada por flores individuales (florecillas). Cada florecilla contiene los órganos femeninos (los pistilos) y los órganos masculinos (los estambres) encerrados en una cubierta protectora, la lema y la palea (figura 1.5, página 7). Durante la floración, las florecillas se abren y las partes de los estambres que contienen el polen (las anteras) se abren y lo liberan. El polen puede ser acarreado por el viento a otras flores (polinización cruzada) o, como sucede más comúnmente en los cereales, cae sobre los estigmas (partes receptoras de los órganos femeninos) de su propia flor (autopolinización). El

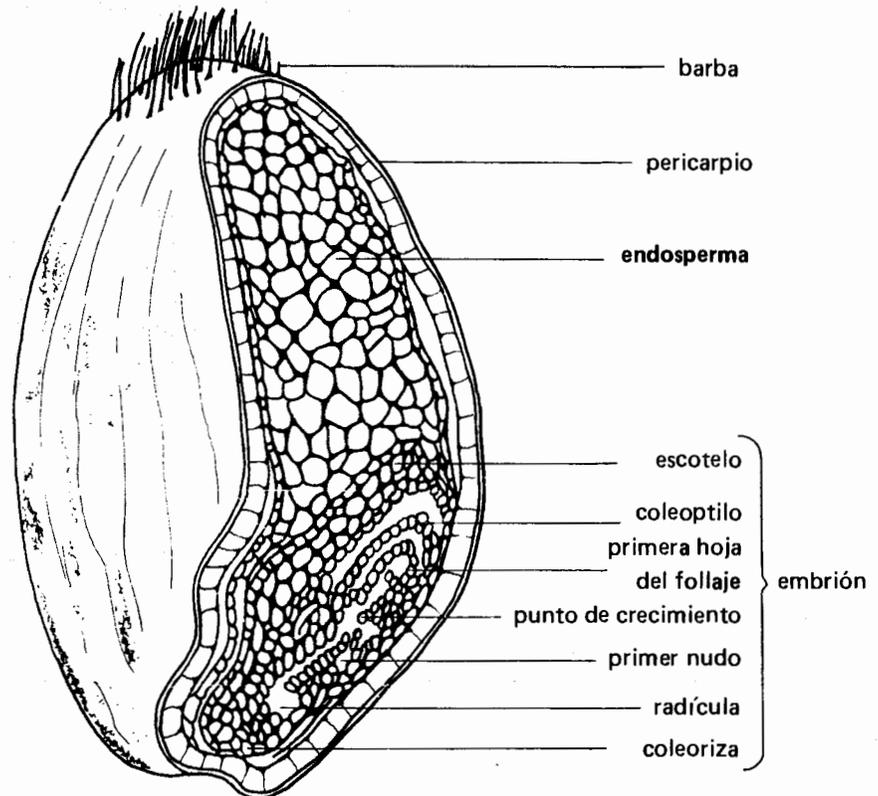


Figura 1.2. El grano de trigo.

grano de polen produce un tubo que crece hacia abajo, penetra el estilo (estructura que sostiene los estigmas), y llega al ovario donde se encuentra la parte reproductora femenina (el óvulo). Los núcleos del polen penetran en el óvulo y lo fecundan, iniciando así la producción y desarrollo de la semilla, que consta del embrión y el endosperma y se encuentra dentro del ovario maduro que se transformará en pericarpio.

Hábito de crecimiento. El trigo y la cebada se cultivan en una amplia variedad de condiciones ambientales gracias a la considerable diversidad del material genético inherente a ambos géneros y sus especies correspondientes. Se considera que generalmente ambos cultivos tienen uno de tres hábitos de crecimiento diferentes: de invierno, de primavera o intermedio (también conocido como facultativo).

Las variedades con hábito de crecimiento invernal se siembran en otoño o invierno. Las semillas germinan y las plántulas emergen y crecen vegetativamente. Estas variedades permanecen en un estado vegetativo durante todo el invierno debido a que requieren de vernalización (exposición al frío, usualmente durante uno a dos

meses) para que se inicie la formación y el crecimiento de sus órganos reproductores. Por tanto, hasta cierto punto son tolerantes a las heladas y a las bajas temperaturas. Cuando en la primavera el crecimiento se reanuda, éste es en gran parte vegetativo al principio (aumento en la superficie foliar), pero el desarrollo reproductivo, que incluye la extensión (o alargamiento) acelerada del tallo, rápidamente sobrepasa e inhibe el crecimiento vegetativo.

En contraste, las variedades con hábito de crecimiento de primavera no requieren de vernalización para iniciar su crecimiento reproductivo y en general son mucho menos tolerantes al frío. En lugares donde el invierno es riguroso, estas variedades se pueden sembrar sólo después de que ha pasado el peligro de las heladas. Bajo condiciones climáticas más favorables, los trigos con hábito de primavera pueden sembrarse en otoño o invierno, si existe poco o ningún peligro de heladas.

Los trigos y las cebadas con hábito de crecimiento facultativo tienen características intermedias entre las de las variedades de invierno y de primavera y pueden sembrarse en otoño o invierno en los lugares donde las temperaturas invernales no bajan más allá de unos cuantos grados bajo 0°C. En general tienen una adaptación más amplia que los otros dos tipos.

Es posible encontrar los tres hábitos de crecimiento en las variedades comerciales de trigo harinero, trigo duro y cebada. El trigo y la cebada no sólo se adaptan a diferentes temperaturas, sino también a fotoperíodos distintos para iniciar su floración y alcanzar las condiciones óptimas para la producción de semillas. Desde un punto de vista práctico, se ha encontrado que un fotoperíodo de 14 horas es la medida

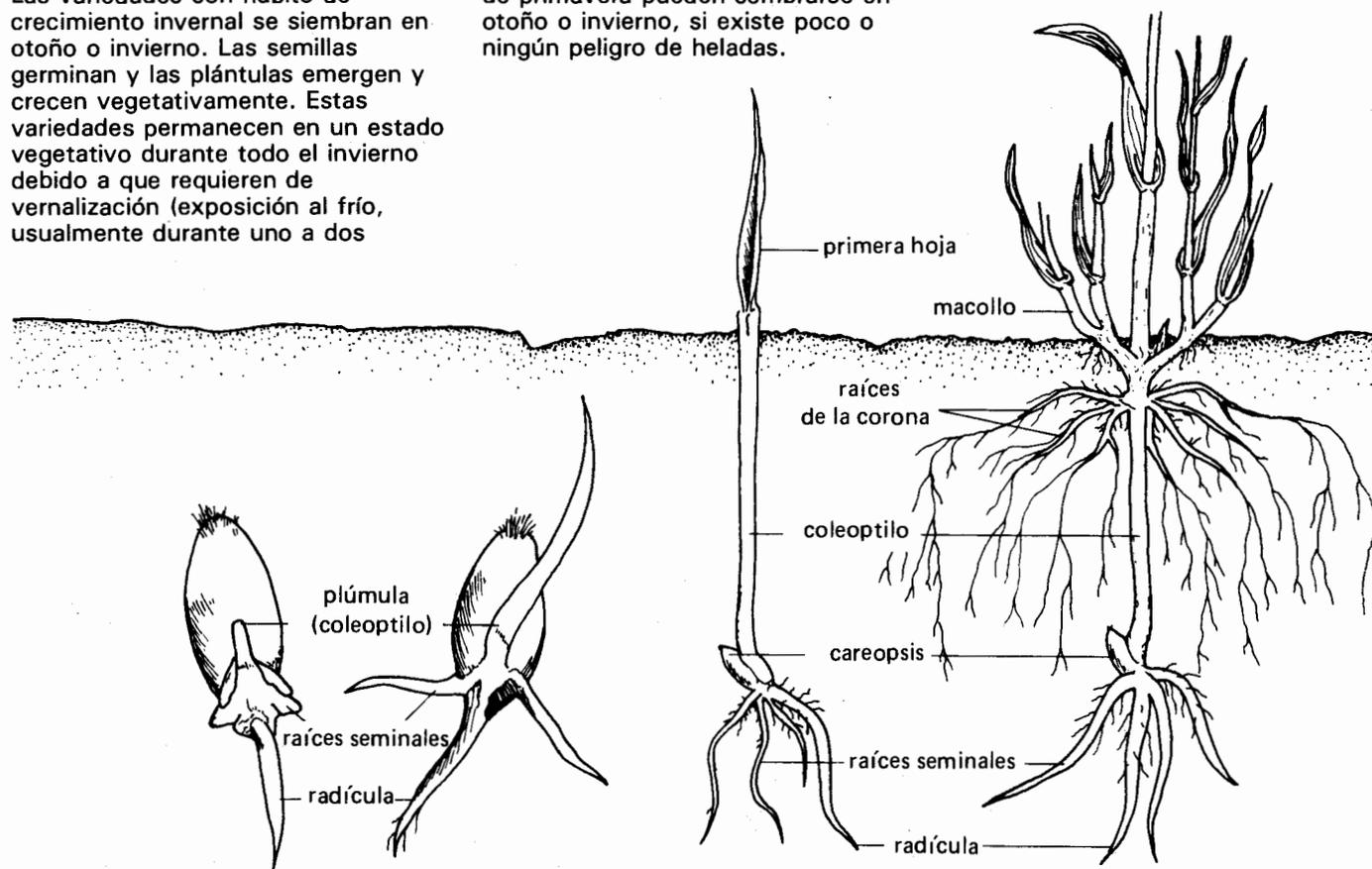


Figura 1.3. Estadios de la germinación.

Guía de la figura 1.4 Descripciones de los estadios principales y secundarios del crecimiento en la escala de Zadoks, de acuerdo con la modificación de Tottman y Makepeace (1979).

Codificación	Estadio	Codificación	Estadio	Codificación	Estadio
0	Germinación	28	Brote principal y ocho macollos	6	Floración
00	Semilla seca	29	Brote principal y nueve macollos o más	61	Comienzo de la floración
01	Empieza la imbibición			65	Mitad de la floración completa
03	Imbibición completa	3	Alargamiento del tallo	69	Floración completa
05	La radícula emerge de la semilla	30	Seudotallo erecto (sólo cereales de invierno)	7	Estado lechoso
07	El coleoptilo emerge de la semilla	31	Se detecta el primer nudo	71	Madurez acuosa
09	Hoja justo en la punta del coleoptilo	32	Se detecta el segundo nudo	73	Estado lechoso temprano
		33	Se detecta el tercer nudo	75	Estado lechoso medio
1	Crecimiento de la plántula	34	Se detecta el cuarto nudo	77	Estado lechoso tardío
10	Primera hoja emerge del coleoptilo	35	Se detecta el quinto nudo		
11	Primera hoja desplegada	36	Se detecta el sexto nudo	8	Estado masoso
12	Dos hojas desplegadas	37	Hoja bandera apenas visible	83	Comienzo del estado lechoso
13	Tres hojas desplegadas	39	Lígula de la hoja bandera apenas visible	85	Madurez masosa suave (la impresión de la uña no permanece)
14	Cuatro hojas desplegadas			87	Madurez masosa dura (la impresión de la uña se mantiene; la testa pierde clorofila)
15	Cinco hojas desplegadas	4	Embuchamiento		
16	Seis hojas desplegadas	41	La vaina de la hoja bandera se extiende	9	Madurez
17	Siete hojas desplegadas	43	Embuchamiento apenas visible	91	Grano duro (difícil de dividir con la uña)
18	Ocho hojas desplegadas	45	Embuchamiento hinchado	92	Grano duro (no se puede marcar con la uña)
19	Nueve o más hojas desplegadas	47	La vaina de la hoja bandera se abre		
		49	Las primeras barbas visibles	93	Grano suelto durante el día
2	Macollamiento	5	Emisión de la espiga	94	Sobremadurez; paja muerta
20	Sólo el brote principal	51	La primera espiguilla de la espiga apenas visible	95	Dormancia de la semilla
21	Brote principal y un macollo	53	Emerge una cuarta parte de la espiga	96	Semilla viable germina un 50% o
22	Brote principal y dos macollos	55	Emerge la mitad de la espiga	97	Semilla sin dormancia
23	Brote principal y tres macollos	57	Emergen tres cuartos de la espiga	98	Dormancia secundaria inducida
24	Brote principal y cuatro macollos	59	Emisión de la espiga completa	99	Dormancia secundaria perdida
25	Brote principal y cinco macollos				
26	Brote principal y seis macollos				
27	Brote principal y siete macollos				

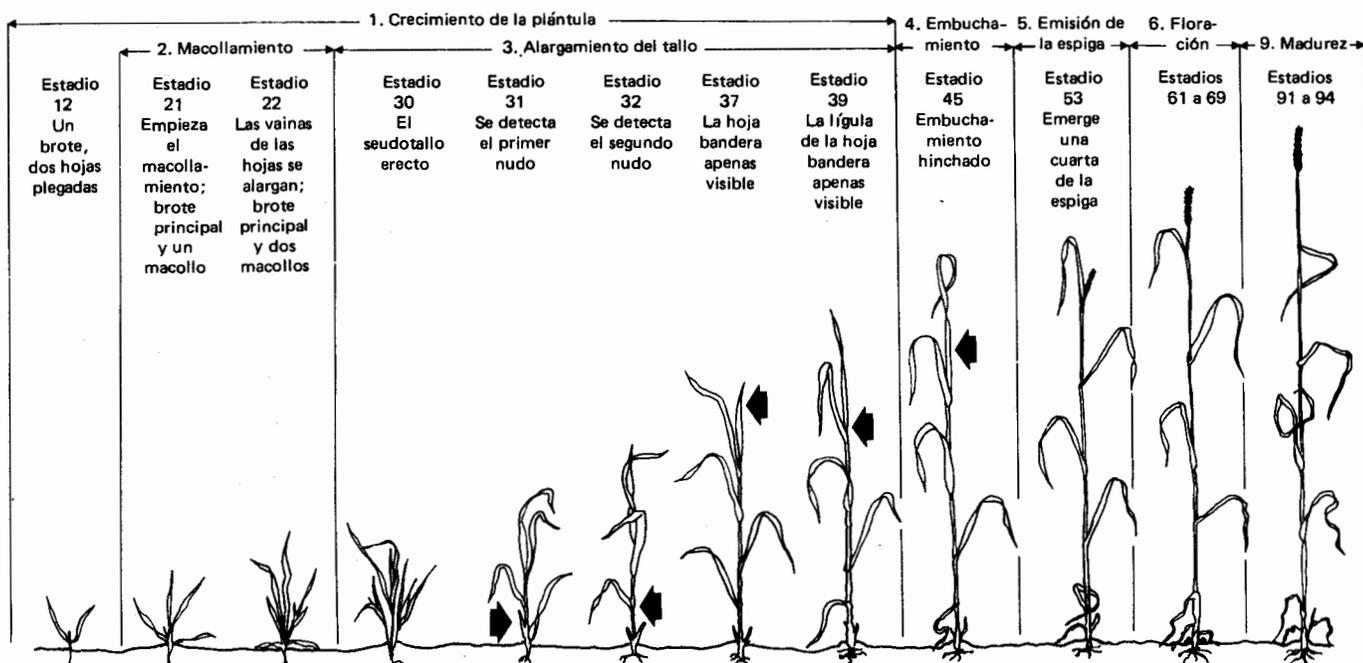


Figura 1.4. Escala de Zadoks para los estadios de crecimiento de los cereales.

conveniente para clasificar los tipos de plantas según su respuesta a la luz. Las plantas pueden ser:

- 1) Variedades de fotoperíodo largo, que florecen rápidamente cuando el fotoperíodo excede las 14 horas.
- 2) Variedades de fotoperíodo corto, que florecen rápidamente sólo cuando el fotoperíodo es menor de 14 horas.
- 3) Variedades intermedias o neutrales a la duración del día, que florecen con rapidez en fotoperíodos muy distintos y al parecer no tienen un fotoperíodo crítico.

Determinantes genéticas del crecimiento vegetal. La constitución básica de cualquier planta depende de los caracteres que hereda en su composición genética. Dichos caracteres (tales como altura de la planta, hábito de crecimiento, respuesta al fotoperíodo, rendimiento potencial y resistencia a enfermedades) son controlados por unidades de herencia (genes) que se encuentran en los cromosomas de las células. Estos genes son muy diferentes y se heredan en distintas combinaciones como resultado de la división cromosómica en la formación de gametos durante la meiosis y la recombinación de cromosomas cuando los óvulos (gametos femeninos) son fecundados por los

núcleos del tubo de polen (gametos masculinos). Algunos caracteres son controlados por pocos genes (o uno solo) y se denominan cualitativos (la herencia de los diferentes genes inmediatamente confiere ciertas características a la planta, como por ejemplo, el hábito de crecimiento y la resistencia a enfermedades). Otros caracteres son determinados por varios genes y se les clasifica como cuantitativos (el efecto de un solo gen es relativamente pequeño, pero un mayor número causa una expresión más intensa de caracteres específicos). El rendimiento es un ejemplo de los caracteres cuantitativos.

La expresión de la composición genética heredada depende a su vez de la interacción entre los caracteres heredados y el medio en el que crecen las plantas. El ambiente, que incluye características físicas (como luz, temperatura, topografía, suelos, etc.) y componentes biológicos (otras plantas, plagas y enfermedades), limita la manera en que los cultivos crecen y producen. Los componentes biológicos del ambiente son particularmente importantes como resultado de las alteraciones ambientales ocasionadas por la expansión del monocultivo y la reducción gradual de la diversidad genética del trigo y la cebada. Las enfermedades provocadas por organismos patógenos quizá sean la limitación ambiental más importante que afecta el incremento de la producción de cereales y el cultivo cada vez más extenso de los mismos en el mundo.

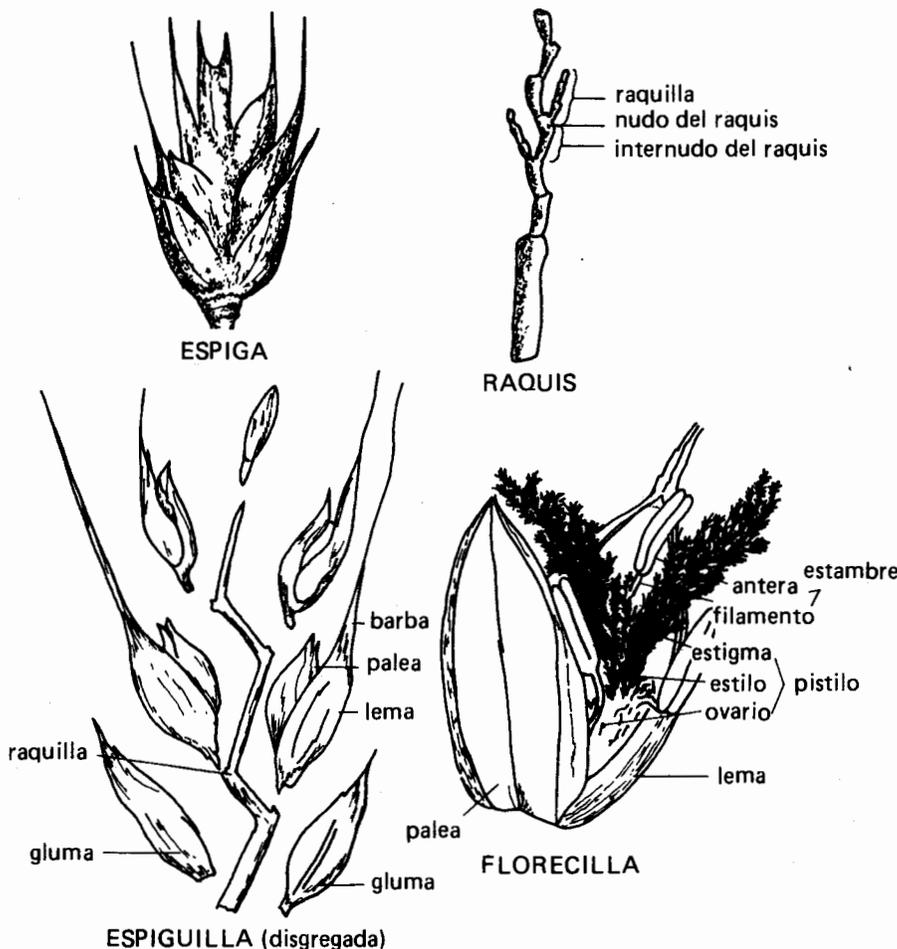


Figura 1.5. Estructura de la espiga, espiguilla y florecilla del trigo.

Segunda parte. Las enfermedades y su evolución

2. Principales enfermedades del trigo y la cebada

Los hongos son con mucho los organismos patógenos más dañinos, pues disminuyen el rendimiento de los cereales a los que atacan. Entre estos hongos, el género *Puccinia* (royas), *Ustilago* (carbones desnudos), *Tilletia* (carbones cubiertos), *Erysiphe* (mohos polvorientos), *Septoria*, *Alternaria*, *Helminthosporium*, *Fusarium* y *Pythium* son los más comunes, pues ocurren con regularidad y son potencialmente los más peligrosos del mundo.

Estudios de la distribución y relativa importancia de estas enfermedades muestran el significado sobresaliente de las royas, especialmente en el trigo (cuadro 2.1 y 2.2). Dichos estudios también demuestran la creciente trascendencia de otros patógenos tales como las especies de *Helminthosporium* (que causan manchas foliares, pudriciones de la raíz y punta negra del grano), especies de *Erysiphe* (mohos polvorientos), especies de *Ustilago* (carbones desnudos) y especies de *Tilletia* (carbones).

2.1 Royas de los cereales

Puccinia graminis (causa la roya negra o del tallo), *P. recondita* (la roya de la hoja), *P. striiformis* (produce la roya lineal o amarilla), *P. hordei* (enanismo o roya de la hoja) y *P. coronata* (la roya de la corona o de la hoja) regularmente producen serias pérdidas de trigo, cebada, avena y centeno en todo el mundo. Debido a su impacto fundamental como limitante de la productividad en casi todos los países productores de cereales, las royas merecen atención especial y minuciosa.

Cuadro 2.1. Distribución e importancia de las enfermedades del trigo en el Medio Oriente y Africa del Norte.

Países	Enfermedad* e importancia relativa									
	RT	RL	RH	CD	CC	MP	S	A	H	PRF
Afganistán	2	1	5	4	7	6	3	—	—	8
Turquía										
Altiplanicie	4	1	6	3	2	—	—	—	—	5
Costa	1	1	6	5	7	4	3	10	9	8
Sureste	5	3	4	2	1	—	—	—	—	6
Chipre	1	3	2	tR	tR	5	4	tR	tR	tR
Siria	2	5	3	4	1	—	—	—	—	—
Iraq	—	2	1	—	—	—	tR	—	tR	—
Líbano	3	1	2	—	—	—	—	—	—	—
Jordania	2	—	—	—	1	—	—	—	—	—
Arabia Saudita	1	4	3	2	—	—	—	—	—	—
Egipto	3	1	2	—	—	—	—	—	—	—
Libia	1	—	2	3	—	—	—	—	—	—
Argelia	4	2	3	6	5	7	1	10	9	8
Túnez	3	7	6	2	1	7	4	—	—	5
Marruecos	3	—	1	1	5	4	2	—	6	—

Los números expresan la importancia de la enfermedad; el 1 indica la más importante; tR: trazas; raya: nada.

* A: *Alternaria*; CC: carbón común; H: *Helminthosporium*; RH: roya de la hoja; MP: mildiú polvoriento; PRF: pudrición de raíz y *Fusarium*; S: *Septoria*; CD: carbón desnudo; RT: roya del tallo; RL: roya lineal.

Cuadro 2.2. Distribución e importancia de las enfermedades de cebada en el Medio Oriente y Africa del Norte.

Países	Enfermedad* e importancia relativa						
	RT	RL	RH	MP	H	Sc	CD
Afganistán	4	1	6	1	3	2	4
Turquía	6	7	4	3	2	1	5
Chipre	—	—	1	3	2	—	4
Siria	—	—	—	1	—	—	—
Iraq	—	—	—	—	1	—	—
Líbano	—	—	2	1	4	—	1
Jordania	6	7	3	2	4	—	1
Arabia Saudita	—	—	—	—	—	—	—
Egipto	4	—	2	3	1	—	—
Libia	—	—	—	2	—	3	1
Argelia	—	3	2	5	1	5	4
Túnez	7	6	4	3	1	5	2
Marruecos	—	—	3	4	1	—	2

Los números expresan la importancia de la enfermedad; el 1 indica la más importante; raya: nada.

* H: *Helminthosporium*; RH: roya de la hoja; MP: mildiú polvoriento; Sc: escaldadura; CD: carbón desnudo; RT: roya del tallo; RL: roya lineal.

Ciclo vital. Los hongos que causan las royas por lo general son parásitos obligados, pues son incapaces de completar su ciclo de vida en ausencia de una planta huésped. Los hongos han desarrollado un ciclo vital muy complejo que incluye numerosos tipos de esporas y en muchos casos alterna entre dos especies huéspedes. Su ciclo de vida completo se ilustra en la figura 2.1.; sin embargo, cabe señalar que el ciclo completo de dos huéspedes y cinco esporas no es común en las royas de los cereales, excepto en condiciones ambientales muy específicas. En la mayor parte de las zonas donde las condiciones son favorables, los hongos se reproducen casi exclusivamente en forma asexual por medio de urediosporas sobre el cultivo mismo, en plantas voluntarias o en especies afines. El ciclo de vida completo se da en unas cuantas zonas donde el cultivo principal o la gramínea huésped y el huésped alternativo crecen muy cerca unos de otros. Las siguientes especies de plantas actúan como

huéspedes alternativos de los principales patógenos de las royas de los cereales:

P. graminis—*Berberis* ssp. y *Mahonia* ssp.

P. striiformis—no se conocen

P. recondita—*Thalictrum* ssp., *Isopyrum* ssp., *Anchusa* ssp. y *Anemonella* ssp.

P. hordei—*Ornithogalum* ssp.

P. coronata—*Rhamnus* ssp.

En muchas regiones se puede encontrar una gramínea huésped (o huéspedes) todo el año, lo cual permite la sobrevivencia de las royas. En estas condiciones se considera que las royas son endémicas. Sin embargo, en numerosas áreas (principalmente donde predominan altas temperaturas y condiciones de sequía durante algunos meses) las especies huéspedes, y por tanto, los hongos, no sobreviven de una

temporada a otra. En los lugares donde estas condiciones prevalecen, las infecciones de royas se inician con inóculo trasladado de una fuente distante y se denominan exodémicas.

Taxonomía. La clasificación de los hongos de las royas en familias y géneros se basa en las características morfológicas de las teliosporas; las especies dentro de los géneros se distinguen por el número de huéspedes y las características de las urediosporas (figura 2.2, página 10).

El género *Puccinia* presenta alta especificidad en el huésped y es posible distinguir numerosas formas especiales dentro de cada especie según la gama de huéspedes. Las formas especiales son nombres que se refieren al huésped primario y en general tienen la habilidad de atacar a varias especies de gramíneas afines. Las que principalmente infectan a los cereales se incluyen en el cuadro 2.3 (página 10).

Los patógenos considerados dentro de cada forma especial se pueden dividir en razas fisiológicas y/o biotipos. Se define como biotipo una población de individuos con genotipos idénticos, y como raza fisiológica, un grupo de biotipos similares en morfología pero con diferentes caracteres fisiológicos, bioquímicos y patológicos, entre otros. Las razas fisiológicas (identificadas por números) se distinguen por sus respuestas diferenciales en variedades huéspedes seleccionadas. Aunque este sistema de clasificación es muy útil, no es posible emplearlo para identificar toda una colección de royas.

La identificación de razas fisiológicas se puede hacer de acuerdo con la respuesta de diferentes variedades de trigo y cebada a las infecciones de un cultivo de roya puro. Se revisan las plántulas de un número determinado de variedades; las infecciones se desarrollan totalmente de 10 a 15 días después de la inoculación si las condiciones son óptimas.

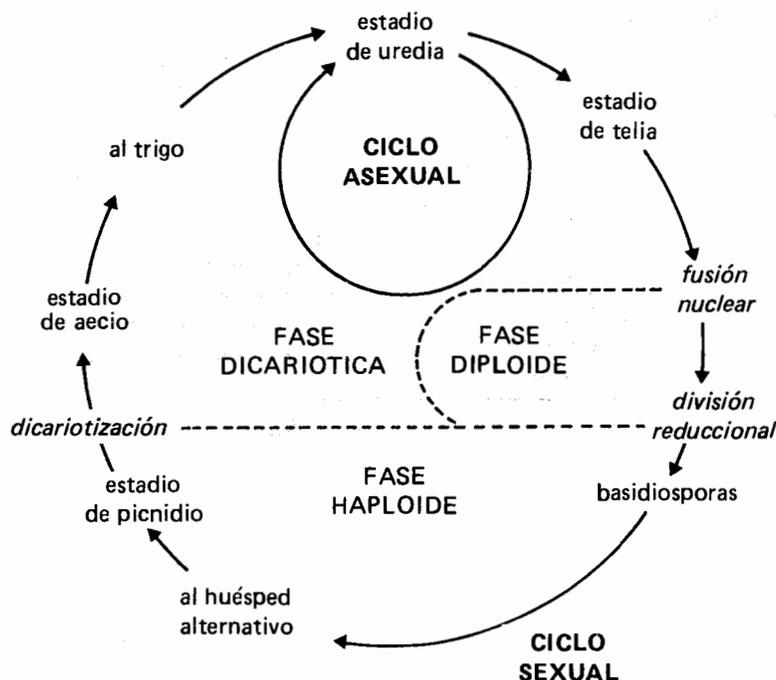


Figura 2.1. Generalización del ciclo vital del hongo de la roya del trigo (Loegering et al., 1967).

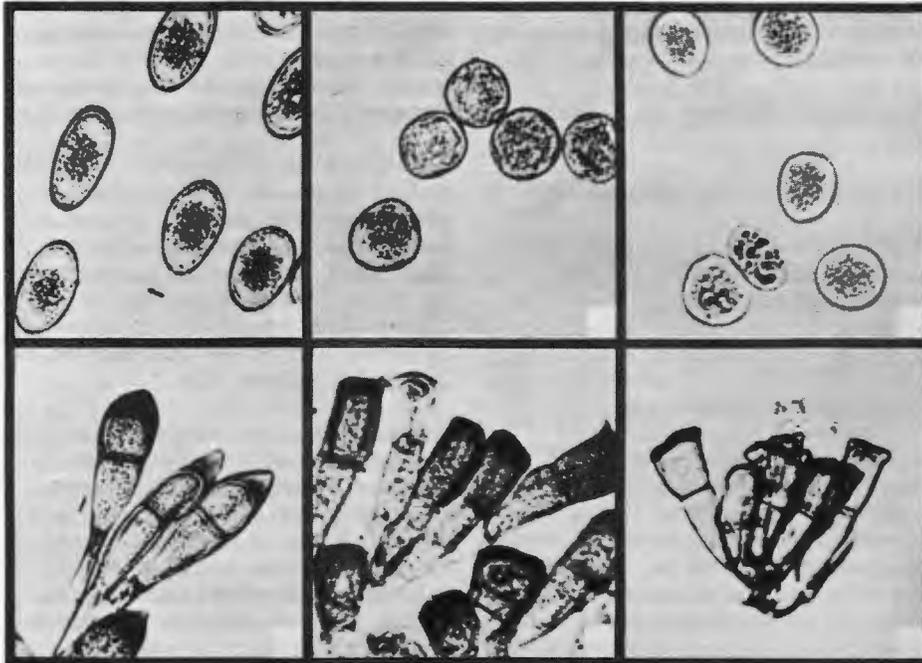


Figura 2.2. Urediosporas (hilera superior) y teliosporas (hilera inferior) de los hongos del tallo (A), de la hoja (B) y lineal (C), ampliadas cerca de 875 veces. Las esporas de la roya del tallo se diferencian fácilmente de las otras dos bajo el microscopio. Las esporas de las royas de la hoja y lineal son difíciles de diferenciar (foto del Departamento de Agricultura de Estados Unidos por cortesía de W.Q. Loegering).

Cuadro 2.3. Especies y formas principales de las royas de los cereales.

Patógeno		Huésped principal
Especie	Forma especial	
<i>Puccinia graminis</i> Pers.	<i>tritici</i> <i>secalis</i> <i>avenae</i>	Trigo, cebada Centeno, cebada Avena
<i>P. recondita</i> Rob. ex Desm.	<i>tritici</i>	Trigo
<i>P. striiformis</i> Westend.	<i>tritici</i> <i>hordei</i>	Trigo Cebada
<i>P. hordei</i> Orth.		Cebada
<i>P. coronata</i> Cda.		Avena

Cuadro 2.4. Tipos de infección básicos para clasificar los cultivos de las royas del tallo y de la hoja en el invernadero.

- 0 Inmune: Sin enfermedad.
- 0; Prácticamente inmune: Sin pústulas, pero pecas (pequeñas áreas de tejido muerto) por hipersensibilidad observables.
- 1 Muy resistente: Pústulas de la roya aisladas y muy pequeñas, a menudo rodeadas por pecas nítidas y continuas causadas por hipersensibilidad.
- 2 Moderadamente resistente: Las pústulas son de tamaño pequeño o mediano, generalmente presentes en áreas verdes rodeadas de tejido amarillo, clorótico o muerto.
- 3 Moderadamente sensible: Las pústulas son de tamaño mediano, generalmente separadas, sin áreas de tejido muerto; pueden aparecer partes amarillentas (cloróticas).
- 4 Sensible: Pústulas grandes, numerosas y con frecuencia unidas (aglutinadas); sin tejido muerto; la clorosis puede presentarse bajo condiciones de crecimiento desfavorables.
- X Reacción heterogénea (mesotética): Las pústulas son variables en tamaño; se pueden encontrar todos los tipos de infección en una hoja; no es posible la separación mecánica. Al aislarse y reinocularse, las pústulas pequeñas pueden producir grandes y viceversa.

Fuente: Stakman *et al.*, 1962.

Según la clasificación de la respuesta de los huéspedes, se pueden emplear trabajos publicados para determinar el número de una raza o para asignarle un número en caso de que sea una nueva raza. El método de codificación para tipos de royas del tallo o de la hoja se presenta en el cuadro 2.4. Aunque no se ha llegado a un acuerdo unánime entre quienes trabajan con las royas, la mayor parte de los investigadores de roya lineal clasifican las infecciones siguiendo el esquema general que aparece en el cuadro 2.5.

Los investigadores de Europa y de India que trabajan con la roya lineal han propuesto un sistema binario de notación para la nomenclatura de razas. Se le asigna a cada huésped diferencial un valor exponencial fijo (entero decimal). Las reacciones del huésped se clasifican como

resistentes (valor binario = 0) o sensibles (valor binario = 1). Se multiplica la base 2 por el valor del exponente y se obtiene un valor para cada huésped diferencial. La suma de todos los productos (el resultado de multiplicar la base 2 por el exponente) da como resultado el número de la raza. (A esta suma se le conoce como valor decanario [*decanery value*], término acuñado por investigadores europeos e hindúes). Este sistema permite identificar las variedades sensibles por la suma de enteros o el número de raza. Un ejemplo del uso de la notación binaria para nombrar una raza fisiológica se presenta en el cuadro 2.6.

Evolución de nuevos biotipos. Los hongos de las royas pueden producir nuevas variantes (biotipos) de diferentes maneras. Cuando ocurre el

ciclo de vida completo, que incluye un huésped alternativo, pueden proliferar nuevas variantes mediante la recombinación sexual (la producción de gametos en la meiosis y su fusión al azar durante la fecundación). Sin embargo, en muchas partes del mundo no es común que se dé el ciclo sexual completo de los hongos de la roya. (No se conoce un huésped alternativo para *P. striiformis*.) La mutación es otro mecanismo que puede provocar variabilidad patógena. Una producción de urediosporas muy elevada se observa aun a bajas frecuencias de mutación; por tanto, en estos patógenos la mutación es la fuente principal de variabilidad. Otros mecanismos que se reconocen como causantes de variación en las royas son la heterocariosis y la hibridación somática (parasexualidad). Bajo condiciones de campo, hay poca evidencia respecto a la importancia de estos dos mecanismos.

Cuadro 2.5. Clasificación general de los tipos de infección de roya lineal.

Descripción del tipo de infección	Símbolo de codificación*	Valor en el índice
Sin datos		
Sin infección visible	0	0
Moteado necrótico/clorótico sin esporulación	MR	1
Líneas necróticas/cloróticas sin esporulación	R	2
Líneas necróticas/cloróticas con trazas de esporulación	MoR	3
Líneas necróticas/cloróticas con esporulación ligera	LoM	4
Líneas necróticas/cloróticas con esporulación intermedia	Mo	5
Líneas necróticas/cloróticas con esporulación moderada	EM	6
Líneas necróticas/cloróticas con esporulación abundante	MoS	7
Clorosis abajo de la esporulación-esporulación abundante	S	8
Sin necrosis ni clorosis con abundante esporulación	MS	9

Fuente: Mc Neal *et al.*, 1971.

* E: elevado, L: ligero, Mo: moderado, R: resistente, S: sensible, M: muy.

Cuadro 2.6. Uso de la notación binaria para nombrar una raza fisiológica.

Huésped diferencial	G	F	E	D	C	B	A
Potencia de base 2	2 ⁶	2 ⁵	2 ⁴	2 ³	2 ²	2 ¹	2 ⁰
Reacción del huésped	R	R	S	R	S	S	R
Valor binario	0	0	1	0	1	1	0
Productos	0	0	16	0	4	2	0

Suma de los productos = 22 = número de raza

Estudios sobre la genética de los patógenos de la roya revelan la presencia de numerosos genes que causan virulencia (la habilidad inherente para producir enfermedades), muchos de los cuales son recesivos y permanecen en estado heterocigótico. Una sola mutación que resultara en el predominio de uno de estos genes permitiría la expresión total del carácter de virulencia en un nuevo biotipo. Por esta razón, no sorprende que la investigación indique que muchos genes de virulencia tienen su origen en una mutación. Los estudios de las interacciones entre huésped y parásito en el sistema roya-trigo señalan la existencia de una relación muy estrecha entre la genética de la virulencia patógena y la resistencia del huésped. Se ha formulado una hipótesis respecto a la asociación de gen por gen, que implica una relación directa entre los genes de resistencia del huésped y los genes de virulencia del parásito. Esta hipótesis de uno a uno ha ganado mucha aceptación.

3. Desarrollo de las epifitias naturales

El ciclo de desarrollo de los organismos patógenos y las enfermedades, desde el inóculo primario a la infección de las plantas y nuevamente al inóculo primario, varía considerablemente. De acuerdo con esto, se pueden clasificar los hongos patógenos en dos grupos, a saber, los de ciclo único y los de ciclo múltiple (figura 3.1).

Las enfermedades de ciclo único. Los hongos patógenos de ciclo único no tienen mecanismos para la propagación secundaria en el cultivo huésped. Por consiguiente, toda manifestación de la enfermedad es consecuencia de infecciones causadas por el inóculo primario y, el aumento de la enfermedad es resultado de un mayor número de infecciones primarias a medida que el ambiente se vuelve más favorable. Las enfermedades incluidas en esta categoría comprenden los carbonos y las pudriciones del pie, transmitidos fundamentalmente por el suelo.

Las enfermedades de ciclo múltiple. Los organismos patógenos de ciclo múltiple pueden propagarse en un cultivo infectado mediante la producción continua de esporas infectantes (inóculo secundario). De este modo, aun en los grados muy bajos de infección primaria pueden provocar daños graves a los cultivos. En consecuencia, se considera que los organismos patógenos de este tipo (por ejemplo, *Puccinia*,

Helminthosporium y *Septoria* spp.) poseen un potencial como causas de enfermedades inherentemente superior al de los organismos de ciclo único. Por consiguiente, la discusión se restringirá a las enfermedades de ciclo múltiple.

3.1. Establecimiento de la enfermedad

El inóculo. El primer requisito para que se establezca una enfermedad es que el inóculo (la parte del organismo patógeno portadora de la infección al huésped) se ponga en contacto con la superficie de un huésped adecuado. Las partículas de inóculo pueden existir en formas diferentes, ya sea como esporas, masas de micelio, células bacterianas o partículas virales.

Las infecciones anteriores dan origen al inóculo de la enfermedad que, una vez liberado en el medio, constituye un reservorio de infección en potencia. Esta infección puede ser producida por pocas o muchas plantas infectadas y provenir del mismo lugar donde se presenta la enfermedad o haber recorrido grandes distancias; además, puede ser *primaria* (resultado de infecciones en una estación anterior) o *secundaria* (consecuencia de infecciones anteriores en la misma estación). Las infecciones con roya, por ejemplo, pueden ser causadas por esporas producidas en el lugar o

que han sobrevivido en él, o por esporas transportadas por el viento desde lugares muy distantes. El viento es quizás el medio más importante de diseminación de las esporas de hongos de ciclo múltiple a grandes o pequeñas distancias. También el agua puede desempeñar un papel importante en el caso de algunos hongos patógenos (por ejemplo, *Septoria*), especialmente en distancias pequeñas. Otros mecanismos de transferencia de inóculo patógeno a las plantas son los insectos y nematodos (particularmente cuando se trata de virus), otros agentes patógenos (los hongos son a veces portadores de bacterias y virus), las actividades del hombre y los animales.

En general sólo sobrevive una porción pequeña del inóculo, que llega a la planta huésped adecuada en el momento oportuno y logra infectarla. Esta tal vez sea la causa fundamental de que la mayoría de los organismos patógenos produzcan una gran cantidad de inóculo. Son numerosos los factores que afectan la supervivencia del inóculo, como la estructura de las esporas, los mecanismos de dispersión y las condiciones ambientales. Por otra parte, las esporas de la roya están bien adaptadas para sobrevivir, ya que pueden recorrer grandes distancias y soportar condiciones adversas conservando una viabilidad considerable.

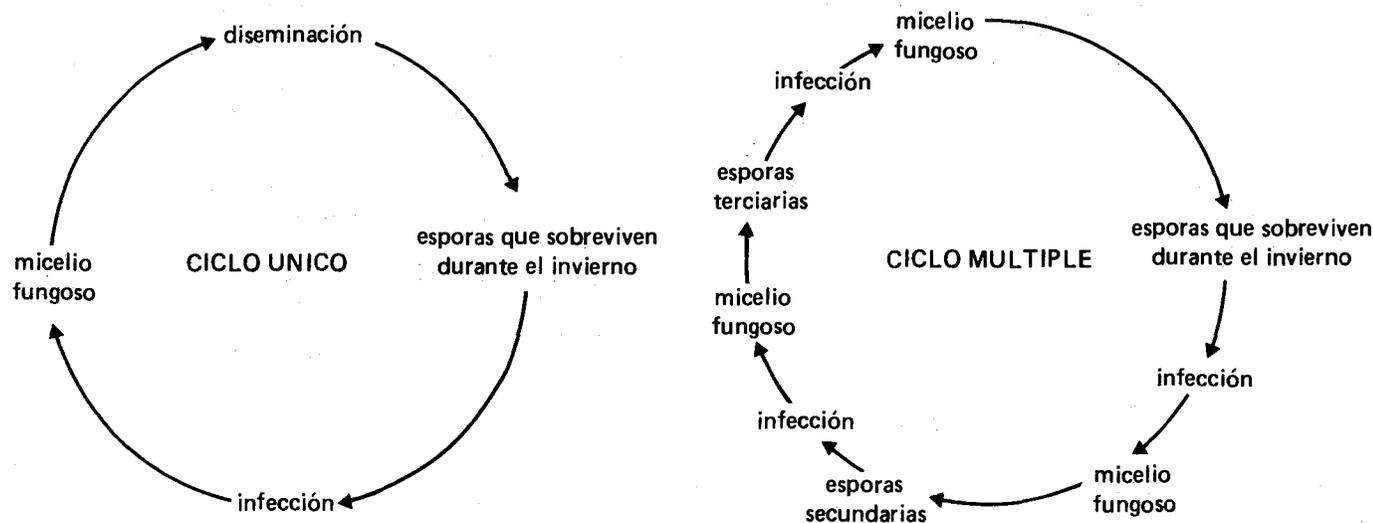


Figura 3.1. Ciclos de las enfermedades causadas por hongos.

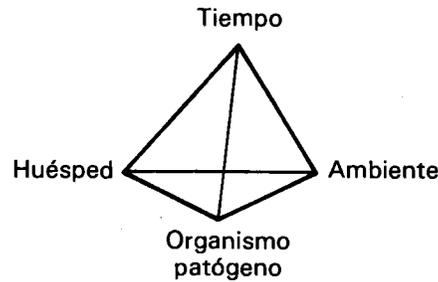
Una vez en contacto con la superficie del huésped y siempre que las condiciones ambientales sean favorables, el inóculo patógeno entra en una fase de crecimiento rápido, apoyado por sus propias reservas de alimento. En esta fase, llamada germinación, se forma un tubo germinal que penetra en la superficie del huésped. Durante este período el organismo patógeno es más vulnerable a las condiciones adversas (por ejemplo, la desecación) y, por consiguiente, depende más del ambiente; una vez producida la penetración, el organismo patógeno vuelve a estar protegido de las condiciones externas.

En la figura 3.2 se muestra la secuencia del establecimiento, desarrollo y propagación de la enfermedad en relación con el crecimiento de la planta.

3.2 Propagación de la enfermedad

Tradicionalmente se han vinculado entre sí los principales factores que influyen en la propagación y desarrollo de la enfermedad y se ha establecido un "triángulo de enfermedad" que ilustra la interacción entre la virulencia del organismo patógeno, la sensibilidad del huésped y las condiciones favorables del medio. No obstante, es preciso tener en cuenta otro factor muy importante, el tiempo (es decir, el período durante el cual están en contacto el huésped y el organismo patógeno, la sincronización y duración de las

condiciones óptimas para la infección, el tiempo que ésta requiere, etc.). Al agregar el factor tiempo a esa representación de las relaciones de interacción, se obtiene, el lugar de un triángulo, una "pirámide de enfermedad":



El grado de enfermedad provocada por un organismo patógeno en un determinado huésped en un ambiente específico y durante un período definido está representado entonces por el volumen de la pirámide que resulta de la interacción de esos factores. El desarrollo de enfermedades cuya transmisión depende de vectores biológicos (por ejemplo, virus) se complica aún más a causa de las interacciones que se derivan de la participación de esos vectores.

La propagación de la enfermedad implica la multiplicación continua de infecciones a distancias progresivamente mayores del foco de infección original, hasta que las infecciones establecidas están tan cercas unas de otras y producen una cantidad tal de inóculo que ninguna

planta sana y sensible en esa zona puede librarse de la enfermedad. La multiplicación de la infección refleja la influencia de todos los factores de la pirámide de enfermedad y de sus elementos.

Factores presentes en el huésped. El tamaño, distribución y diversidad genética de las poblaciones huéspedes tienen gran importancia pues determinan el grado y la tasa de desarrollo de la epifitía. Las grandes extensiones con plantas de características genéticas uniformes constituyen un medio ideal para que la infección alcance proporciones de epifitía. El riesgo de grandes pérdidas en los cultivos de esas zonas (por ejemplo, las de producción de trigo en los Grandes Llanos estadounidenses) sería muy elevado si no fuera por la diversidad genética en la resistencia a la roya de las variedades cultivadas. Es imprescindible que exista un alto grado de diversidad genética en la resistencia para reducir las probabilidades de una aparición súbita de nuevas razas fisiológicas capaces de vencer la resistencia existente y causar pérdidas desastrosas.

Es preciso recurrir a todas las fuentes y tipos conocidos de resistencia en los esfuerzos de mejoramiento para obtener variedades de gran producción y amplia resistencia a diversas enfermedades. Los sistemas de pruebas en localidades múltiples son un método útil para la selección de variedades con este tipo de resistencia.

Factores patógenos. Los elementos fundamentales para la propagación de la enfermedad son la abundancia de inóculo, la virulencia de éste y su capacidad reproductiva. En general se producen epifitias cuando grandes cantidades de inóculo de organismos patógenos de crecimiento vigoroso y reproducción rápida se ponen en contacto con huéspedes muy sensibles. Suponiendo que la viabilidad y la infección sean del 1%, una infección inicial por urediosporas

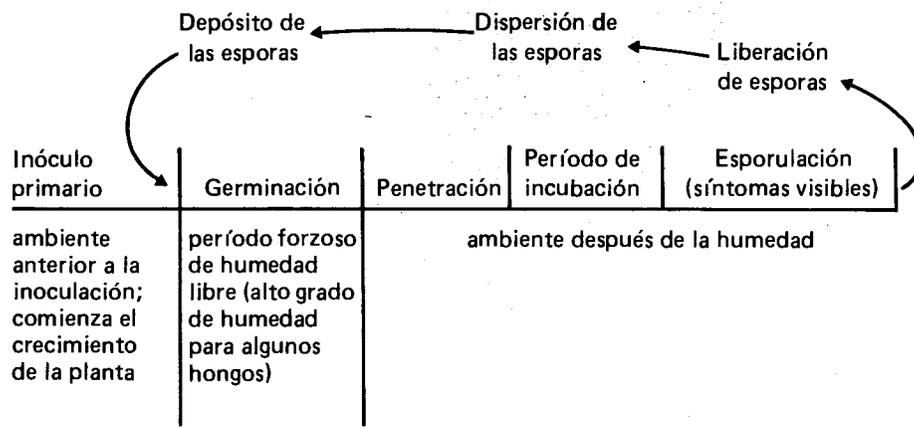
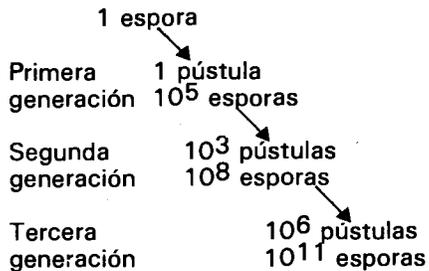


Figura 3.2. Secuencia del desarrollo de una típica enfermedad por hongos.

de roya, después de sólo tres generaciones de 10 días cada una, puede producir un millón de pústulas de roya:



Si bien esta situación nunca se presenta en la naturaleza, el ejemplo sirve para ilustrar el enorme potencial infectante de algunos hongos, especialmente cuando el ritmo de renovación de las generaciones alcanza una rapidez de 10 días. Con esta tasa de reproducción, el índice efectivo de mutación puede ser muy elevado, lo que aumenta el peligro de cultivar zonas extensas con variedades con una escasa base de resistencia.

Factores ambientales. Las condiciones ambientales favorables son un requisito esencial para que se desarrolle una epifitias. En este sentido, tienen una importancia fundamental la humedad y la temperatura. Si bien los organismos patógenos difieren en cuanto a las condiciones ambientales necesarias para que la infección sea óptima, en general los hongos que infectan las hojas y los tallos y en particular las especies de roya requieren una cantidad suficiente de humedad libre en la superficie de las plantas y temperaturas adecuadas para poder germinar e infectar las plantas (cuadro 3.1).

Factores de tiempo. En el caso de las royas de los cereales y, en realidad, de la mayoría de los organismos patógenos foliares, se puede producir la infección en cualquier momento del período de crecimiento siempre que las condiciones ambientales sean favorables. Esto significa que pueden presentarse epifitias de carácter explosivo en cualquier momento de la temporada de crecimiento. Por el contrario, los hongos del carbón cubierto y el carbón volador, entre otros, pueden infectar a sus

huéspedes sólo durante estadios específicos del crecimiento (la germinación de la semilla y el desarrollo de la flor, respectivamente). En consecuencia, las epifitias provocadas por estos hongos se van preparando lentamente durante varias estaciones en lugar de presentarse en forma explosiva.

Alcance de la propagación de la enfermedad. La distancia que puede recorrer el inóculo infectante tiene gran importancia para la expansión de los centros de infección. Como ya se mencionó, las enfermedades causadas por la roya pueden propagarse sobre distancias considerables y, por consiguiente, son particularmente peligrosas ya que es difícil contener los brotes.

Las epifitias comienzan con la propagación local de la enfermedad, alrededor del foco primario de infección, y luego se difunden rápidamente hacia afuera produciendo focos secundarios. (Esto sucede tanto en un campo en particular como en toda una región). El grado y la rapidez de la propagación dependen de la tasa de producción de esporas y la tasa de crecimiento del organismo patógeno, el ambiente, la disponibilidad de huéspedes sensibles y el tiempo, los cuatro factores de la pirámide de enfermedad. En condiciones óptimas, la enfermedad se propaga hasta que se unen los focos primarios y secundarios y la epifitias continúa hasta que ya no queda tejido sensible sin infectar.

Se pueden hacer las generalizaciones siguientes en relación con las epifitias :

- La tasa de multiplicación de la enfermedad aumenta a medida que incrementa el número de focos.
- La cantidad de infección causada por un solo foco de enfermedad disminuye con la mayor distancia del foco.
- Las probabilidades de que una planta determinada resulte infectada disminuyen al aumentar la distancia del foco.

3.3 Una forma sencilla de medir el aumento de la enfermedad

Durante el decenio de 1960, las investigaciones de Van der Plank contribuyeron a convertir la fitopatología en una ciencia más cuantitativa. Mediante sus estudios demostró que muchas epifitias, de las cuales es un ejemplo típico la causada por la roya, aumentan en forma acumulativa como el dinero en un banco, de acuerdo con el interés compuesto. De este modo, se acuñó la frase "enfermedad de interés compuesto" para designar las epifitias provocadas por la multiplicación exponencial de un organismo patógeno en generaciones sucesivas. La "fórmula de interés compuesto" obtenida por Van der Plank proporciona una estimación de la tasa de infección (T) por unidad de tiempo (t) y, por consiguiente, permite medir el aumento de la enfermedad:

$$T = \frac{1}{t_2 - t_1} \left(\ln \frac{x_2}{1-x_2} - \ln \frac{x_1}{1-x_1} \right)$$

donde t_1 y t_2 son las fechas en que se hicieron mediciones de la enfermedad y x_1 y x_2 son las cantidades de enfermedad registradas en esas fechas. La tasa de enfermedad observada (T) es resultado de la interacción de todos los factores que influyen en el desarrollo de la enfermedad. Cuando estos factores se acercan a valores óptimos, aumenta T .

Las epifitias se desarrollan en forma logística. Esto implica que su crecimiento tiene un límite y su aumento es exponencial. No obstante, usando una función logarítmica, $\ln [x / (1-x)]$, llamada el *logit* de x , se puede representar el desarrollo de una epifitias como una línea recta de acuerdo con una ecuación de la forma $y = a + bx$, donde y es el *logit* de la cantidad de infección, a es el grado de infección en la primera observación, b es la pendiente o tasa de infección (T) y x es el número de días posteriores a la primera observación (figura 3.3).

Cuadro 3.1. Influencia de factores ambientales sobre la germinación de urediosporas y el proceso de infección por la roya del trigo.

Hongo	Proceso	Humedad	Temperatura (°C)	Luz
<i>Puccinia graminis</i>	1. Iniciación de la germinación	Se requiere agua libre durante 2 horas o más	Mínima: > 5 Optima: 15-24 Máxima: 30	La luz intensa puede inhibir las esporas almacenadas; el efecto es menor sobre las esporas frescas
	2. Crecimiento del tubo germinal	Se requiere agua libre	Optima: aprox. 15-20	Como en el caso anterior
	3. Formación del apresorio	Se requiere agua libre	Optima: aprox. 20	Es favorable la oscuridad
	4. Penetración	No es necesaria	Optima: aprox. 30	Es favorable la luz brillante
	5. Desarrollo del urediomicelio	El huésped necesita humedad adecuada	Optima: aprox. 20	La luz adecuada favorece al huésped y al hongo
<i>Puccinia recondita</i>	1. Iniciación de la germinación	Se requiere agua libre durante 2 horas o más	Optima: 8-28 Máxima: 32	La luz intensa puede retardar el proceso
	2. Crecimiento del tubo germinal	Se requiere agua libre	Optima: aprox. 15-20	Como en el caso anterior
	3. Formación del apresorio	Se requiere agua libre	Optima: aprox. 18-25	La oscuridad es favorable
	4. Penetración	No es necesaria	Optima: aprox. 20	No produce ningún efecto
	5. Desarrollo del urediomicelio	El huésped necesita humedad adecuada	Optima: aprox. 20	La luz adecuada favorece al huésped y al hongo
<i>Puccinia striiformis</i>	1. Iniciación de la germinación	Se requiere agua libre durante 2 horas o más	Mínima: 0 Optima: 7-15 Máxima: 23-26	Variable; puede ser favorable a >15°C
	2. Crecimiento del tubo germinal	Se requiere agua libre	Optima: 10-15	Como en el caso anterior
	3. No se forma el apresorio	--	--	--
	4. Penetración	No es necesaria	Optima: 8-13	No produce ningún efecto
	5. Desarrollo del urediomicelio	El huésped necesita una humedad adecuada	Optima: 12-15	No produce ningún efecto

Fuentes: Chester (1946), Hassebrauk y Schroeder (1964), Hogg *et al.* (1969), Rowell (1984), Sharp (1964), Staples y Macke (1984) y Togashi (1949).

3.4 Desarrollo de epifitias de roya en el campo

El inóculo primario de la roya que produce la infección inicial es transportado hasta la población huésped por el viento o el agua. Si las urediosporas continúan siendo viables, germinarán cuando las condiciones ambientales sean favorables. Sólo aquellas razas que tienen los factores de virulencia que permiten al hongo de la roya establecer una adecuada relación parasitaria con el huésped pueden infectar los tejidos de éste. Las condiciones ambientales posteriores a la infección y la interacción entre la estructura genética del hongo y el huésped determinan el tiempo que

transcurre hasta la producción de nuevas urediosporas (período de latencia). La temperatura es particularmente importante en este momento; en la figura 3.4 se muestra su relación con el período de latencia en el caso de infecciones primarias provocadas por las royas lineal, de la hoja y del tallo.

Como en la naturaleza no se dan constantemente temperaturas óptimas, la producción de nuevas pústulas causadas por las infecciones iniciales suele requerir de 10 a 14 días. Si a partir de entonces las esporas producidas por estas pústulas provocan una reinfección diaria, las pústulas secundarias

aparecerán alrededor de 24 a 28 días después de la infección inicial. Del vigésimo cuarto día en adelante se desarrollarán nuevas uredias cada día.

Después de la aparición de las primeras pústulas sobre las hojas o tallos del huésped, pueden producirse infecciones secundarias en la misma planta o en las vecinas cada vez que sean favorables las condiciones ambientales. Cuando estas condiciones perduran, las pústulas continúan produciendo esporas durante un período de dos a tres semanas.

El número de esporas que produce cada uredia en las condiciones que existen sobre el terreno varía según la especie de roya y la temperatura ambiente. Los datos presentados a continuación indican la escala aproximada de producción de esporas de una sola pústula de roya del tallo durante un período de 11 días, y su relación con la temperatura:

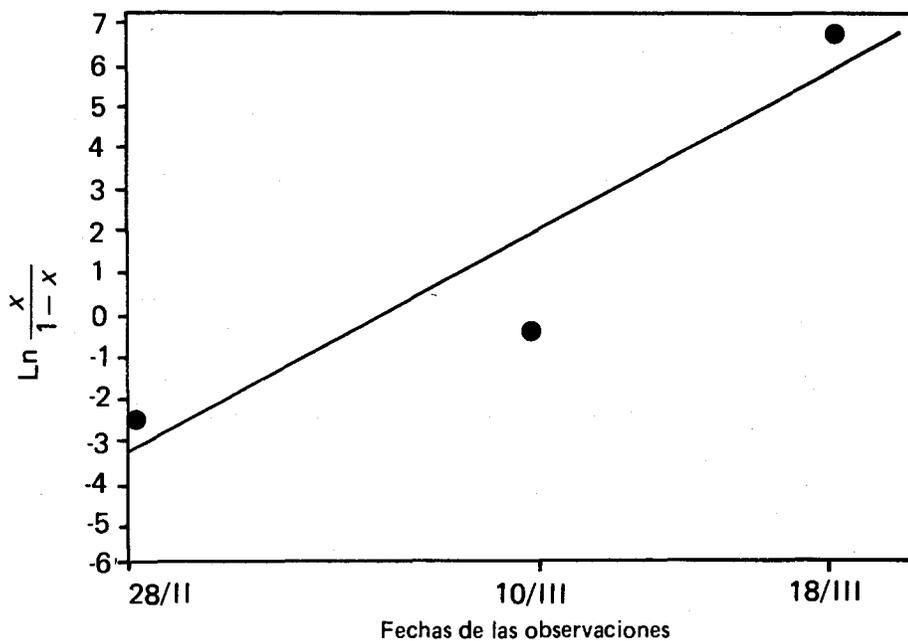
Temperatura (°C)	Número de urediosporas (miles)
13	40
18	83
24	206
29	218

Tomado de Prabhu y Wallin, 1971.

En el cuadro 3.1 (p. 15) se hace una breve síntesis de las relaciones simples entre las condiciones ambientales y el establecimiento de las enfermedades provocadas por los tipos más importantes de roya.

3.5 Transporte de los organismos patógenos a grandes distancias

Es evidente la importancia del transporte a grandes distancias en relación con el establecimiento de infecciones en zonas donde el organismo patógeno no puede sobrevivir de una estación a la siguiente. La distancia que puede recorrer el inóculo varía mucho de un organismo a otro. En la mayoría de los casos tiene una movilidad limitada, pero las esporas de ciertas



Fecha:	28/II	10/III	18/III
Estadio del crecimiento:	Espigamiento	Floración completa	Granos semiformados
Porcentaje de roya en las hojas bandera (escala de Cobb):	7.3	35	100
$\ln[x/(1-x)]$:	-2.54	-0.62	+6.9

Aplicando la ecuación $T = 1/18/6.9 + 2.54$, la tasa de infección es de 0.52 unidades por día.

Figura 3.3. Datos y representación del logit de la tasa de infección aparente de una epifitias de roya de la hoja en Sonora, México, 1976-77.

especies pueden viajar a distancias considerables gracias a la intervención de vectores específicos. El hombre y el viento desempeñan papeles particularmente importantes en el transporte a grandes distancias.

El transporte por el hombre. Muchos organismos patógenos, en particular los carbonos voladores, son diseminados en las semillas del huésped o sobre ellas, junto con desechos vegetales o del suelo contaminados. El gran volumen de material vegetal que actualmente se transporta en todo el mundo representa entonces un grave peligro puesto que puede acarrear inóculo patógeno a grandes distancias. De hecho, se pueden mencionar numerosos ejemplos de graves pérdidas de cultivos causadas por la introducción de enfermedades en zonas donde hasta entonces no se conocían.

Con el propósito de reducir el riesgo de introducir enfermedades con la importación de material vegetal, en la mayoría de los países se han elaborado disposiciones detalladas y a veces complejas respecto a la introducción de ese material y a las cuarentenas. A menudo dichas

disposiciones se aplican con excesiva rigurosidad al intercambio de material científico, mientras que existen pocas restricciones para los canales comerciales a través de los cuales circula el grueso del material vegetal importado. De este modo, pueden existir serias dificultades para el libre intercambio de germoplasma de cereales y, por consiguiente, para la difusión rápida de variedades mejoradas de cultivos, mientras que al mismo tiempo se favorece la propagación de enfermedades.

Los reglamentos de cuarentena de muchos países mejorarían con una aplicación más racional, basada en un estudio realista de los peligros y beneficios de facilitar el intercambio de germoplasma de una serie de cultivos importantes.

Transporte por el viento. El viento es sin duda alguna el factor más importante en el traslado a grandes distancias del inóculo de muchas enfermedades foliares; con frecuencia anula el efecto de las disposiciones sobre cuarentena para combatir esas enfermedades. En estudios de las royas de los cereales se han documentado muy bien las consecuencias del transporte por el viento.

Los límites de la diseminación están determinados fundamentalmente por las características meteorológicas y la resistencia de las urediosporas a condiciones ambientales adversas. Por lo general, el traslado se efectúa en etapas, pero se han observado recorridos sin interrupción de más de 1,000 kilómetros en el caso de esporas de *Puccinia graminis* f. sp. *tritici*. Pueden realizarse viajes largos en un período muy breve cuando las condiciones son favorables. Además, los traslados suelen efectuarse con regularidad, en determinadas estaciones o gradualmente a lo largo de varios años. En una serie de informes bien documentados sobre migraciones y rutas de migración en todo el mundo se indican los diversos patrones de desplazamiento.

Migración anual. La ruta de migración anual de la roya más conocida y mejor documentada se extiende desde la región central meridional de Estados Unidos hasta el norte de ese país y el sur de Canadá. Se le conoce comúnmente como el "Camino de la Puccinia" y abarca más de 3,000 kilómetros.

La migración por lo general implica una serie de etapas, pero cuando hay infecciones graves en el sur y el viento es fuerte durante dos o tres días, puede disminuir el número de etapas y aumentar de manera considerable el área y la distancia cubiertas. El desplazamiento se orienta fundamentalmente hacia el norte, siguiendo el desarrollo del cultivo del trigo. No obstante, cuando está madurando el trigo en las zonas más septentrionales de Canadá, el inóculo se traslada otra vez hacia el sur e infecta los cultivos de siembra temprana en los Grandes Llanos.

Existen otras rutas bien documentadas de migración de la roya de los cereales en Europa, Australia y el subcontinente de la India. En Europa, *P. graminis* avanza con regularidad hacia el norte cada primavera, después de haber sobrevivido al invierno en África del Norte y la región europea del Mediterráneo. En Australia se puede observar un traslado similar a gran distancia y hay pruebas de que esta

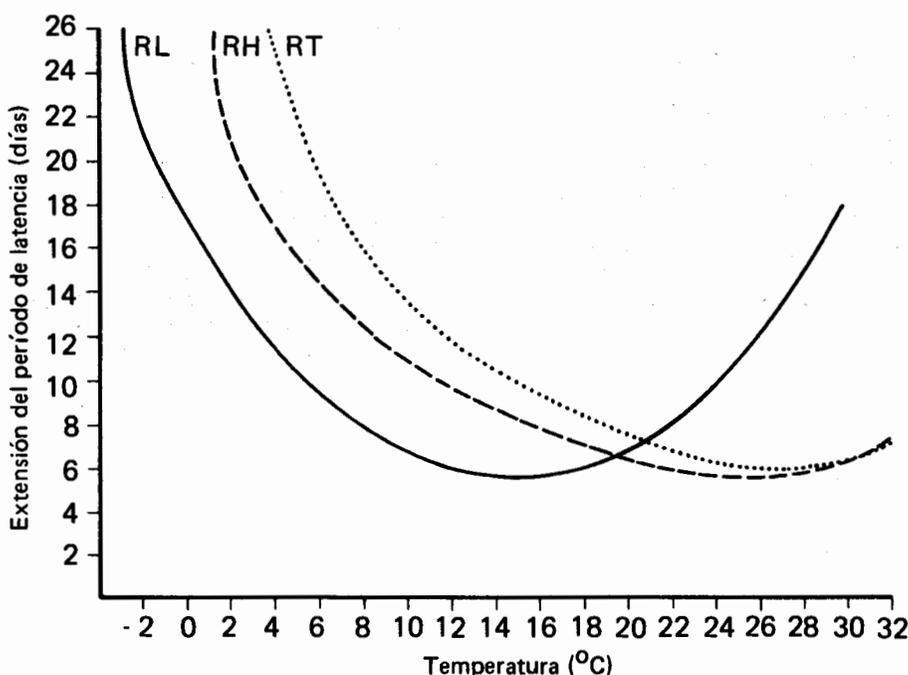


Figura 3.4. Período de latencia de infecciones primarias por la roya lineal (RL), la roya de la hoja (RH) y la roya del tallo (RT).

roya se propagó de dicho país hasta Nueva Zelanda, a través de 2,500 kilómetros de océano. La roya lineal, recién introducida en Australia, tardó menos de dos años en llegar a Nueva Zelanda. En el caso de la India, la roya del tallo se produce todo el año en los montes del sur, donde las condiciones permiten la producción continua de trigo y cebada. Por tanto, estas zonas constituyen el reservorio de inóculo para la infección regular de cultivos recién sembrados en los llanos. La aparición de infecciones se relaciona estrechamente con la época en que las temperaturas mínimas mensuales medias llegan a los 14 °C, que es la temperatura mínima requerida para que se establezca la infección por la roya del tallo.

La situación en Egipto, aunque menos conocida que en el caso de las otras rutas migratorias importantes, es interesante porque comúnmente el trigo es atacado por las tres royas principales. Cada año las royas desaparecen después de la cosecha de trigo (entre mayo y junio) y se produce la reinfección después de la siembra en noviembre. Esta reinfección debe ser exodémica, ya que las royas no pueden sobrevivir al caluroso verano egipcio en ausencia de su huésped. Sin embargo, para llegar al Valle del Nilo las esporas deben hacer un largo recorrido, ya sea sobre vastas zonas desérticas o a través del Mediterráneo. Ese traslado regular implica que las esporas tienen una resistencia a las condiciones ambientales bastante mayor que la que generalmente se supone.

En general, parece que la roya del tallo normalmente se desplaza sobre grandes distancias, mientras que la roya de la hoja y la roya lineal tienden a recorrer sólo distancias cortas. No obstante, como sucede en Egipto, estos dos últimos tipos de roya pueden, en ciertas condiciones, trasladarse a distancias considerables.

Introducción gradual. Además de las migraciones estacionales regulares que se han señalado, razas nuevas del organismo patógeno pueden propagarse con rapidez a lugares alejados. Por ejemplo, una nueva raza virulenta de roya lineal, capaz de atacar variedades de trigo hasta ahora resistentes (como la variedad Mexipak), parece haber emigrado por etapas desde Turquía y Bulgaria a la India en un período de tres años. Del mismo modo, una virulenta raza nueva de la roya lineal de la cebada, observada por primera vez en Colombia en 1975, ya se había propagado a Ecuador en 1976, al sur de Perú en 1977, a Bolivia en 1978 y a Chile a fines de 1980. La distancia de Colombia a Chile es de unos 4,500 km. Una propagación tan rápida de cepas virulentas obstaculiza el empleo amplio de variedades de cultivo genéticamente similares.

Mecanismo del transporte por el viento. El traslado de esporas patógenas a larga distancia que realiza el viento implica tres fases bien definidas: elevación, traslado y depósito. En primer término, las esporas deben ser levantadas de su lugar de origen y trasladadas a alturas superiores a los 1,000 metros. Para este proceso son esenciales las corrientes térmicas

ascendentes y una velocidad razonable del viento. Una vez lograda la altura conveniente, las esporas son arrastradas por las diversas masas de aire en movimiento que componen la atmósfera. Por ejemplo, el sistema de baja presión que generalmente se forma sobre Turquía y se desplaza hacia el este para finalmente dispersarse en Asia Central y el norte de la India parece ser la causa primaria de la propagación de la nueva raza de roya lineal mencionada anteriormente. Por último, cuando se dispersan las masas de aire o se producen corrientes descendentes periódicas o lluvias, las esporas vuelven a ser depositadas sobre el suelo. El traslado de las esporas depende entonces de una serie de factores meteorológicos y quizá se relacione estrechamente con patrones de desplazamiento del aire. Esto de inmediato sugiere el empleo de las fotografías meteorológicas vía satélite como método de rastreo de la propagación de organismos patógenos a grandes distancias.

Las muestras de agua de lluvia han demostrado que las precipitaciones constituyen un medio importante para el depósito de las esporas. Como la lluvia también proporciona la humedad libre esencial para el proceso de infección, se le considera un elemento indispensable en el establecimiento de infecciones exodémicas.

En muchas zonas se producen infecciones tanto exodémicas como endémicas; esto tiende a complicar y confundir el registro del desplazamiento de las esporas. En consecuencia, al rastrear la propagación de las enfermedades, es preciso distinguir con claridad la naturaleza de cada infección.

4. Encuestas sobre enfermedades de las plantas

Las encuestas sobre enfermedades son fundamentales para la eficacia de todo programa de control e investigación. Constituyen un elemento esencial para el desarrollo de esos programas ya que determinan la orientación y los aspectos que se deben subrayar. También son importantes para las investigaciones que están en marcha, como medio de evaluación de la eficacia de las medidas de control.

4.1. Técnicas básicas de la encuesta

Organización. Se pueden hacer encuestas con propósitos de vigilancia. En este tipo de encuestas por lo general se pretende delimitar las infestaciones ya conocidas y vigilar la propagación de otras nuevas (a menudo con el fin de establecer cuarentenas). Las encuestas que no tienen propósitos de vigilancia se orientan fundamentalmente hacia la evaluación de los grados reales de enfermedad (con frecuencia para planear programas de control). Al organizar una encuesta, es esencial identificar primero su propósito. Sobre esta base se pueden establecer entonces objetivos definidos y, una vez hecho esto, proyectar la encuesta de acuerdo con las características conocidas del organismo patógeno (su ritmo de reproducción, virulencia, forma de dispersión, etc.), el huésped (su estado de madurez, mecanismos de defensa, estado nutricional, etc.) y el ambiente (tanto físico como químico).

Existen dos sistemas básicos para efectuar encuestas: el empleo de unidades móviles (observadores que viajan por un gran número de sitios) o unidades estacionarias (por ejemplo, viveros trampa que pueden tener una amplia distribución geográfica). Cada sistema tiene ventajas y desventajas y es preciso seleccionar aquel cuyas desventajas sean menores para un determinado conjunto de objetivos. Comúnmente se logra esto adoptando una combinación de ambos.

Se debe destacar que, en general, cuanto más amplios sean los objetivos de la encuesta, más difícil será realizarla y los datos reunidos serán menos fiables. Esto subraya la necesidad de que los objetivos sean muy claros y definidos.

Muestreo. Cualquiera que sea el sistema de muestreo que se adopte, es físicamente imposible, excepto en unos pocos casos específicos, inspeccionar cada unidad por separado (parte de la planta, planta, campo, zona, país, etc.) en una población determinada. Es entonces necesario recurrir a sistemas que permitan estimar los verdaderos grados de enfermedad con la mayor precisión y el menor número de observaciones posibles. Un sistema con esas características es el muestreo, que implica tomar muestras de una población y usarlas para efectuar estimaciones. Los tipos de procedimientos de muestreo normalmente usados son cuatro:

- muestreo aleatorio (por ejemplo, inspeccionar los campos cada diez kilómetros según señale el odómetro del vehículo),
- muestreo de zona (por ejemplo, examinar todos los campos en zonas seleccionadas),
- muestreo estratificado (por ejemplo, efectuar el muestreo de diez campos de trigo por cada campo de cebada si el área de cultivo de trigo es diez veces más grande que la de cebada) y
- muestreo intencional (por ejemplo, inspeccionar sólo los campos donde se produce semilla certificada).

Si bien se suelen emplear los otros métodos en casos específicos, el muestreo aleatorio es el procedimiento más usado. Esto obedece fundamentalmente a que las enfermedades de las plantas rara vez se distribuyen de manera uniforme en una unidad de cultivo (campo, zona, región o país) y, por consiguiente, toda estructuración del muestreo tendería a producir estimaciones inexactas.

No obstante, el muestreo aleatorio debe efectuarse en forma inteligente, de tal modo que se eviten las áreas evidentemente atípicas y aquellas

donde se ha comprobado que el desarrollo de la enfermedad es desproporcionado. Por ejemplo, no se deben tomar muestras de las orillas de las áreas cultivadas ya que en ellas suele existir una asimetría considerable, comúnmente conocida como "efectos limítrofes". Una vez definidas las áreas evidentemente atípicas, se puede efectuar el muestreo aleatorio basado en el empleo de tablas de números aleatorios u otros métodos de aleatorización.

En ciertos casos, especialmente cuando el propósito principal es descubrir una enfermedad más que medir sus grados, es conveniente emplear un muestreo no aleatorio. Esto sucede en particular cuando se trata de detectar razas patógenas nuevas en un terreno sembrado con variedades resistentes o en un vivero al que se han incorporado esas variedades.

Al hacer estimaciones sobre la presencia de la enfermedad y/o su gravedad, usualmente se emplean instrumentos auxiliares como los cuadrantes, o procedimientos como el recuento por hilera y por metro. Los cuadrantes son estructuras cuadradas, rectangulares, en forma de U o circulares, generalmente de alambre, que abarcan una superficie conocida. Se colocan sobre las plantas cultivadas en sitios seleccionados al azar y se examinan todas las plantas que quedan dentro del cuadrante. De este modo, es posible medir la frecuencia de la enfermedad por unidad de superficie. El recuento por hilera y por metro implica el muestreo de extensiones medidas de las hileras del cultivo, efectuado también en sitios escogidos al azar dentro de una parcela. Conociendo el número de hileras y la longitud de éstas en una superficie determinada, será posible estimar la frecuencia de la enfermedad por unidad de superficie con este procedimiento.

El muestreo de plantas individuales en una zona seleccionada por lo general implica la recolección de hojas. La recolección puede ser completa (todas las hojas) o parcial (por ejemplo, sólo la hoja bandera y la primera que se encuentra debajo de ella).

En el muestreo para evaluar una enfermedad se combinan entonces varias categorías de muestreo: sitios de muestreo dentro de una zona, parcelas de muestreo en los sitios y plantas de muestreo en las parcelas. Si bien esto no sucede en todas las situaciones, sirve para ilustrar la complejidad de efectuar estimaciones en gran escala.

Las características geográficas y las variedades existentes en la zona donde se efectuará el muestreo influyen mucho sobre el número de muestras que es necesario considerar para obtener una estimación precisa de la verdadera situación con respecto a la enfermedad. Por ejemplo, suele existir escasa variación en los cultivos producidos en zonas de características geográficas uniformes o donde sólo existen unas pocas variedades diferentes. Así pues, en esas zonas se requerirán menos muestras para la evaluación que en otras con características geográficas variadas o un gran número de variedades de cultivo. El momento y la frecuencia de las encuestas son también factores importantes que determinan la intensidad del muestreo y la exactitud de las estimaciones. Los registros únicos pueden bastar si se efectúan en el momento de máxima manifestación de la enfermedad, pero, como esto es difícil de juzgar, quizás se obtengan estimaciones más precisas con una serie de observaciones durante cierto período.

En general, el costo del muestreo aumentará cuanto mayor sean la exactitud y fiabilidad requeridas en relación con los datos. La muestra más económica será así la más pequeña que pueda proporcionar la exactitud y fiabilidad deseadas.

4.2 Principios generales de la evaluación de enfermedades

La interacción entre la planta huésped, el organismo patógeno y el ambiente se expresa en forma visible en síntomas característicos y en la gravedad y prevalencia de esos síntomas. Los síntomas de enfermedad (llamados tipos de infección) fluctúan entre la ausencia (huésped inmune) y la manifestación máxima de la reproducción del organismo patógeno (huésped muy

sensible). Sumados a la gravedad de la enfermedad (la cantidad de infecciones en una determinada planta o parte de ella) y la prevalencia (el número de plantas o partes de plantas enfermas en una determinada zona), los síntomas de enfermedad pueden servir para cuantificar la intensidad de las interacciones entre la enfermedad y las plantas. A menudo la prevalencia es el principal criterio usado para el pronóstico de epifitias y tiene particular importancia para la aplicación correcta y económica de medidas de control con sustancias químicas. Sin embargo, normalmente se miden los grados totales de enfermedad mediante una combinación de las tres características de la manifestación de la enfermedad.

Se ha elaborado una serie de escalas para describir los tipos de infección y cuantificar la gravedad y la prevalencia de la enfermedad. Si bien son fundamentalmente descriptivas y se basan en observaciones subjetivas, en la mayoría de los casos han sido transformadas en escalas codificadas para facilitar su empleo y ahorrar tiempo.

Los tipos de infección en el caso de las enfermedades causadas por la roya normalmente se codifican con números romanos (i, O, I, II, III y IV) o arábigos (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9). Estas escalas, llamadas básicas, pueden ampliarse para evaluaciones más detalladas. Por ejemplo, el valor 0 puede ampliarse y convertirse en 00, 0- y 0+.

La gravedad y la prevalencia normalmente se registran como porcentajes (0 a 100). Se establece una distinción entre el porcentaje observado y el porcentaje real de superficie de la hoja afectada por la enfermedad (por ejemplo, una apreciación visual del 20% puede representar una infección real del 7.4%). Esa diferencia depende de las subdivisiones de la escala particular de porcentajes y de los grados de infección a que se refiera. Las escalas de porcentaje se pueden transformar en escalas lineales codificadas para facilitar el registro. Un ejemplo de esto es la escala

internacional para la roya lineal en la que los números de la escala 1-10 se refieren a 0,001, 0.01, 0.1, 1 (traza), 5, 10, 20, 40, 60 y 100%, respectivamente. A menudo se la llama escala del 1 al 10.

Cuando se examina cualquier material vegetal para detectar enfermedades, es esencial que se registre el estadio de desarrollo de la planta al que corresponden las mediciones (usando escalas como las que se muestran en la figura 1.4, página 6). Esto permitirá establecer comparaciones válidas con otras variedades y entre sitios y años diferentes.

4.3 Registro de enfermedades causadas por la roya de la cebada y el trigo

Comúnmente se mide la intensidad de las enfermedades que causa la roya en las plantas de cebada y trigo según el tipo y gravedad de las infecciones. Se han elaborado numerosas escalas muy específicas como instrumentos para estimar los grados de enfermedad provocados por la roya. A continuación se comentan las de utilidad más general.

Estudios en invernadero.

Habitualmente la evaluación de la roya en invernaderos se efectúa durante el estadio de aparición de uredias. Stalkman y Levine describieron por primera vez los tipos de infección usados en la identificación de la resistencia y la sensibilidad a *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* de las plántulas de trigo. Esos tipos han sido adaptados convenientemente como base para la estimación de otras royas de los cereales. En el cuadro 2.4 (página 10) se presentan los tipos de infección aplicables a la roya del tallo en el trigo.

Se considera que las variedades son resistentes cuando la roya no puede crecer y esporular ampliamente. Como se indica en los tipos 1 y 2 del cuadro, las pústulas son pequeñas y pueden estar rodeadas por tejido descolorido o muerto del huésped. El área verdaderamente muerta siempre es pequeña y el daño para la planta es leve.

Por el contrario, las variedades sensibles (que sufren infecciones de los tipos 3 y 4) permiten un amplio crecimiento y esporulación de los hongos. Rara vez se producen áreas necróticas (de tejido muerto), que de hecho tienden a limitar el crecimiento del hongo al aislar la fuente de nutrientes. En general, la presencia de manchas necróticas es característica de algún grado de resistencia (comúnmente llamado hipersensibilidad).

Registro en el campo. Los estudios de plántulas en las condiciones del invernadero son relativamente sencillos, ya que se puede controlar el ambiente para favorecer la máxima manifestación de la enfermedad y el área foliar varía poco de un ejemplar a otro. Sin embargo, la medición de las royas en el campo se complica a causa de las variaciones ambientales (que influyen sobre la manifestación de la enfermedad) y por las variaciones en cuanto al área foliar en los distintos ejemplares. Las escalas diagramáticas son entonces instrumentos esenciales para estimar la intensidad de la roya en un campo.

Las escalas de uso más difundido se derivan del concepto original de N. A. Cobb, expresado en 1892. Cobb publicó una escala que representaba cinco grados de intensidad de la roya: 0, 1, 5, 10 y 50% del área foliar ocupada por las pústulas. En 1917, el Departamento de Agricultura estadounidense adoptó una modificación de la escala original, que ahora se usa ampliamente como base para estimar la intensidad de la roya de los cereales en todo el mundo. Esta escala clasifica las plantas afectadas en seis categorías y considera que un 37% real del área foliar cubierta por pústulas representa una infección del 100%. Esta relación se basa en que el desarrollo del micelio siempre es más extenso que el de las pústulas y con esa cantidad de esporulación, el desarrollo y poder destructor del micelio subyacente llegan casi al grado máximo. Los restantes tipos

de porcentaje se relacionan también de esta manera y se ha agregado un nuevo diagrama (que representa el 65% de infección).

Si bien esta escala ha resultado de un valor incalculable para quienes hacen investigaciones sobre la roya, tiene varias deficiencias. Para superarlas, Peterson *et al.* propusieron otras modificaciones (1948). Con el fin de tener en cuenta los distintos tamaños de las pústulas y su distribución, esta nueva escala proporciona cuatro series de diagramas (cada una con doce diagramas) que cubren una amplia gama de combinaciones de tamaños y distribución de las pústulas (figura 4.1). Con una escala de este tipo se puede lograr una objetividad y exactitud considerablemente mayores.

El Departamento de Agricultura estadounidense ha elaborado guías detalladas para ser usadas en sus viveros internacionales donde se estudia la roya, que permiten registrar la intensidad de las royas de la corona, del tallo y de la hoja en los cereales, sobre la base de la gravedad (porcentaje infectado de la planta) y la respuesta (tipo de reacción ante la enfermedad). Se utiliza el sistema siguiente:

- Se registra la gravedad como un porcentaje, según la escala de Cobb modificada. Como está basada en la observación, no se pueden obtener resultados absolutamente exactos. En consecuencia, frecuentemente se usan los siguientes intervalos: traza, 5, 10, 20, 40, 60 y 100% de infección.

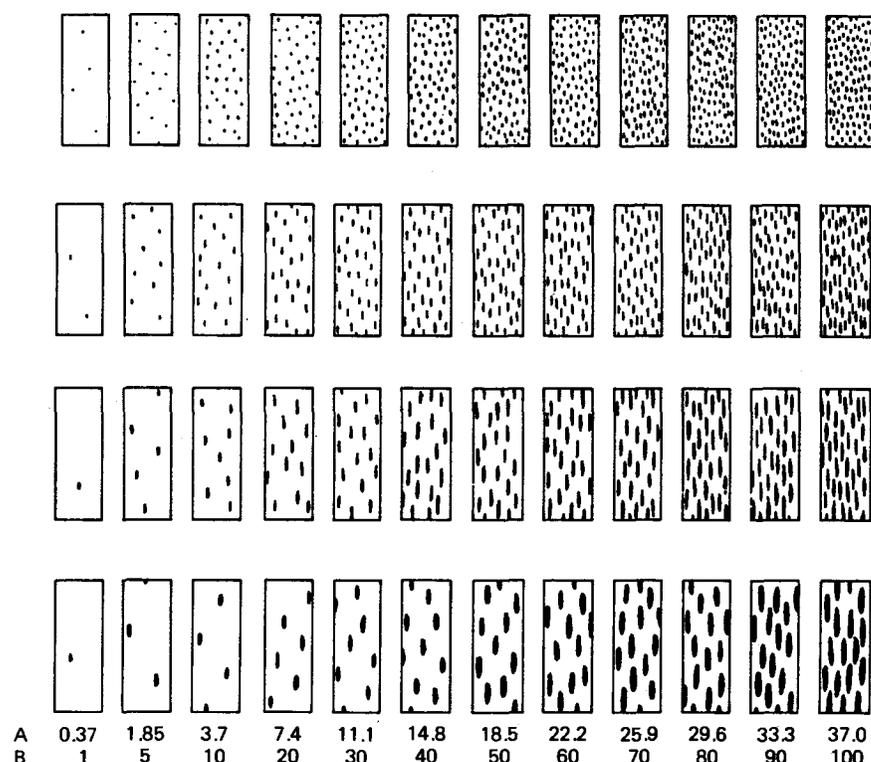


Figura 4.1. Diagramas que muestran los grados de gravedad de la roya cuando las uredias tienen distintos tamaños; A es el porcentaje real de superficie cubierto por lesiones y B es el porcentaje visualmente observable (tomado de Peterson *et al.*, 1948).

- La respuesta se refiere al tipo de infección y se clasifica de acuerdo con la escala siguiente:

0—No hay infección visible.

R—Resistente; áreas necróticas con o sin pústulas pequeñas.

MR—Moderadamente resistente; pústulas pequeñas rodeadas por áreas necróticas.

M—Intermedia; pústulas de tamaño variable; algo de necrosis y/o clorosis.

MS—Moderadamente sensible; pústulas de tamaño mediano; no hay necrosis, pero es posible que exista algo de clorosis.

S—Sensible; pústulas grandes, sin necrosis ni clorosis. Por lo general se combinan los registros de la gravedad y la respuesta, por ejemplo:

1R = gravedad de traza de una infección de tipo resistente

5MR = gravedad del 5% de un tipo moderadamente resistente

60S = gravedad del 60% de un tipo sensible

Al parecer en ocasiones puede existir una evidente variación en la reacción a la enfermedad de las plantas que constituyen una hilera. Esa variación puede adoptar diversas formas:

- Una separación bien definida de las plantas en clases (5R, 40S),
- Una gama de reacciones sin separación definida (15R-5S) o
- Una gama de reacciones en cada planta (planta 1:10R-S; planta 2:20MR).

Las dos primeras reacciones tal vez sean resultado de la segregación o de una mezcla de semillas, mientras que la tercera probablemente sea consecuencia de una mezcla de razas o de una reacción "M" de la variedad.

Un manual preparado por James (1971) proporciona otro método práctico para evaluar la enfermedad. Todas las claves de este manual, que cubre una amplia gama de enfermedades de las plantas, se basan en escalas de porcentajes. Sólo se establecen unos pocos grados de infección (que representan el área cubierta real) y es preciso hacer interpolaciones entre ellos al tomar el registro (figuras 4.2 y 4.3).

4.4 Coeficiente medio de infección (CMI)

El CIMMYT ha encontrado que el CMI es un método útil para clasificar las variedades o establecer categorías entre ellas. Este método de análisis fue elaborado para los Viveros Internacionales de Investigaciones sobre la Roya, distribuidos por el Departamento de Agricultura estadounidense. En síntesis, se registran en la forma tradicional los puntajes obtenidos sobre el terreno para los tres tipos de roya, computando la gravedad según la escala de Cobb modificada y junto con la respuesta sobre el terreno. Esos puntajes se convierten luego en un coeficiente de infección multiplicando la gravedad por un valor constante asignado a la respuesta sobre el terreno. A continuación se indican las

respuestas sobre el terreno y los valores constantes que se les han asignado:

Respuesta sobre el terreno	Símbolo	Valor constante
Resistente	R	0.2
Moderadamente resistente	MR	0.4
Intermedia	M	0.6
Moderadamente sensible	MS	0.8
Sensible	S	1.0

Aplicando esto a los puntajes observados en una variedad en cuatro sitios diferentes, se obtienen los cálculos que se muestran en el cuadro 4.1.

4.5 Registro de otras enfermedades de los cereales

Se han elaborado otras escalas gráficas o diagramáticas para estimar enfermedades de las hojas y espigas de cereales.

Una escala particularmente útil es la escala foliar establecida por Saari y Prescott (1975) para registrar infecciones por la cenicilla polvorienta (*Erysiphe graminis*), manchas causadas por *Helminthosporium* y *Alternaria* y el tizón foliar provocado por *Septoria*. La escala básica, ilustrada en la figura 4.4, y su guía (página 24) se aplican a toda la planta y se basan en el valor de 5, definido como el punto medio de la planta.

Cuadro 4.1. Cálculo de los coeficientes de infección.

Sitio	Respuesta	Gravedad x valor constante	Coeficiente de infección
1	R*	1 x 0.2	0.2
2	5MR	5 x 0.4	2.0
3	10MS	10 x 0.8	8.0
4	20S	20 x 1.0	20.0

Promedio (CMI) = (0.2 + 2.0 + 8.0 + 20.0) / 4 = 7.6

* En caso de que exista una infección de traza (R), por conveniencia se asigna una gravedad del 1^o/o.

MANCHAS FOLIARES CAUSADAS POR *HELMINTHOSPORIUM*



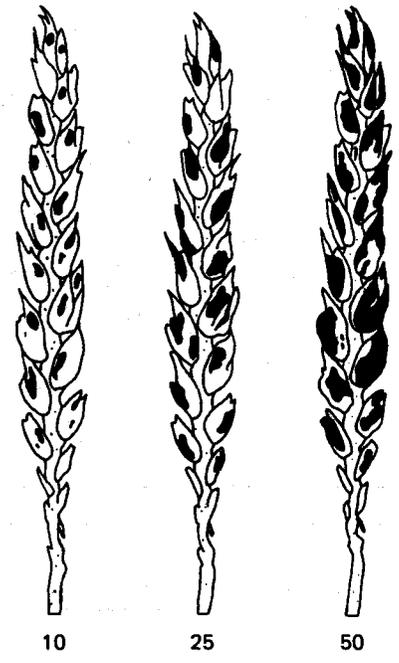
PORCENTAJE DEL AREA FOLIAR

TIZON FOLIAR CAUSADO POR *SEPTORIA* (Síntomas foliares)



PORCENTAJE DEL AREA FOLIAR

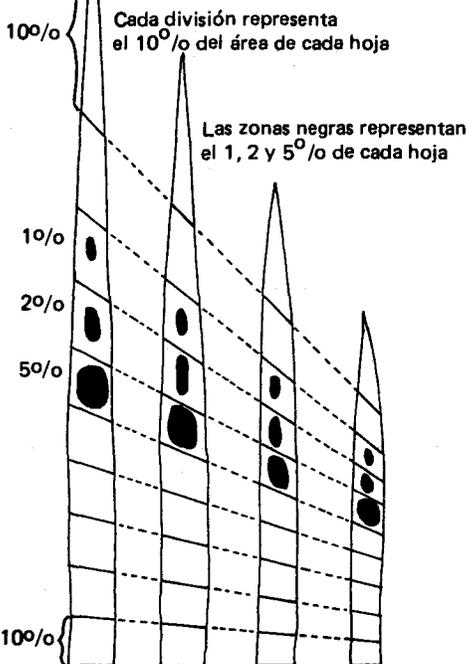
TIZON DE LA GLUMA DEL TRIGO CAUSADO POR *SEPTORIA*



PORCENTAJE DE LA ESPIGA

Figura 4.2. Escalas diagramáticas para evaluar la intensidad de diversas enfermedades de los cereales (tomado de James, 1971).

TIZON FOLIAR CAUSADO POR *RHYNCHOSPORIUM* O ESCALDADURA DE LA CEBADA

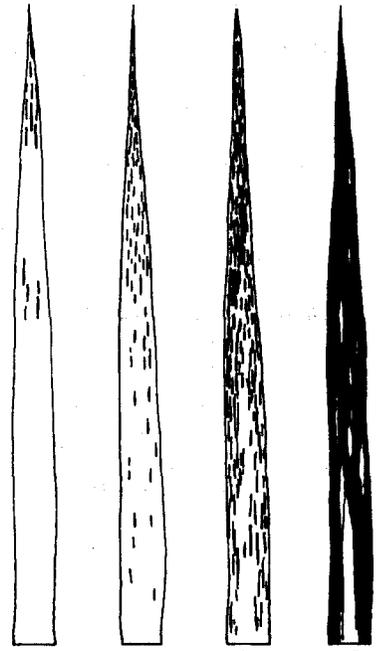


PAJILLA NEGRA DEL TRIGO



PORCENTAJE DEL AREA FOLIAR

MOSAICO ESTRIADO DEL TRIGO



PORCENTAJE DEL AREA FOLIAR

Figura 4.3. Escalas diagramáticas para evaluar la intensidad de diversas enfermedades de los cereales (tomado de James, 1971).

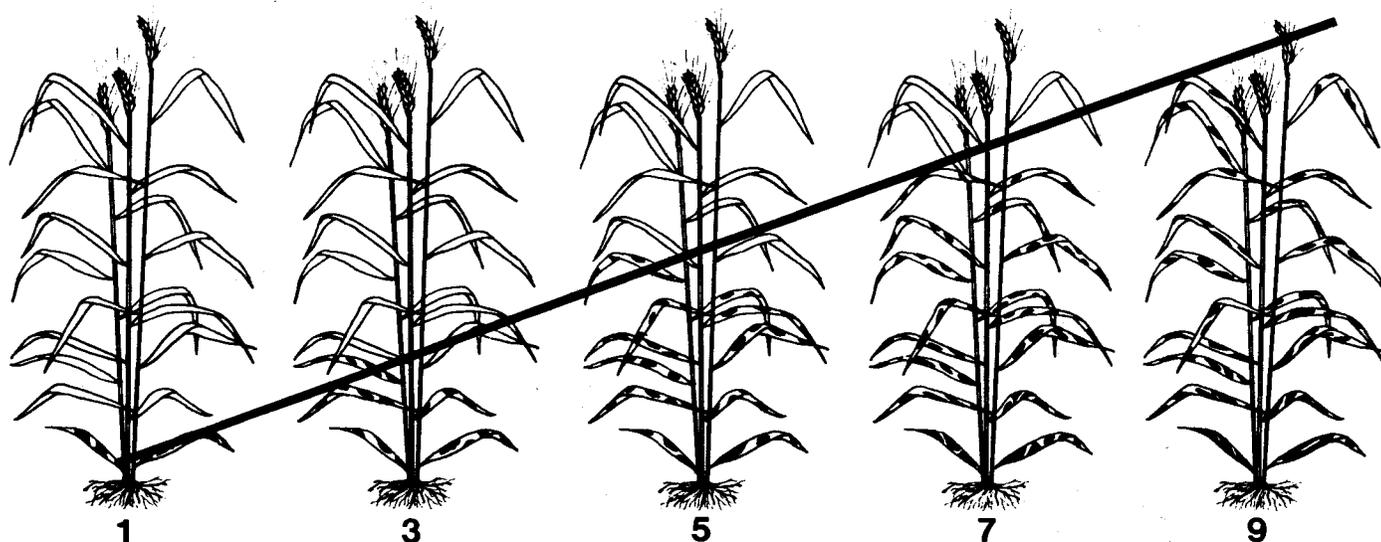


Figura 4.4. Escala para evaluar la intensidad de enfermedades foliares del trigo y la cebada (Saari y Prescott, 1975).

Guía de la figura 4.4. Descripción de los grados de gravedad.

- | | | |
|--|---|---|
| <p>0 Libre de infección.</p> <p>OE Libre de infección, pero probablemente representa un escape.</p> <p>1 Resistente: Unas pocas lesiones aisladas sólo sobre las hojas más bajas.</p> <p>2 Resistente: Lesiones dispersas sobre el segundo grupo de hojas y primeras hojas ligeramente infectadas.</p> <p>3 Resistente: Leve infección del tercio inferior de la planta; hojas más bajas infectadas en grados entre moderados y graves.</p> <p>4 Moderadamente resistente: Infección moderada las hojas bajas; infección dispersa y leve que se extiende a las hojas inmediatamente debajo de la mitad de la planta.</p> | <p>5 Moderadamente sensible: Infección grave de las hojas bajas; infección entre moderada y leve que se extiende sólo hasta la mitad de la planta.</p> <p>6 Moderadamente sensible: Infección grave del tercio inferior de la planta, moderada en las hojas del medio y lesiones dispersas más allá del medio de la planta.</p> <p>7 Sensible: Lesiones graves en las hojas bajas y del medio, con infección que se extiende hasta la hoja que está debajo de la hoja de bandera o con infección mínima de la hoja de bandera.</p> | <p>8 Sensible: Lesiones graves en las hojas de abajo y del medio; infección entre moderada y grave del tercio superior de la planta; hoja de bandera infectada en un grado superior al mínimo.</p> <p>9 Muy sensible: Infección grave de todas las hojas; espiga también infectada en cierto grado. [La infección de la espiga se computa según una escala modificada que se basa en el porcentaje cubierto del área total; la cifra del porcentaje sigue al puntaje asignado a la infección de la hoja, separado de él por una barra (/).]</p> <p>N No es posible hacer un cómputo a causa de la necrosis causada por otros factores de enfermedad.</p> |
|--|---|---|

Tomada de Saari y Prescott, 1975.

Tercera parte. Desarrollo de variedades resistentes a las enfermedades

5. Principios del mejoramiento para obtener variedades resistentes a las enfermedades

Los organismos patógenos para las plantas constituyen una seria limitación para la producción de cereales en casi todas partes del mundo. En consecuencia, los agrónomos han hecho hincapié en la creación de mecanismos para combatir las enfermedades e intentar reducir las serias pérdidas de cultivos que con frecuencia causan esos organismos.

Si consideramos los tres principales factores que determinan la enfermedad (organismo patógeno, huésped y ambiente), sólo las características del huésped y el ambiente pueden, en cierta medida, ser modificadas. Por consiguiente, los mecanismos para combatir enfermedades pueden clasificarse básicamente en dos categorías: 1) los que implican una modificación del ambiente para hacerlo menos favorable para el organismo patógeno (por ejemplo, el empleo de sustancias químicas tóxicas, modificación de las prácticas agronómicas, etc.), y 2) los que implican modificaciones de la estructura genética de la planta para que sea menos apta como huésped (mediante el fitomejoramiento). Sin duda el mejor método de lucha contra cualquier enfermedad será una integración de ambos tipos de mecanismos, basada en el conocimiento del huésped, el organismo patógeno y las interacciones recíprocas.

Los estudios de las interacciones entre las royas de los cereales y sus huéspedes indican que existe una relación muy estrecha entre la genética del organismo patógeno y la del huésped en la manifestación de la enfermedad. Por lo tanto, parecería que es muy posible disminuir las pérdidas provocadas por la enfermedad recurriendo al fitomejoramiento.

Una vez reconocido esto, la creación de variedades de cereales resistentes a los diversos tipos de roya constituye el foco principal de las investigaciones para combatir las enfermedades. Sobre esta base de resistencia se pueden entonces establecer estrategias para un control integrado y amplio.

5.1 Tipos de resistencia

La capacidad de causar la enfermedad y de soportarla varía entre los organismos patógenos y los huéspedes, respectivamente. Ante un organismo patógeno capaz de producir una determinada enfermedad, las plantas pueden responder de diversas maneras:

- **Sensibilidad:** la infección produce un rápido desarrollo de la enfermedad, la propagación en los tejidos del huésped y una apreciable reducción del rendimiento.
- **Tolerancia:** Distintas plantas que aparentemente tienen los mismos grados de infección son afectadas en forma diferente, de tal modo que algunas sobreviven y tienen un rendimiento considerablemente superior al de otras.
- **Resistencia:** El organismo patógeno no logra establecer colonias en el huésped, o su crecimiento y desarrollo son limitados y el daño es reducido.
- **Inmunidad:** No hay signos observables de enfermedad. [Es preciso tener cuidado para no confundir esto con un *escape* (exposición insuficiente al organismo patógeno)].

De las reacciones favorables de la planta señaladas anteriormente, se considera que la tolerancia y la resistencia son las más convenientes y posibles de lograr. La inmunidad, que puede parecer muy conveniente, se presenta muy rara vez y, por otra parte, ejerce una poderosa presión de selección sobre la población de organismos patógenos. A menudo esto provoca la aparición de biotipos nuevos que pueden superar las barreras de resistencia, la cual con frecuencia es más bien específica.

Tolerancia. Estudios efectuados con familias de trigo híbrido han indicado que, con grados de infección que fluctúan entre el 65 y el 100%, algunas familias sufrieron reducciones del rendimiento de hasta 44.5%, mientras que en otras la reducción sólo fue del 9.5%. Este

ejemplo ilustra la importancia potencial de la tolerancia como mecanismo para disminuir las pérdidas causadas por la enfermedad. No obstante, hasta ahora sólo se han efectuado investigaciones limitadas sobre la tolerancia y no se conocen muy bien los mecanismos que la confieren. Por esta razón, los esfuerzos para mejorar variedades han tendido a concentrarse en la creación de variedades resistentes mediante un proceso de selección. Sin que esto implique que la tolerancia tiene, o tendrá, menor importancia general, en esta sección la discusión se referirá predominantemente a la resistencia a las enfermedades.

Una de las principales desventajas de la tolerancia como mecanismo para disminuir las pérdidas causadas por la enfermedad es que las variedades tolerantes siguen siendo capaces de producir grandes cantidades de inóculo del organismo patógeno. Esto puede provocar graves problemas de propagación de la enfermedad a otras variedades cultivadas en el mismo sitio, hecho que tiene una particular trascendencia.

Resistencia. Los especialistas en fitopatología comúnmente distinguen dos categorías principales de resistencia: vertical y horizontal, o específica y no específica.

La resistencia vertical, también llamada perpendicular, racial o específica, se presenta cuando una variedad es resistente a algunas razas fisiológicas del organismo patógeno, pero es sensible a otras. La resistencia vertical reduce entonces la cantidad de inóculo inicial capaz de infectar al huésped. No obstante, como las razas o cepas del organismo patógeno no limitados por la resistencia particular aún pueden establecer colonias en la variedad, la resistencia vertical no sirve para restringir la infección ni las tasas de producción de esporas de estas razas o cepas.

Por el contrario, la resistencia horizontal implica un tipo de resistencia igualmente eficaz contra todas las razas del organismo patógeno. Se han usado muchos

términos para describir este tipo de resistencia, incluso resistencia sobre el terreno y resistencia generalizada. Al reducir el número de esporas que causan lesiones, aumentar el intervalo entre la infección y la esporulación y reducir el número de esporas secundarias producidas por cada infección (entre otros efectos), los mecanismos de resistencia horizontal sirven para reducir las tasas de infección y de reproducción del organismo patógeno.

Mecanismos de resistencia. Durante su larga evolución, los cereales han desarrollado un gran número de mecanismos que restringen la cantidad de organismos patógenos capaces de penetrar en sus tejidos e infectarlos. La resistencia a la penetración por lo general se logra mediante ciertas características de la estructura de la planta, como una epidermis gruesa, estomas estrechos y la presencia de capas protectoras especializadas. Estos son mecanismos de resistencia mecánica o pasiva que, junto con elementos de resistencia funcional (por ejemplo, el cierre oportuno de los estomas), constituyen tipos de una resistencia más bien horizontal, de base amplia. No obstante, esos mecanismos de resistencia pasiva comúnmente se desarrollan sólo a medida que crece y madura la planta. Por consiguiente, en los estadios tempranos de desarrollo de la planta la mayoría de las variedades con este tipo de resistencia tienden a ser más sensibles a la infección, fenómeno que ha dado origen al término "resistencia de la planta adulta" para designar este tipo específico de resistencia.

Además de esos mecanismos pasivos, las plantas poseen una serie de mecanismos de resistencia activa que se inician sólo en respuesta a la presencia de ciertas razas patógenas. Estos mecanismos son muy variados y a menudo muy específicos para determinadas razas; en consecuencia, confieren por lo general (aunque no siempre) una resistencia de tipo vertical.

5.2 Modos de herencia

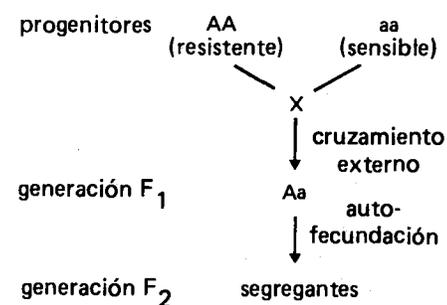
La resistencia a los organismos patógenos puede ser conferida por una serie de genes diferentes o distintas combinaciones de genes. Los estudios genéticos han clasificado los tipos de herencia de la resistencia en dos grupos principales: 1) monogénica, o resistencia controlada por la herencia de un único gen, y 2) poligénica, o resistencia controlada por la herencia de más de un gen.

Cuando la resistencia a las enfermedades está controlada por un solo gen, el efecto de éste es generalmente claro y puede ser estudiado y detectado con relativa facilidad. Por el contrario, la herencia poligénica normalmente no es tan clara y a menudo es imposible aislar los efectos de genes particulares o estimar el número de los genes que intervienen. Esto obedece a que los poligenes tienen un carácter aditivo y producen un mayor grado de resistencia cuando aumenta el número de genes. Las plantas que poseen resistencia poligénica no constituyen entonces clases separadas en poblaciones en segregación, sino que más bien muestran una gama de variación continua.

Como se conocen casos en los cuales la resistencia es conferida por dos o tres genes separados identificables, tal vez sea mejor dividir la resistencia poligénica en dos tipos, la *oligogénica* (resistencia determinada por pocos genes) y la *poligénica* (determinada por muchos genes). A menudo se llama resistencia de genes mayores a la resistencia oligogénica, mientras que la resistencia poligénica recibe el nombre de resistencia de genes menores. Esta terminología, si bien de uso común, puede crear muchas confusiones, ya que no todos los oligogenes son genes mayores, en el sentido de que produzcan un gran efecto; del mismo modo, un solo gen identificable, heredado a la manera mendeliana, puede en ciertos casos conferir sólo una leve resistencia a las enfermedades.

La resistencia vertical es conferida por lo general (aunque no siempre) por genes mayores con un gran efecto y, como resultado, tiende a ser relativamente fácil de obtener mediante la selección. Por el contrario, la resistencia horizontal normalmente implica la participación de genes menores y es más difícil de identificar.

Por consiguiente, la mayoría de los intentos de mejoramiento de cultivos han tendido a concentrarse en la obtención de variedades con resistencia de tipo vertical. Si bien esa resistencia a menudo es muy completa, implica una considerable presión de selección sobre las poblaciones de organismos patógenos y, en consecuencia, evolucionan con rapidez razas de organismos capaces de superar las barreras de resistencia específica, que se convierten en las razas dominantes en esas poblaciones. Esta situación está especialmente bien documentada en el caso de las royas de los cereales y se hace necesario desarrollar continuamente variedades con nuevos genes o combinaciones de genes de



SEGREGACION DE LA F₂

Gametos masculinos	A	a
A	AA	Aa
a	Aa	aa
Gametos femeninos		

Figura 5.1. Esquema típico que ilustra la herencia monogénica.

resistencia con el fin de adelantarse a la aparición de razas de organismos patógenos con una virulencia nueva. No obstante, la resistencia de genes mayores continúa teniendo considerable importancia en gran parte de los programas de mejoramiento y los investigadores buscan continuamente nuevas fuentes de genes mayores.

A pesar de que la resistencia poligénica suele tener efectos mucho menos espectaculares que los de la resistencia de genes mayores, tiende a conferir un tipo de resistencia horizontal de base amplia. La resistencia horizontal implica una presión de selección mucho menor sobre las poblaciones de organismos patógenos, especialmente porque rara vez es completa. Las variedades con este tipo de resistencia causan menos alteraciones en las poblaciones de organismos patógenos y, por consiguiente, suelen tener mayor estabilidad. Cada vez se da más importancia a la obtención de métodos para identificar grados convenientes de resistencia poligénica.

Patrones de la herencia. En la figura 5.1 se presenta un diagrama que ilustra el patrón de la herencia monogénica. En ella se puede observar que, cuando la resistencia se hereda como carácter dominante, todos los individuos de la F₁, si bien son heterocigóticos, serán resistentes. Sin embargo, como la segregación se produce en la generación F₂, sólo tres de cada cuatro plantas serán resistentes:

- 1 AA (homocigótico resistente)
- 2 Aa (heterocigótico resistente)
- 1 aa (homocigótico sensible)

Sin embargo, cuando la resistencia se hereda como carácter recesivo, todos los individuos de la F₁ serán sensibles y sólo una planta (aa) de cada cuatro segregantes de la F₂ mostrará resistencia.

En el caso de que existan dos genes y suponiendo que el gen A confiera resistencia a una enfermedad y sea dominante y que el gen B confiera resistencia a una segunda enfermedad y se herede también como carácter dominante, todos los individuos de la F₁ serán resistentes a ambas enfermedades. No obstante,

con la segregación en la generación F₂ las proporciones genotípicas y fenotípicas serán las que se muestran en la figura 5.2. Existirá una situación similar si los genes A y B confieren resistencia a dos razas del mismo organismo patógeno.

Cuando es mayor el número de genes que participan, aumenta el número de posibles genotipos y también la proporción fenotípica (la proporción entre el número de plantas resistentes y el número de plantas sensibles). Por ejemplo, un gen da una proporción de 3:1, dos genes, de 15:1, tres genes, de 63:1, etc.

Interacciones entre genes y organismos patógenos. Si hay cuatro genes de resistencia diferentes (A, B, C y D) y seis cepas del organismo patógeno que prevalecen (1, 2, 3, 4, 5 y 6), pueden producirse una serie de interacciones entre los genes y el organismo patógeno, tres de las cuales se presentan en el cuadro 5.1 (página 28).

5.3 Estrategias para mejorar la resistencia

La mayoría de los programas para el mejoramiento de la resistencia a las enfermedades se basan en un procedimiento sencillo: la identificación de una fuente de resistencia, seguida de la incorporación de esa fuente a un fondo genético convenientemente adaptado y de gran rendimiento. Esto se puede lograr mediante estrategias de mejoramiento de plantas individuales (por ejemplo, la selección genealógica y el retrocruzamiento) o de poblaciones de plantas (por ejemplo, selección masal y mejoramiento por hibridación en masa).

Como los cereales en general y el trigo en particular son predominantemente cultivos de autopolinización, se usan en forma casi exclusiva estrategias de mejoramiento de plantas individuales. Esto implica la exposición de un gran número de líneas individuales a razas patógenas con el propósito de identificar individuos específicos con resistencia. Los individuos adecuadamente resistentes entonces se cruzan con plantas que muestren

SEGREGACION GENOTIPICA					
Gametos masculinos F ₁		AB	Ab	aB	ab
Gametos femeninos F ₁	AB	AABB	AABb	AaBB	AaBb
	Ab	AABb	AAbb	AaBb	Aabb
	aB	AaBB	AaBb	aaBB	aaBb
	ab	AaBb	Aabb	aaBb	aabb

SEGREGACION FENOTIPICA		
1 AABB	} 9 resistentes a ambas enfermedades	} 15 resistentes a la primera enfermedad, a la segunda o a ambas
2 AABb		
2 AaBB		
4 AaBb		
1 AAbb	} 3 resistentes sólo a la primera enfermedad	
2 Aabb		
1 aaBB	} 3 resistentes sólo a la segunda enfermedad	
2 aaBb		
1 aabb	} 1 sensible a ambas enfermedades	

Figura 5.2. Segregación de dos genes en la generación F₂.

otras características convenientes, se ponen a prueba las generaciones segregantes y se descartan todos los individuos sensibles. De este modo es posible combinar un gran número de fuentes de resistencia para obtener líneas específicas que se estabilizan mediante ciclos repetidos de autofecundación y selección hasta conseguir los caracteres deseados (que llevan a un rápido aumento de la homocigosis y la uniformidad).

El examen de las plantas individuales para determinar su resistencia a las enfermedades puede efectuarse durante el estadio de plántula en un invernadero, pero los complejos y complicados procedimientos de prueba necesarios cuando se inspeccionan grandes volúmenes de material para establecer la resistencia a numerosas razas patógenas exigen el examen en el campo.

Estrategias de selección genealógica. La selección genealógica implica cruzamientos simples, dobles o triples, seguidos de repetidos ciclos de selección para eliminar a los individuos no convenientes. El empleo de diferentes razas en sucesivos ciclos de pruebas permitirá

seleccionar variedades con una base de resistencia más bien amplia. En la figura 5.3 se muestra un típico esquema de selección genealógica.

A medida que avanzan los ciclos de selección y autofecundación, aumenta rápidamente el grado de homocigosis, como se muestra en la figura 5.4. En este ejemplo, si se considera que A es el gen resistente y es dominante, el porcentaje de plantas homocigóticas resistentes aumenta de 33% a 60% si se descartan todos los individuos sensibles (aa).

Estrategias de retrocruzamiento. Cuando se desea transferir un carácter, como la resistencia a las enfermedades, a un genotipo conveniente en todos los demás aspectos, comúnmente se usa una estrategia de retrocruzamiento. Esto implica efectuar el cruzamiento original, desarrollar la población segregante de la F₂ (producida por la autofecundación de la F₁) y luego efectuar nuevamente el cruzamiento de todos los segregantes que muestren resistencia a las enfermedades con el genotipo conveniente (o progenitor

recurrente). Este ciclo de selección y retrocruzamiento se lleva a cabo durante varias generaciones y después se realiza una selección en la forma normal, para obtener una combinación de los caracteres deseados. La mecánica de esta estrategia de retrocruzamiento varía considerablemente según el carácter o caracteres en cuestión.

Variedades de líneas múltiples. Las líneas múltiples, también llamadas variedades compuestas o artificiales, se pueden emplear con éxito para producir una "variedad" comercial cuando las líneas individuales no poseen genes o combinaciones de genes que confieran resistencia a todas las razas prevalentes de un organismo patógeno. Esas variedades se producen en forma artificial mezclando semillas de diferentes líneas, cada una de ellas con sus propios genes de resistencia. Por consiguiente, cada individuo no es en sí mismo resistente a todos los organismos patógenos. No obstante, cuando se produce el ataque de una determinada raza patógena, sólo las líneas sin resistencia específica resultarán afectadas y las demás no

Cuadro 5.1. Tres tipos de interacción entre genes y organismos patógenos.

Genes para la resistencia	Cepa patógena						Conclusión
	1	2	3	4	5	6	
1) A	S	R	S	R	S	R	El gen C confiere resistencia a todas las cepas del organismo patógeno.
B	R	R	S	S	R	R	
C	R	R	R	R	R	R	
D	S	S	S	R	R	R	
Reacción del huésped	R	R	R	R	R	R	
2) A	S	R	S	R	S	R	Los genes A y D combinados confieren resistencia a todas las cepas del organismo patógeno.
B	R	S	S	S	S	R	
C	R	S	R	R	S	R	
D	R	S	R	S	R	S	
Reacción del huésped	R	R	R	R	R	R	
3) A	S	R	S	R	S	R	Ningún gen único o combinación de genes confiere resistencia a todas las cepas del organismo patógeno.
B	R	R	S	R	R	S	
C	R	S	S	S	R	S	
D	S	S	S	R	S	S	
Reacción del huésped	R	R	S	R	R	R	

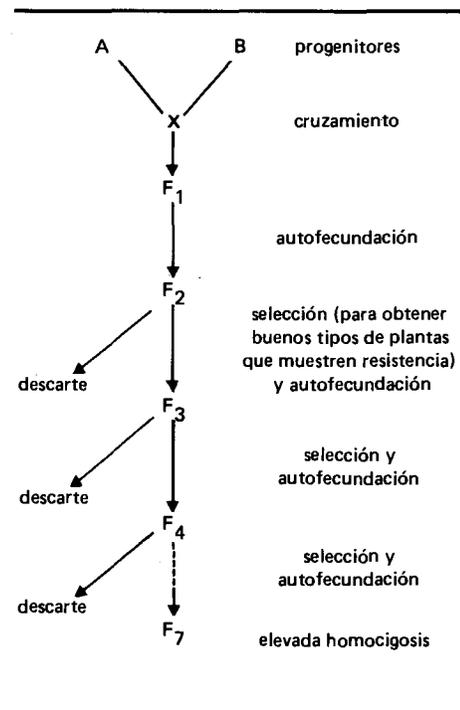


Figura 5.3. Esquema para un programa de selección genealógica.

sufrirán daños. De este modo, si bien la "variedad" considerada como un todo es invariablemente infectada, el organismo patógeno no puede infectar más que a algunos individuos y el daño total es leve.

El desarrollo de variedades eficaces de líneas múltiples exige una habilidad considerable y un gran conocimiento de las razas patógenas prevalentes. Se requiere una continua evaluación de los componentes de esas variedades y su sustitución para poder seguir contrarrestando los ataques de los cambiantes organismos patógenos.

5.4 La práctica del fitomejoramiento

Es preciso señalar que, en la práctica, los programas de mejoramiento por lo general incluyen una multiplicidad de objetivos, un gran volumen de material vegetal y la consideración de numerosos caracteres. Los temas analizados en esta sección han sido considerablemente simplificados con el fin de subrayar las características básicas de las estrategias de mejoramiento.

Es de suma importancia la selección en todos los programas de mejoramiento. Al seleccionar los tipos convenientes de una población, los investigadores deben basarse en la observación de su desarrollo en el campo (producto de la interacción entre el genotipo de la planta y el ambiente) como indicador de la

estructura genética real de la planta. Las diferencias en las condiciones ambientales afectan considerablemente la expresión de los caracteres genéticos. Por ejemplo, si no existen los organismos patógenos de la roya, todas las plantas parecerán resistentes (es decir, no afectadas por esa enfermedad). Del mismo modo, si la concentración de hongos de la roya varía apreciablemente en un vivero, las variedades no expuestas a concentraciones elevadas parecerán resistentes aunque de hecho no lo sean.

Estos ejemplos sencillos destacan la importancia de lograr que las condiciones ambientales sean uniformes, aptas para favorecer la máxima manifestación de la enfermedad en toda la extensión de los viveros donde se efectúa la selección. Sólo así las selecciones basadas en el fenotipo de las plantas reflejarán las características reales de éstas y tendrán éxito los programas de mejoramiento. En los programas en que se busca aumentar la resistencia a las enfermedades, la contribución de la patología tiene una importancia trascendental.

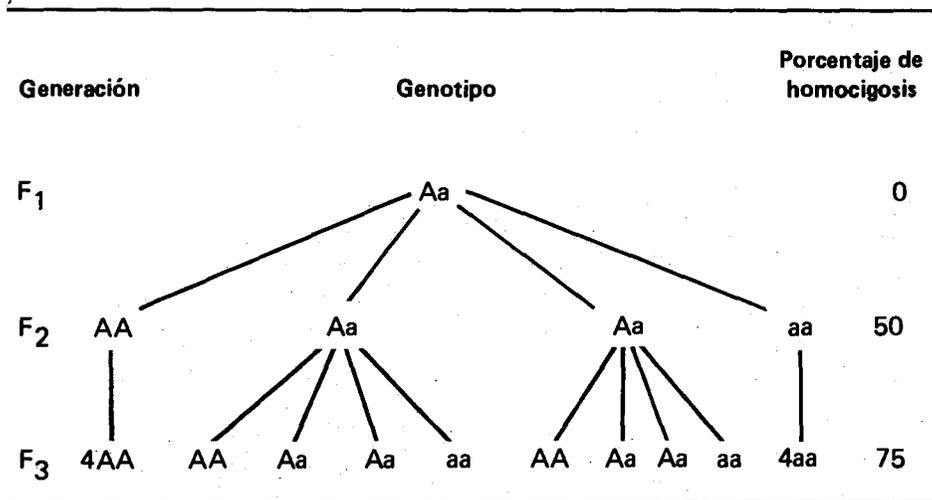


Figura 5.4. Aumento de la homocigosis logrado con la selección repetida.

6. La fitopatología y el mejoramiento de los cereales

La contribución de la fitopatología es fundamental en todo el esfuerzo para disminuir las pérdidas provocadas por enfermedades y en la creación y puesta en práctica de programas de investigación con ese propósito. Esa contribución se relaciona con una serie de áreas bien definidas y estrechamente vinculadas entre sí.

Encuestas en gran escala sobre la enfermedad. El énfasis y la orientación de los programas de investigación concerniente a la lucha contra las enfermedades se basan, en primer término, en la estimación precisa de la presencia e importancia de organismos patógenos específicos en sitios también específicos. Además, la representación gráfica del traslado de determinadas enfermedades a grandes distancias proporciona un eficaz sistema de "alarma temprana", de tal modo que se pueden explotar al máximo las variedades sensibles sin correr el riesgo de que sean atacadas por la enfermedad. Las encuestas son también vitales para identificar razas o biotipos virulentos nuevos tan pronto como aparecen y para registrar las fluctuaciones en las poblaciones de organismos patógenos que se producen año tras año y de lugar en lugar.

Sin el aporte continuo de los datos de las encuestas, los programas de mejoramiento de la resistencia a las enfermedades se volverían rápidamente obsoletos. Los sistemas para efectuar encuestas en gran escala, como los Viveros Internacionales Trampa para Identificación de Enfermedades, tienen gran importancia ya que proporcionan información actualizada sobre el estado de poblaciones de organismos patógenos en una zona extensa y, en consecuencia, contribuyen a que los programas de mejoramiento se concentren en los problemas reales.

Estudios intensivos de la patogenia. La identificación de razas fisiológicas y de los factores que influyen en su interacción con los cereales huéspedes constituye otra área importante de los estudios patológicos. El conocimiento cada vez mayor de las relaciones entre el huésped y el organismo patógeno

permite que las estrategias destinadas a reducir los efectos de esas relaciones parasitarias cuenten con fundamentos fisiológicos cada vez más sólidos. Esos estudios representan un aporte significativo para la evolución futura de las estrategias de mejoramiento.

Manejo de los viveros. Una de las funciones más importantes de la fitopatología aplicada a la obtención de variedades resistentes es asegurar que la enfermedad se desarrollará de manera uniforme y adecuada en los viveros donde se efectúan las observaciones. En muchos casos, gracias a la cuidadosa selección del sitio y al control de las condiciones ambientales, tal vez sea posible confiar simplemente en la infección natural. No obstante, cuando las condiciones ambientales no favorezcan el desarrollo de la enfermedad, será necesario crear epifitias artificiales. En este sentido, adquieren particular importancia diversos aspectos de la reunión, multiplicación, almacenamiento y aplicación del inóculo, además de consideraciones directas relacionadas con el diseño, ubicación y manejo del vivero.

Evaluación de la enfermedad. Toda la esfera de evaluación de la enfermedad está estrechamente vinculada con los aspectos del manejo de los viveros señalados anteriormente. Como ya se indicó, la evaluación precisa (unida a las condiciones uniformes y adecuadas del vivero) es esencial en todo intento de mejoramiento. Las evaluaciones de la enfermedad son muy subjetivas y se basan casi exclusivamente en observaciones sobre el terreno y en la habilidad de quienes efectúan esas observaciones. La patología debe entonces cumplir una importante función en la elaboración de técnicas de inspección y registro más precisas y rápidas.

6.1 Establecimiento de viveros para la observación de enfermedades

Hay un considerable margen de flexibilidad en el diseño y planificación de viveros para la observación de enfermedades. El tamaño de las parcelas puede variar

de acuerdo con la disponibilidad de semilla y equipo de siembra; son adecuadas las parcelas con una o dos hileras de uno o dos metros de largo. Sin embargo, es esencial emplear prácticas agronómicas (aplicación de fertilizantes, escardadura, irrigación, etc.) que garanticen el crecimiento y desarrollo óptimos de las plantas. Además, es preciso regular la fecha de trasplante y la densidad de las plantas para favorecer el desarrollo máximo de la enfermedad. Estas condiciones son necesarias para asegurar 1) que las plantas expresen al máximo su potencial de resistencia genética (esto no puede suceder cuando el desarrollo de las plantas es inferior al óptimo) y 2) que la presión de selección usada sea también máxima (las selecciones efectuadas bajo una presión de selección muy leve suelen ser muy poco fiables).

En general, los viveros para la observación de enfermedades deben incluir variedades testigo sensibles, a veces con una frecuencia de una hilera de estas variedades por cada veinte hileras de las plantas presuntamente resistentes. Esas hileras testigo actúan como "propagadoras" para la acumulación y dispersión de inóculo en el vivero y sirven como pauta para medir la gravedad de la enfermedad cuando la incidencia de ésta es escasa. El empleo como testigos de variedades sensibles cultivadas en el lugar es muy recomendable, ya que simultáneamente se pueden comparar características agronómicas.

Debe tenerse en cuenta que la inclusión de variedades testigo sensibles presenta la desventaja de causar interferencia dentro de la parcela (es decir, el inóculo producido en la hilera sensible aumentará la cantidad de enfermedad en las plantas adyacentes). Las condiciones no uniformes de enfermedad creadas por esta interferencia tal vez tengan escasa trascendencia al poner a prueba la resistencia específica de genes mayores, pero puede causar graves problemas en viveros donde el propósito fundamental es identificar grados moderados de resistencia.

6.2. Técnicas para intensificar y crear epifitias

Las técnicas para lograr el desarrollo adecuado y uniforme de epifitias, esenciales en los viveros de selección, tienen fundamentalmente el propósito de asegurar que haya cantidades suficientes de inóculo patógeno y condiciones ambientales favorables. Hay una serie de métodos, unos sencillos y otros complejos, que permiten obtener una rápida acumulación de inóculo sobre el terreno. La elección del método depende en gran medida de las características del organismo patógeno en cuestión, de las condiciones ambientales existentes y de los objetivos de cada vivero.

Intensificación de las epifitias naturales. El método más sencillo para la observación de enfermedades es la exposición de las plantas a la infección natural. No obstante, rara vez se pueden lograr grados uniformes y adecuados de infección en la mayoría de los sitios y años. Por consiguiente, casi siempre es necesario un cierto grado de intensificación.

La primera consideración en este sentido es la ubicación de los viveros. Si los viveros de selección se sitúan en zonas donde se sabe que la incidencia de la enfermedad es constantemente elevada todos los años (por ejemplo, Izmir en la región occidental de Turquía, Njoro en las tierras altas de Kenia, el Valle del Yangtzé en China), se pueden obtener con regularidad grados elevados de enfermedad. Con el fin de asegurar que el material está expuesto a la población patógena más variada posible, es preciso establecer una serie de viveros en una zona geográfica tan amplia como sea factible. Esta consideración es el fundamento de la distribución amplia de viveros para la observación de enfermedades en toda la región.

Dentro del vivero, la enfermedad de origen natural casi invariablemente se presenta en unos pocos focos aislados en las hileras testigo constituidas por plantas sensibles. Se puede usar material de estas infecciones iniciales aisladas para propagar la enfermedad con más amplitud y uniformidad en las hileras

“propagadoras”. En el caso de la roya, esto se logra sacudiendo las partes infectadas de la planta sobre las hileras sanas. Para que este procedimiento sencillo resulte eficaz, es preciso repetirlo varias veces a comienzos de la estación y acompañarlo del riego adecuado (preferiblemente mediante aspersión) para mantener húmeda la superficie de las plantas antes de la inoculación.

Tal vez la mayor ventaja de las pruebas con la enfermedad de origen natural, especialmente cuando se efectúan en sitios diferentes, sea que las plantas están expuestas a la totalidad de la variable gama de organismos patógenos presentes en una extensa zona geográfica.

Creación de epifitias artificiales. Las condiciones ambientales favorables para el desarrollo óptimo de la enfermedad rara vez se presentan todos los años, ni siquiera en los sitios más apropiados. Además, puede existir una gran variación en la gravedad de cada enfermedad, ya sea de un sitio a otro o en un solo sitio a lo largo de los años. En estas condiciones inciertas, en particular cuando la estación es más seca de lo normal, la única forma de asegurar el desarrollo adecuado de la enfermedad es provocar artificialmente una epifitias.

Esto se puede lograr usando el inóculo reunido en sitios donde la enfermedad se presenta en un período más temprano de la estación, o el inóculo conservado de infecciones acaecidas en la estación anterior. En secciones posteriores se considerarán en detalle técnicas para la reunión, almacenamiento, multiplicación y aplicación del inóculo. En este momento basta decir que es esencial proporcionar la humedad adecuada en los viveros e inocular varias veces a comienzos de la estación.

Si bien con la inoculación artificial, cuando se efectúa apropiadamente, a menudo se logra un buen desarrollo de la enfermedad, existe un riesgo considerable de exponer el material sólo a un número limitado de las razas patógenas existentes.

6.3 Justificación de la creación de epifitias artificiales

El concepto total de la creación de epifitias artificiales ha estado, y sigue estando, sujeto a las continuas y a menudo injustas y duras críticas de algunas personas. En general esas críticas obedecen a una sobrestimación de los peligros implícitos y a la escasa apreciación de los beneficios que se pueden obtener. Vale entonces la pena considerar estos dos aspectos antes de embarcar en un estudio más profundo del tema.

Beneficios de la creación de epifitias. Comúnmente se está de acuerdo en que una de las formas más eficaces de reducir las pérdidas provocadas por las infecciones que causan los organismos patógenos es desarrollar en las variedades de cultivos algún tipo de resistencia inherente. Esto se conoce como “seguro genético” y se aplica especialmente en el caso de los países en desarrollo, donde factores relacionados con los ingresos e infraestructura rurales de hecho impiden recurrir a medidas de control químico, más costosas.

Como resultado de la inmensa capacidad de ciertos organismos patógenos (por ejemplo, las royas de los cereales) para mutar y producir cepas o biotipos virulentos nuevos, el promedio de vida de una variedad resistente a las enfermedades (el tiempo entre la introducción y la presencia difundida de razas patógenas capaces de vencer la resistencia) a menudo es corto (en el caso de los cereales resistentes a la roya, es de unos cinco años). Sin embargo, algunas variedades han sobrevivido un tiempo considerablemente mayor, aunque esto no es frecuente. De hecho, se ha comprobado que muchas variedades resistentes a la roya son útiles desde un punto de vista comercial sólo durante una o dos estaciones, posiblemente a causa de la selección insuficiente en el período de desarrollo. Esto significa que los programas de mejoramiento deben generar en forma continua nuevas variedades con un tipo de resistencia cada vez más amplia y estable.

De acuerdo con las consideraciones previas, hemos visto que la única forma de asegurar una selección eficaz con una presión de selección constantemente elevada y amplia es el empleo de epifitias creadas artificialmente. La importancia de este tipo de prácticas, especialmente en los países en desarrollo donde el "seguro genético" es una parte vital del mejoramiento de la producción agrícola, es entonces muy evidente.

Peligros de la creación de epifitias. El principal peligro de la creación de epifitias artificiales, que constituye la base de todas las críticas repetidas, es que el inóculo producido en los viveros se propagará a los cultivos de los alrededores y provocará grandes epifitias en el lugar. Los críticos consideran que esto adquiere particular trascendencia cuando se hacen pruebas de la resistencia a razas virulentas nuevas, aún no difundidas. Por esta razón, existe a menudo una considerable renuencia a usar razas patógenas nuevas en los programas de selección. No obstante, el fundamento de la selección para encontrar resistencia es identificar fuentes de resistencia a esas razas antes de que se difundan y constituyan una amenaza importante para la producción.

En este contexto, es conveniente considerar las experiencias anteriores en el desarrollo de epifitias. Las investigaciones han demostrado que la mayor parte del inóculo de roya producido en un cultivo inoculado permanece dentro de los límites del cultivo (el 90% del inóculo se desplaza a menos de 100 metros del sitio de inoculación durante las primeras etapas de la epifitia). Sólo cuando el desarrollo de la epifitia se acerca a su grado máximo existen urediosporas en cantidades suficientes para que puedan ser levantadas del cultivo y transportadas a distancias más largas. En ciertas ocasiones se ha encontrado que están infectados cultivos vecinos. Sin embargo, como la epifitia llega a la etapa de dispersión amplia de inóculo sólo cuando los cultivos están alcanzando su madurez, el daño es insignificante y son en extremo escasas las

probabilidades de que se acumulen y se propaguen más los organismos patógenos.

Aun cuando el riesgo de contaminación a causa de los viveros para la observación de enfermedades sea muy remoto, ¿qué daño puede provocar en realidad algo de contaminación? En vista de la rapidez y amplitud con que pueden propagarse las razas nuevas de la roya, es evidente que, de todos modos, no pasará mucho tiempo antes de que esas razas estén bien establecidas en casi todas las zonas. Cuando se tienen en cuenta estas consideraciones, parecería que la preocupación por el peligro causado por los grados tan bajos de contaminación que pudieran resultar de epifitias creadas artificialmente es mucho mayor de lo que en realidad se justifica.

Si se analizan los beneficios de estas prácticas junto con los peligros inherentes, resulta obvio que no se debe permitir que las críticas impidan el empleo amplio de epifitias artificiales en los programas para el mejoramiento de cereales. Son muy grandes las probabilidades de sufrir grandes pérdidas de cultivos y, por consiguiente, problemas sociales y económicos muy difundidos, si no se logran obtener variedades resistentes eficaces. La amenaza es mucho mayor que las pérdidas potenciales que pueda provocar la contaminación de campos vecinos y sería erróneo restringir el empleo de estas prácticas sobre la base de los peligros inherentes. No obstante, es preciso insistir en que se deben tomar todas las precauciones en la labor de identificación de enfermedades para evitar la contaminación y, lo que quizá sea más importante, asegurarse de que se conozcan las precauciones.

6.4 Algunas importantes consideraciones técnicas en relación con la creación de epifitias

Diversidad de las razas virulentas. Todas las poblaciones de organismos patógenos incluyen muchas razas fisiológicas o biotipos diferentes. Como ya se señaló, al usar epifitias creadas artificialmente como base

para la selección, es considerable el riesgo de exponer las plantas a sólo una pequeña parte de la variada población patógena. Con el fin de asegurar que el vivero está expuesto a la variedad de razas más amplia posible, es preciso dedicar especial atención a las técnicas de recolección e inoculación.

Métodos de recolección. Cada variedad del huésped tiende a favorecer el desarrollo de una sola raza específica de un organismo patógeno. Este hecho está bien documentado en las encuestas sobre la roya, que muestran que el 85% del material reunido en una sola variedad incluye únicamente una raza; el 10% del material incluye dos razas y se encuentran tres razas sólo en el 5% de las muestras. Por otra parte, la población patógena suele variar de un sitio a otro.

En consecuencia, la recolección de inóculo debe incluir el mayor número posible de variedades del huésped (incluidas las comerciales) y la gama más amplia de sitios en una determinada zona, con el propósito de tratar de combinar una gran cantidad de razas diferentes en una sola población para la inoculación.

Si se dispone de invernaderos e instalaciones de laboratorio, se puede ampliar aún más la diversidad de razas virulentas mediante la multiplicación de razas cuya presencia natural sea poco frecuente. Esto contrarrestará la posibilidad de una selección inadecuada como consecuencia de que esas razas no hayan podido acumularse en concentraciones suficientemente elevadas durante el período de selección.

Procedimientos de inoculación. Los métodos usados para inocular en un vivero también pueden influir sobre la diversidad de razas virulentas a que están expuestas las plantas.

Si se crean epifitias fundamentalmente mediante la inoculación de las hileras propagadoras, las variedades que componen estas hileras pueden causar un fuerte efecto selectivo sobre la diversidad de razas. Los experimentos han demostrado que, si

se inocula en una sola variedad una mezcla de razas de la roya, por ejemplo, una raza predominará después de unas pocas generaciones del organismo patógeno y muchas otras razas serán casi eliminadas. Por esta razón, es esencial que las hileras propagadoras estén compuestas de una mezcla de distintas variedades. Es preciso examinar con regularidad esta mezcla para asegurarse de que siempre incluya variedades de reconocida sensibilidad a ciertas razas virulentas.

Quizá la mejor forma de estar seguro de que cada raza tendrá la oportunidad de encontrar un huésped compatible consista en inocular todo el vivero con inóculo combinado usando un rociador o espolvoreador. En este método se exponen todos los genotipos de un vivero a la misma mezcla de inóculo y es por lo tanto probable que la presión de selección resulte más uniforme que la que se puede lograr mediante la inoculación de sólo las hileras propagadoras. Sin embargo, se requiere más tiempo—especialmente cuando se trata de viveros grandes—y, en consecuencia, esto se contrapone a las consideraciones, relacionadas con el tiempo, que se exponen a continuación.

Sincronización de la inoculación. El establecimiento temprano de infecciones primarias favorece considerablemente el desarrollo de las epifitias y, por consiguiente, de la presión de selección que se ejerce. Las inoculaciones efectuadas a comienzos de la estación aumentan el número de generaciones de organismos patógenos que se producen antes de la selección (siempre, por supuesto, que las condiciones ambientales sean favorables) y, teniendo en cuenta que una sola infección por roya puede producir entre 50,000 y 250,000 esporas nuevas, es obvio que esa generación extra permitirá un aumento apreciable de la gravedad de la enfermedad.

También es esencial que las inoculaciones coincidan con condiciones ambientales favorables para la infección. Se debe efectuar la

primera inoculación cuando las condiciones ambientales sean favorables por primera vez. Una vez que el organismo patógeno está bien establecido, podrá generar sus propias inoculaciones secundarias, muy superiores. El tiempo entre la infección y la producción de esporas también depende del medio. Con temperaturas óptimas constantes, a veces es posible que se produzcan nuevas esporas de roya en una semana. En condiciones favorables sobre el terreno, normalmente se requieren de 10 a 14 días, pero el tiempo necesario para la generación puede superar las tres semanas si predominan temperaturas inferiores a las óptimas. Cuando se van a registrar las reacciones a mediados del estadio masoso del grano, es preciso establecer las infecciones por lo menos cinco semanas antes de que comience ese estadio y, preferiblemente, aun antes. En el caso de la roya lineal, en las zonas con temperaturas que aumentan rápidamente en la primavera, será necesario establecer las infecciones en un período aún más temprano.

En consecuencia, el momento en que se inicia la inoculación estará determinado por las necesidades del hongo en cuestión, las condiciones climáticas y el estado de desarrollo de la planta en relación con el tiempo que resta para el desarrollo de la epifitia. En algunos casos, tal vez sea conveniente establecer infecciones iniciales antes de las condiciones climáticas óptimas más tempranas, con el fin de intensificar al máximo la propagación secundaria de la enfermedad. Con esto se dispondrá de una provisión continua de inóculo para cada período favorable para la infección y de tiempo suficiente para que la epifitia se desarrolle a un grado tal que permita efectuar una selección adecuada y precisa.

Otra consideración importante es el número de veces que se debe inocular un vivero. Muchos factores ambientales influyen sobre la dispersión de inóculo y el establecimiento de la enfermedad. Por ejemplo, los vientos tal vez se lleven las esporas de las cercanías del vivero, o la súbita disminución de

la humedad libre puede causar la muerte de esporas que han comenzado a germinar. Estos y otros factores reducen las posibilidades de establecer buenas infecciones a partir de una sola inoculación inicial. Por esta razón, generalmente se considera esencial efectuar por lo menos cinco inoculaciones en el caso de las royas.

Cantidad de inóculo. No es fija la cantidad de inóculo que se requiere para inocular una determinada área. Comúnmente el proverbio "más vale que sobre y no que falte" es una buena norma en la práctica. En términos generales, cada hectárea de trigo o cebada contiene aproximadamente 2.5 millones de plantas (por supuesto, el número de tallos es considerablemente superior ya que cada planta tiene varios). Para una cobertura adecuada de la superficie de las plantas se requerirán alrededor de 1,000 esporas de roya por planta y se calcula que un gramo de esporas contiene 500 millones de células individuales. Por lo tanto, un cálculo sencillo nos indica que se precisarán unos 2,500 millones de esporas, o sea 5 gramos, para cada hectárea de vivero. Esta gran cantidad de esporas por planta es necesaria por varias razones: muchas esporas caerán sobre el suelo desnudo y nunca llegarán a la planta; muchas pueden no ser viables y otras no germinarán en la superficie de las plantas a causa de las condiciones microambientales locales; por último, muchas de las esporas que sí germinan no encontrarán estomas a través de los cuales puedan penetrar. En consecuencia, son escasas las probabilidades de que una determinada espora viable en realidad penetre en una planta y establezca una infección. Estas consideraciones vuelven obvio que no se puede hacer una recomendación definitiva aplicable a todas las situaciones; sin embargo, la experiencia sugiere, con condiciones razonablemente favorables y cinco inoculaciones, emplear unos 5 gramos de esporas por hectárea (diluidas en talco, aceite o agua) como cantidad mínima.

6.5 Técnicas para la reunión de urediosporas de roya

Existen varias formas de reunir esporas de la roya lineal, la roya de la hoja y la roya del tallo, para emplearlas en la inoculación artificial. A continuación se indican los métodos más eficaces:

- **Recolección de hojas secas:** Se quitan de las plantas hojas afectadas por la roya y se colocan en sobres de papel transparente; se prensan y se dejan secar. No se deben colocar más de seis a ocho hojas en cada sobre para que se sequen bien y con rapidez. Por lo general bastan 24 horas para un secado adecuado a la temperatura ambiente. Este método es particularmente útil para reunir muestras en el campo.
- **Recolección mediante golpecitos sobre las hojas:** Este método consiste en dar golpecitos sobre hojas muy afectadas por la roya mientras se les sostiene sobre un recipiente adecuado. De este modo se reúnen las esporas que pueden entonces conservarse en frascos. Este método se usa casi exclusivamente para reunir esporas de plantas cultivadas en invernadero.
- **Recolección con un extractor:** Usando extractores por aspiración (los hay de distintos tamaños) se pueden reunir con gran facilidad esporas de la roya tanto en el campo como en el invernadero. Cantidades grandes de urediosporas deben dejarse secar antes de ser almacenadas.

Al reunir material con cualquier método, debe ser adecuadamente etiquetado y catalogado para que sea fácil identificarlo cuando se necesite para la inoculación.

6.6 Almacenamiento de urediosporas de roya

Como ya se mencionó, la viabilidad de las esporas de roya es un factor muy importante que determina la cantidad de inóculo requerida para que se establezca adecuadamente la epifitía. Las urediosporas reunidas recientemente por lo general tienen un porcentaje de germinación

elevado, que disminuye con el tiempo, cualesquiera que sean las condiciones ambientales; no obstante, la tasa de pérdida de viabilidad varía considerablemente según las condiciones de almacenamiento y las esporas pueden seguir siendo viables por períodos de hasta un año cuando el medio es adecuado.

De los cuatro factores principales que influyen sobre la viabilidad de las urediosporas, temperatura, humedad, luz y oxígeno en la atmósfera, los dos primeros son los más importantes. El mantenimiento de temperaturas y grados de humedad suficientemente bajos es primordial en el almacenamiento de las esporas ya que, por ser unicelulares, son en extremo sensibles a las condiciones ambientales. En los cuadros 6.1 y 6.2 se presentan ejemplos de los efectos de la temperatura y la humedad sobre la duración del período de viabilidad de esporas almacenadas de la roya lineal y la roya del tallo.

Métodos de almacenamiento. Tal vez el método más sencillo para conservar las urediosporas sea reducir su contenido de humedad aproximadamente un 10% y mantenerlas a una temperatura de 2 a 4 °C. Esto permite conservar su viabilidad de tres a seis meses. En climas secos, se pueden secar las esporas al aire durante 24 a 36 horas; en zonas más húmedas quizá sea necesario usar un desecador (con

cloruro de calcio o gel de sílice como sustancia desecante). Las esporas reunidas recientemente no se secan adecuadamente a menos que se esparzan en forma rala sobre un plato, una hoja de papel de aluminio o una caja de Petri. También es preferible que el secado se cumpla en el laboratorio, lejos de la luz solar directa. Después de la desecación, es preciso colocar las esporas en un frasco o botella sellados (en muchos casos parecen ser mejores los recipientes oscuros), que se almacenan a la temperatura adecuada y en la oscuridad en un refrigerador. Se deben tomar precauciones para evitar una desecación excesiva, ya que suele ser nociva para la viabilidad de las esporas (cuadro 6.2).

Si se dispone del equipo necesario, un método de almacenamiento más eficaz consiste en efectuar la rarefacción dentro del recipiente de

Cuadro 6.1. Efectos de la temperatura sobre el tiempo que pueden permanecer almacenadas al vacío sin perder viabilidad las esporas de la roya lineal.

Temperatura (°C)	Días de almacenamiento
0	433
5	179
15	50

Cuadro 6.2. Efectos de la humedad relativa y la temperatura sobre el tiempo que pueden permanecer almacenadas sin perder viabilidad las esporas de la roya del tallo.

Humedad relativa (°/o)	Tiempo (días)			
	5°C	10°C	15°C	20°C
90	7	7	7	7
81	14	14	7	7
70	112	112	14	7
61	112	98	98	7
49	112	112	105	7
38	105	98	98	7
30	28	21	7	7
22	28	14	7	7
11	7	7	7	7

almacenaje para eliminar el oxígeno atmosférico y, de ese modo, reducir la respiración de las esporas. Para esto se puede usar un sistema de vacío elevado o parcial. Con un sistema de vacío parcial, se deben esparcir las esporas con uniformidad y en forma rala en una caja de Petri, que luego se coloca en un desecador con dispositivos para la rarefacción y el sellado. Se emplea una pequeña bomba de aire para crear el vacío y luego se sella el desecador y se coloca en un refrigerador a oscuras y a una temperatura de 2 a 4 °C. En estas condiciones, se puede duplicar el período de almacenamiento sin que se pierda viabilidad.

Si se usa un sistema de vacío elevado, se deben almacenar las esporas en tubos estrechos de pyrex (con un diámetro de 5 a 22 milímetros). En cada tubo se pueden almacenar unos 5 miligramos de inóculo. Se reduce la presión atmosférica a aproximadamente 0.1 milímetros de mercurio (manómetro de McLeod) o 0.1 torr (manómetro de Edwards Speclivar) y se sellan los tubos usando un mechero de gas. Es preciso tener cuidado de no calentar los tubos de vidrio en partes cercanas a las esporas. Estas seguirán siendo viables durante varios años si se almacenan a una temperatura de 2 a 4 °C.

Las esporas desecadas o deshidratadas al vacío por lo general germinan en forma deficiente a menos que se las rehidrate antes de la inoculación. En consecuencia, comúnmente se colocan las esporas en una cámara húmeda por un lapso de 12 a 24 horas antes de la inoculación, para que se produzca la rehidratación adecuada. En el cuadro 6.3 se muestran los efectos de la rehidratación.

Es posible conservar las esporas durante períodos prolongados colocándolas en frascos de vidrio de alta calidad o en láminas de polietileno, que se almacenan en un refrigerador de nitrógeno líquido (-196 °C). La temperatura ultrabaja induce un estado de latencia en las urediosporas. Se logra que vuelvan a tener una capacidad elevada de germinación mediante el

descongelamiento o el choque térmico en agua a una temperatura de 40 a 45 °C durante 2 a 5 minutos.

Síntesis de los pasos importantes del almacenamiento de esporas:

- 1) Use esporas reunidas recientemente.
- 2) Establezca el porcentaje de germinación mediante experimentos.
- 3) Almacene las esporas usando uno de los métodos siguientes:
 - a) Déjelas secar al aire durante 24 a 48 horas, colóquelas en un frasco que se sella y refrigérelo a una temperatura de 2 a 4 °C, o de -196 °C en un refrigerador de nitrógeno líquido; o
 - b) colóquelas en un desecador con cloruro de calcio o gel de sílice en cajas de Petri o, si se dejan secar al aire, en frascos abiertos; selle el desecador y almacénelo a una temperatura de 2 a 4 °C; o
 - c) coloque las esporas en un desecador con robinete para hacer el vacío y efectúe una rarefacción parcial con una pequeña bomba de aire o aspirador de agua; selle y almacene a una temperatura de 2 a 4 °C; o
 - d) coloque 5 miligramos de esporas en un tubo de pyrex, tape la abertura con algodón y conéctela al colector de una bomba para vacío; haga

funcionar la bomba hasta obtener la presión deseada; selle el tubo con un soplete de gas, tomando precauciones para no calentar las esporas, y almacénelo en un refrigerador a una temperatura de 2 a 4 °C.

- 4) Antes de usar las esporas, rehidrátelas o sométalas al choque térmico (si se han almacenado en nitrógeno líquido).

6.7 Técnicas para multiplicar el inóculo de roya

La reunión de esporas de roya sobre el terreno probablemente no sea siempre suficiente, ya sea en cuanto a volumen o a las proporciones relativas de los distintos biotipos. Tal vez la mejor forma de garantizar tanto la cantidad como la calidad de las esporas sea complementar el inóculo reunido sobre el terreno con esporas multiplicadas artificialmente. Se han elaborado diversas técnicas que permiten lograr esto en una escala suficientemente grande.

Métodos con plántulas:

- *Sin tratamiento especial:*
Tradicionalmente se ha multiplicado el inóculo de roya en plantas cultivadas en macetas de barro de 10 centímetros, en el invernadero. En cada maceta se cultivan entre 15 y 20 plantas que se inoculan al llegar al estadio de la primera hoja. Se recoge el inóculo cuando la esporulación llega a su grado máximo, por lo general después de 10 a 14 días en condiciones óptimas. Sin embargo, con este método se ocupa demasiado

Cuadro 6.3. Efectos de la rehidratación sobre la germinación de urediosporas de roya desecadas al aire y al vacío.

Tipo de almace- namiento	Duración del almacenamiento (semanas)	Porcentaje de germinación		
		Antes del almacenamiento	Deshidratadas	Después de 24 h de rehidratación
Desecadas al aire	42	72	4	21
Al vacío	62	72	4	60

espacio de invernadero y rara vez se obtiene inóculo suficiente para el empleo en el campo.

Un método de multiplicación que tal vez sea más eficaz consiste en cultivar las plántulas en bandejas metálicas rectangulares, en lugar de usar macetas de barro. En cada bandeja de 25 x 10 centímetros se pueden cultivar más de 150 plántulas; es entonces posible obtener un número cuatro veces mayor por unidad de superficie del invernadero. Además, se facilitan considerablemente las operaciones de siembra y reunión de inóculo. No obstante, también este método resulta útil sólo cuando se requieren cantidades pequeñas de inóculo.

Con hidrazida maleica: La hidrazida maleica es eficaz para intensificar la multiplicación de *Puccinia graminis*, *P. recondita*, *P. striiformis* y *P. hordei* en las plántulas. Se aplica al suelo una solución acuosa de hidrazida maleica (40 a 100 partes por millón) cuando comienza a surgir del coleoptilo la hoja primaria. Se ha comprobado que la respuesta del crecimiento de las plántulas a las aplicaciones con esta sustancia química (supresión de la segunda y tercera hojas y pigmentación foliar más oscura) se relaciona tan estrechamente con el grado de esporulación del organismo patógeno que las plantas tratadas producen entre tres y cinco veces más inóculo que las no sometidas al tratamiento. Al impedir el desarrollo de otras hojas, la hidrazida maleica prolonga la vida de la primera hoja (y también de las infecciones por la roya) y además simplifica los procedimientos de recolección.

Se ha encontrado que este método es particularmente útil para la multiplicación de inóculo del núcleo o para mantener cultivos de espora única de una raza o biotipo.

Cultivo en hojas sueltas: Se puede ahorrar un espacio considerable en el invernadero

con este método, pero se necesitan instalaciones de laboratorio. El procedimiento consiste básicamente en inocular las plántulas como en los casos anteriores y luego quitar las hojas cuando muestren los primeros signos de infección (moteado). Se cortan las puntas de las hojas y se colocan en una solución de sacarosa (1 gramo por mililitro) y quinetina (40 partes por millón) y/o benzimidazol (50 partes por millón). Los cultivos de hojas se conservan en el laboratorio o en una cámara de crecimiento. Después de unos días comienza la esporulación y se pueden efectuar varias recolecciones de esporas de cada grupo de hojas si se mantienen con cuidado los cultivos. Con este método es posible conservar y cultivar distintas razas en aislamiento para mantener su pureza.

Métodos con plantas adultas:

Se ha comprobado que la obtención de inóculo en plantas adultas sensibles es considerablemente más rápida y eficaz que el empleo de plántulas. Las plantas adultas se cultivan en macetas de 25 centímetros (cada maceta puede contener nueve plantas o aproximadamente 30 vástagos) y se inoculan en la etapa de macollamiento o en la de embuchamiento. Se conservan las macetas en un invernadero y se reúne periódicamente el inóculo usando un colector grande. De este modo se pueden obtener uno o dos gramos de esporas de cada maceta bien mantenida.

A causa de los elevados costos de capital y mantenimiento, el espacio de invernadero a menudo es el factor limitante en la producción de las grandes cantidades de inóculo necesarias para los viveros de selección. Se ha comprobado en estudios que, en lugar de invernaderos, se pueden usar eficazmente casas de material plástico, más baratas, siempre que la ventilación sea adecuada. En consecuencia, es posible multiplicar el inóculo de roya aun cuando en

cierta medida se carezca de instalaciones físicas para las investigaciones.

6.8 Reunión, almacenamiento y multiplicación de inóculo de otras enfermedades de los cereales

Mildiú polvoriento del trigo y la cebada. Se deben recoger las esporas en las plantas infectadas ya avanzada la estación, después de que se hayan desarrollado en el micelio de la superficie los corpúsculos negros en estado latente. El material reunido debe entonces secarse bien y almacenarse a baja temperatura (2 a 4 °C) en el laboratorio. En estas condiciones se puede conservar el inóculo en estado viable para ser usado en la próxima estación.

También es posible multiplicar el inóculo del mildiú polvoriento en cultivos en el laboratorio usando el método de las hojas sueltas. Esto permite identificar las razas patógenas y combinar pequeñas cantidades de inóculo.

Enfermedades provocadas por *Helminthosporium* y *Rhynchosporium*.

Las plantas infectadas con mancha reticulada, tizón foliar, mancha foliar, mancha estriada o escaldadura deben ser reunidas, desecadas durante 24 a 48 horas y almacenadas a bajas temperaturas para que proporcionen inóculo para la siguiente estación.

Como estos hongos son saprófitos, también pueden conservarse y multiplicarse en medios naturales o específicos. De este modo, es posible purificar y aumentar el inóculo cuando sea necesario.

Enfermedades provocadas por *Septoria*. Todos los organismos que provocan las enfermedades del trigo y la cebada causadas por *Septoria* (incluyendo el tizón foliar, el tizón de la gluma y la mancha foliar causada por *Septoria*) pueden reunirse de las plantas infectadas y almacenarse secos a bajas temperaturas, al igual que el mildiú polvoriento.

Los organismos patógenos de este género pueden también cultivarse y multiplicarse en medios artificiales (por ejemplo, en agar de dextrosa de papas).

Carbón cubierto del trigo, carbón cubierto de la cebada y carbón de bandera. Todas estas enfermedades se caracterizan por las esporas patógenas de vida prolongada. En consecuencia, el material infectado reunido en las plantas puede conservarse sin refrigeración por un período de hasta un año. No obstante, para un almacenamiento más prolongado se requiere refrigeración.

Carbón volador del trigo y la cebada. En contraste con los otros carbonos, las esporas del carbón volador son viables a temperaturas normales sólo durante un período breve. Por consiguiente, son necesarios métodos de almacenamiento al vacío o refrigeración para conservar el inóculo.

Tizón bacteriano de la cebada. En el caso de esta enfermedad son útiles los procedimientos de recolección, almacenamiento y multiplicación usados con el mildiú polvoriento.

Pudriciones del pie y la raíz. Como en el caso de las otras enfermedades, se reúne inóculo retirando material infectado. Sin embargo, los organismos patógenos que intervienen son casi exclusivamente saprófitos y, en consecuencia, deben conservarse y multiplicarse en medios artificiales.

6.9 Técnicas de inoculación de enfermedades causadas por la roya

En el invernadero. Las plantas que se van a inocular deben ser cultivadas en suelo adecuado, con buenas condiciones de luz, a temperaturas apropiadas y en un medio exento de royas. Es conveniente usar semillas y suelo tratados para reducir el peligro de pudriciones de la raíz. Se puede efectuar la inoculación cuando las plantas tienen entre 5 y 10 centímetros de altura.

Antes de inocular las superficies, es preciso frotar suavemente las hojas con el dedo humedecido o rociar con un agente humectante (por ejemplo, Tween 20). Esto ayuda a eliminar la cubierta de cera de las hojas y será entonces mayor el número de esporas que puedan adherirse a ellas. Además, se deben rociar las hojas con agua destilada antes y después de la inoculación y colocarlas luego en un ambiente húmedo durante 24 a 48 horas, para lograr las condiciones de humedad que favorecen la infección.

Se puede aplicar el inóculo en una de las formas siguientes:

- **Con espátula o aguja lanceta:** Se retiran las esporas de las pústulas o los recipientes de almacenamiento con una espátula o aguja húmedas, que luego se pasa suavemente sobre la superficie foliar de las plantas receptoras, distribuyendo con uniformidad el inóculo. Este método es particularmente adecuado cuando es escaso el inóculo o se hacen inoculaciones con esporas de distintos tipos de pústulas para provocar una infección combinada.
- **Con un palillo:** Otro método preciso de inoculación (también conveniente cuando es escaso el inóculo) consiste en usar un palillo con un extremo envuelto en un poco de algodón. Se recogen las esporas en el algodón seco, se agrega una gotita de agua o aceite mineral ligero y a continuación se pasa con suavidad el algodón sobre la superficie foliar de las plántulas receptoras.
- **Mediante el frotado con los dedos:** Los dedos pueden también usarse en forma similar para transferir inóculo.
- **Con un pincel fino:** Se recogen las esporas solas o mezcladas con talco (si sólo se dispone de pequeñas cantidades de inóculo) con un pincel fino de pelo de camello y se espolvorean sobre las plántulas receptoras secas, o se distribuyen directamente sobre las hojas con el pincel.

- **Mediante el cepillado de macetas:** Este método es conveniente para inocular grandes cantidades de plantas cuando es abundante el inóculo disponible. Se sostiene una planta afectada por la roya sobre un grupo de plantas receptoras y se sacude ligeramente para producir una lluvia uniforme de esporas. Luego se pasa con suavidad la planta con roya sobre la superficie de las plantas receptoras para asegurar una distribución adecuada de esporas.

- **Mediante un inoculador múltiple:** El inoculador múltiple fue ideado por M. B. Moore en la Universidad de Minnesota (Browder, 1972). Consiste en una lámina metálica unida a la lengüeta de una gran abrazadera de resorte (del tipo de los sujetapapeles grandes usados en las oficinas) en la que hay varias "uña", cada una con el extremo recubierto de esponjitas de hule espuma. Las esponjitas se empapan con las suspensiones de esporas (en agua o aceite mineral) y luego se oprimen con cuidado contra la superficie foliar. De este modo es posible inocular con bastante rapidez cada hoja con distintas razas o especies del hongo patógeno.

- **Con un extractor-espolvoreador:** Los extractores- espolvoreadores pequeños han resultado muy útiles cuando es escaso el inóculo disponible. Se llena con 0.5 gramos de talco un extractor de vidrio (de unos 8 cm de largo y 2 cm de diámetro) y con él se aspiran las esporas. Se agregan 0.5 gramos de talco adicionales y se mezcla bien el contenido. Luego se espolvorea la mezcla sobre las plantas receptoras invirtiendo la corriente de aire del extractor.

- **Con un atomizador:** Se prepara una suspensión de las esporas con agua (con una pequeña cantidad de agente surfactante) o con aceite mineral ligero, y luego se rocían las plantas con la suspensión usando un

atomizador. Es preciso tener cuidado al usar aceite como medio de suspensión ya que el exceso de aceite sobre la superficie foliar tiende a interferir en la germinación de las esporas. Por otra parte, las plántulas de algunos cultivos, como la cebada, son algo sensibles a los aceites minerales.

En el campo. Los métodos de inoculación en el campo son algo diferentes de los descritos antes ya que el propósito es crear epifitias que afecten a miles de plantas en un área extensa. Además, no es posible controlar las condiciones ambientales.

- **Espolvoreado:** Uno de los métodos más sencillos y eficaces para inocular grandes cantidades de plantas en el campo es el empleo de una mezcla de talco y esporas. La proporción de esporas y talco depende de factores tales como la cobertura eficaz, la cantidad de inóculo disponible y el área que se va a inocular. Hay diversos tipos y tamaños de espolvoreadores para aplicar inóculo de esta manera. Los espolvoreadores manuales pequeños pueden ser suficientes si sólo es necesario inocular hileras limítrofes; los dispositivos eléctricos son más adecuados cuando es grande el área que se desea inocular.

Siempre se debe efectuar el espolvoreado en la noche, preferiblemente justo antes de que se forme el rocío y cuando no hay viento. Con esto son mayores las probabilidades de lograr grados elevados de infección.

- **Inyección:** Este tal vez sea el método de inoculación más fiable en climas secos, donde son grandes las probabilidades de que se dessequen las esporas de la superficie a causa de las condiciones ambientales adversas. Con una jeringa hipodérmica se inyecta en las vainas foliares una suspensión de esporas en agua a la que se

ha agregado un agente surfactante, ya sea a fines de la etapa de macollamiento o de la de alargamiento del tallo. Se ha comprobado que con este procedimiento se logra un buen establecimiento de la enfermedad. No obstante, toma mucho tiempo y por lo general se usa sólo en las hileras limítrofes, ya que puede resultar imposible inocular grandes cantidades de plantas cuando es limitado el tiempo disponible. Gracias a las jeringas automáticas, este método se ha vuelto más eficaz.

- **Inoculación con aceite:** Rowell y Hayden (1956) demostraron que es factible inocular parcelas con esporas de roya contenidas en aceites no fitotóxicos. Usaron Mobilsol 100, un aceite isoparafínico para rociado, y una concentración de esporas de 6 gramos por cada 10 litros para cada hectárea. La aplicación se efectuó con un rociador portátil con una capacidad de dos galones y una boquilla para bajos volúmenes (Teejet No. 730039), que se carga sobre las espaldas. De este modo fue posible completar la inoculación de una parcela de 0.1 hectáreas en sólo 30 minutos. También se puede usar un rociador eléctrico para volúmenes ultrabajos alimentado por una batería. Como las esporas se dispersan con facilidad y uniformidad en el aceite, es posible emplear una concentración de esporas relativamente escasa y obtener una buena cobertura. Se ha comprobado que este método es eficaz y su sencillez lo vuelve muy conveniente cuando son necesarias inoculaciones en gran escala.
- **Plantar material infectado:** Cuando se inoculan las hileras limítrofes o propagadoras en lugar de todo el vivero, es posible transplantar material previamente infectado en un invernadero a esas hileras. En este caso es fundamental proporcionar riego adecuado después del trasplante para

asegurar que las plantas se establezcan bien. Se han obtenido buenos resultados con este método ya que las fuentes de infección producen esporas con rapidez y sobreviven durante tres o cuatro semanas suministrando inóculo continuamente.

6.10 Técnicas de inoculación para otras enfermedades de los cereales

Enfermedades foliares. Se pueden crear con éxito epifitias de la mayoría de las enfermedades foliares con el sencillo procedimiento de picar en trocitos material recogido previamente de las plantas y esparcirlo por todo el vivero. Se deben sincronizar las inoculaciones de este tipo con condiciones ambientales que favorezcan la infección (que son diferentes según los organismos patógenos) y efectuarlas en varias ocasiones si se desea lograr una tasa elevada de infección.

Otras enfermedades requieren una inoculación más específica, particularmente las transmitidas por el suelo y las que necesitan la multiplicación artificial antes de la inoculación.

- **Carbón de bandera:** Es una enfermedad transmitida por el suelo y las epifitias se crean estableciendo una "parcela enferma". Esto se logra cultivando una variedad sensible en la misma parcela durante varios años y enterrando continuamente plantas enfermas para acumular inóculo natural. Luego se pueden sembrar en la parcela las variedades que se desea someter a prueba.

También se puede dar origen artificialmente a la enfermedad rociando el suelo de la parcela de prueba con esporas en suspensión en una proporción de 2 gramos por cada litro de agua para cada hilera de 5 metros. Se siembran entonces las variedades que se someten a prueba y se remueve el suelo para que se mezclen las semillas y las esporas.

- **Enfermedades provocadas por Helminthosporium:** Es bastante difícil aumentar la cantidad de inóculo de *Helminthosporium* en el laboratorio. No obstante, se ha elaborado una técnica para la multiplicación en semillas de trigo esterilizadas. El inóculo obtenido de este modo se aplica rociando una suspensión de esporas en agua con un agente humectante y un agente surfactante.

Enfermedades de la espiga: Estas enfermedades requieren condiciones considerablemente más específicas para que se establezca la infección que aquellas que afectan a las hojas. Por consiguiente, ha sido necesario idear una serie de técnicas específicas de inoculación para crear epifitias.

- **Carbón volador:** Desde que Maddox (1895) demostró por primera vez que se podía producir esta enfermedad espolvoreando florecillas de trigo con esporas de *Ustilago nuda* f. sp. *triticia*, se ha elaborado toda una serie de métodos de inoculación. Enseguida se describen los más comunes:
 - a) **Método del vacío parcial.** Moore (1936) ideó un aparato con el que se podían someter individualmente las espigas de cereales a un vacío parcial mientras estaban sumergidas por completo en una suspensión acuosa de esporas de carbón volador. Con este aparato se pueden inocular hasta 30 espigas por hora. El dispositivo crea e interrumpe alternadamente un vacío parcial alrededor de la espiga haciendo que el aire del interior de las florecillas sea reemplazado por la suspensión de esporas. Este método también puede usarse para inocular el carbón parcial.

b) **Inyección.** Con una jeringa hipodérmica, se inyecta en las dos florecillas principales de cada espiguilla una suspensión de esporas obtenida mezclando las esporas de una espiga infectada con 100 mililitros de agua y un gramo de dextrosa. Hay que tener mucho cuidado de no lesionar el ovario en desarrollo.

c) **Método de la aguja.** Es posible expeler (en bocanadas) las esporas secas sobre los estigmas de los ovarios en desarrollo usando una aguja hipodérmica unida a un recipiente con una perilla de hule (goma). Cuando se usa este procedimiento de inoculación, es preciso tamizar bien las esporas antes para eliminar material que pudiera tapar la aguja. Nuevamente es necesario evitar lesionar los ovarios.

d) **Empleo de pinzas.** En este método se usan pinzas afiladas para recoger las esporas, luego perforar la florecilla en desarrollo y depositar las esporas sobre el estigma.

e) **Método del retorcido en seco.** Se recortan las espigas que se van a inocular de manera similar a la usada cuando se prepara una espiga para que sea fuente de polen al efectuar un cruzamiento. Se coloca entonces la espiga en una bolsa de papel transparente (*glassine*) para polinización. Al llegar el momento de la inoculación, se abre un extremo de la bolsa y se introduce en ella una espiga con carbón; se retuerce esta espiga para desalojar las esporas, se retira la espiga y se cierra la bolsa. Se pone entonces una etiqueta o rótulo con la fecha de inoculación y otros datos pertinentes.

Entre todos estos métodos se ha comprobado que los que usan esporas secas son generalmente mejores que aquellos que emplean una suspensión. El método de la aguja tal vez sea el más fácil de aplicar y, por lo tanto, el más eficaz. No obstante, también se han obtenido muy buenos resultados con el método del vacío parcial.

- **Carbón parcial:** El método del vacío ideado por Moore se puede usar para inocular plantas de trigo con este organismo patógeno. Sin embargo, en experimentos recientes efectuados en el CIMMYT se ha comprobado que la inyección de una suspensión de esporidias secundarias en agua, aplicada en el embuchamiento, es una forma de inoculación mucho más eficaz. Otra alternativa, que es la técnica más eficaz siempre que se puedan mantener grados muy elevados de humedad relativa durante no menos de 12 horas, consiste en un rociado con una suspensión acuosa de esporidias primarias y secundarias. El momento para llevar a cabo el rociado inoculador en las plantas de trigo es entre el espigamiento y la floración.

- **Carbón apestoso o cubierto:** Los organismos patógenos de esta enfermedad son transportados en la cubierta externa de las semillas e infectan los cereales durante la germinación. En consecuencia, la inoculación se logra mezclando esporas con las semillas antes de la siembra en una proporción de aproximadamente 0.5 a 1% del peso de las semillas.

Bibliografía

- Browder, L.E. 1972. A multi-culture inoculation system for host-parasite relationships. *Plant Dis. Reporter* 56:847-849.
- Chester, K.S. 1946. The Nature and Prevention of Cereal Rusts as Exemplified in the Leaf Rust of Wheat. Waltham, Massachusetts, EUA: The Chronica Botanica Co.
- Hassebrauk, K. y J. Schroeder. 1966. Studies on the germination of yellow rust urediospores. pp. 12-18 in R.C.F. Macer y M.S. Wolfe, eds. *Cereal Rust Conferences, 1964*, Cambridge. Cambridge, Inglaterra: Instituto de Mejoramiento Vegetal.
- Hogg, W.H., C.E. Hounam, A.K. Malik y J.C. Zadoks. 1969. Meteorological factors affecting the epidemiology of wheat rusts. *Org. Meteorológica Mundial Nota Tech. No. 99*.
- Isaac, E. 1970. *Geography of Domestication*. Nueva York: Prentice Hall, Inc.
- James, W.C. 1971. An illustrated series of assessment keys for plant diseases: their preparation and usage. *Canad. Pl. Dis. Survey* 51:39-65.
- Loegering, W.Q., C.O. Johnston y J.W. Hendrix. 1967. Wheat rusts. pp. 307-335 in K.S. Quisenberry y L.P. Reitz, eds. *Wheat and Wheat Improvement*. Madison, Wisconsin, EUA: Sociedad Norteamericana de Agronomía.
- Maddox, F. 1895. *Experiments at East Field: smut, bunt, rust*. Tasmania: Informe del Departamento de Agricultura.
- Martin, J.H., W.H. Leonard y D.L. Stamp. 1976. *Principles of Field Crop Production*. Nueva York: McMillan Publ. Co.
- Mathre, D.E., editor. 1982. *Compendium of Barley Diseases*. St. Paul, Minnesota, EUA: Sociedad Norteamericana de Fitopatología.
- McNeal, E.H., C.S. Konzak, E.P. Smith, W.S. Tate y T.S. Russell. 1971. A uniform system for recording and processing cereal research data. *Agricultural Research Service Publ. ARS 34-121*. Washington, D.C: Departamento de Agricultura de EUA.
- Moore, M.B. 1936. A partial-vacuum method for the inoculation of wheat and barley with loose smuts. (Resumen). *Phytopathology* 26:103.
- Peterson, R.F., A.B. Campbell y A.E. Hannah. 1948. A diagrammatic scale for estimating rust intensity on leaves and stems of cereals. *Canad. J. Res. C-26*: 496-500.
- Prabhu, A.S. y J.R. Wallin. 1971. Cyclical variations in spore production by *Puccinia graminis tritici* (Pers.) Erikss. and Henn. (Resumen. p. 45 in *Proceedings of a Symposium on Epidemiology, Forecasting and Control of Plant Diseases*. Nueva Delhi, India: Academia Nacional de Ciencias de la India.
- Rowell, J.B. 1984. Controlled infection of *Puccinia graminis* f.sp. *tritici* under artificial conditions. pp. 292-332 in W.R. Bushnell and A.P. Roelfs, eds. *The Cereal Rusts*. Vol. 1. Nueva York: Academic Press.
- Rowell, J.B. y E.B. Hayden. 1956. Mineral oils as carriers of urediospores of the stem rust fungus for inoculating field grown wheat. *Phytopathology* 46:267-268.
- Saari, E.E. y J.M. Prescott. 1975. A scale for appraising the foliar intensity of wheat diseases. *Plant. Dis. Reporter* 59:377-380.
- Sharp, E.L. 1964. Some effects of environment on the infection process of *Puccinia striiformis* West. Pp. 32-38 in R.F.C. Macer y M.S. Wolfe, eds. *Cereal Rust Conferences 1964*, Cambridge. Cambridge, Inglaterra: Instituto de Mejoramiento Vegetal.
- Stakman, E.C., D.M. Stewart y W.Q. Loegering. 1962. Identification of physiologic races of *Puccinia graminis* var. *tritici*. *Agricultural Research Service Tech. Bull. No. E-617*. Washington, D.C: Depto. de Agricultura de EUA.
- Staples, R. y V. Macke. 1984. Germination of urediospores and differentiation of infection structures. pp. 225-229 in W.R. Bushnell and A.P. Roelfs, eds. *The Cereal Rusts*. Vol. 1. Nueva York: Academic Press.
- Togashi, K. 1949. *Biological Characters of Plant Pathogens—Temperature Relations*. Tokio: Meibundo.
- Tottman, D.R. y R.J. Makepeace. 1979. An explanation of the decimal code for the growth stages of cereals, with illustrations. *Ann. Appl. Biol.* 93:221-234.
- Wiese, M.V., editor. 1977. *Compendium of Wheat Diseases*. St. Paul, Minnesota, EUA: Sociedad Norteamericana de Fitopatología.
- Zadoks, J.C., T.T. Chang y C.F. Konzak. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research* 14:415-421.
- Zillinsky, F.J. 1983. *Guía para la Identificación de Enfermedades en Cereales de Grano Pequeño*. México, D.F., México: Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT).

Apéndice 1. Características de las enfermedades del trigo

Las enfermedades representan una de las limitaciones más graves al aumento y estabilización de la producción de trigo en todo el mundo. En consecuencia, es muy importante que todo programa orientado a mejorar la producción y estabilidad de este cultivo reciba con regularidad el aporte de sólidas investigaciones fitopatológicas. A su vez, un aporte pertinente y funcional de la fitopatología debe basarse en la detección e identificación rápidas y precisas de enfermedades en el campo para que sea posible iniciar las actividades de investigación necesarias.

A1.1 Enfermedades causadas por hongos

Roya del tallo. La roya del tallo del trigo, también llamada roya negra, tiene una distribución universal y se encuentra en todos los sitios donde hay trigo, cultivos afines al mismo y otras gramíneas. De las numerosas enfermedades que infectan al trigo, la roya del tallo es sin duda la más devastadora en potencia. La enfermedad, causada por *Puccinia graminis* f. sp. *tritici*, se caracteriza por la aparición de pústulas de color café rojizo, que se presentan primero como pequeñas manchas cloróticas sobre todas las partes de la planta: hojas, vainas foliares, tallos y espigas. Las infecciones graves causan una considerable pérdida del rendimiento, principalmente por la reducción del número de granos y el arrugamiento de éstos.

Roya de la hoja. Esta enfermedad también se conoce comúnmente como roya café o naranja y, al igual que la roya del tallo, tiene una distribución universal. Es causada por *Puccinia recondita* y se caracteriza por pequeñas pústulas de color café rojizo circulares u ovaladas que se presentan aisladas, principalmente en las hojas. No obstante, en ciertas condiciones ambientales se pueden encontrar pústulas también en las barbas, glumas y vainas foliares. Si bien se observa escaso arrugamiento de los granos, puede ser muy grande la pérdida de rendimiento como consecuencia de la disminución del número y tamaño de los granos. Se ha comprobado que algunas razas atacan la cebada.

Roya lineal. Esta enfermedad, también llamada roya amarilla, es causada por el hongo *Puccinia striiformis* y se encuentra en muchas regiones del mundo. Sin embargo, a diferencia de las otras enfermedades provocadas por la roya, generalmente se presenta sólo en las partes más elevadas y frescas y en las latitudes más altas. El síntoma característico de la roya lineal es la disposición lineal (en estrías) de las pústulas amarillas sobre las hojas de la planta huésped. Todas las partes aéreas de la planta, con la posible excepción de los tallos, están expuestas a la infección.

La infección afecta el rendimiento y calidad del trigo ya que reduce el número de espigas por planta, el número de granos por espiga y el tamaño y peso de los granos. La infección intensa provoca un gran arrugamiento de los granos y menor desarrollo de las raíces.

Mancha foliar causada por *Septoria tritici*. Esta enfermedad provocada por el hongo *Mycosphaerella graminicola* (*Septoria tritici*) infecta periódicamente los cultivos de trigo en todo el mundo. Las infecciones iniciales normalmente afectan sólo a las hojas más bajas y se presentan como manchas ligeramente cloróticas de color verde claro, por lo general entre las nervaduras foliares. A medida que se desarrolla la enfermedad, las lesiones se vuelven necróticas y de color café claro y adquieren el aspecto de motitas a medida que se forman los cuerpos de fructificación negros (picnidios) dentro de las lesiones. Cuando las infecciones son particularmente intensas, las lesiones se extienden y se unen, matando la planta por completo. Estas infecciones graves provocan la reducción del número y el tamaño de los granos y también pueden causar su arrugamiento.

Tizón de la gluma causado por *Septoria nodorum*. Se conoce más la forma imperfecta de esta enfermedad, provocada por *Septoria nodorum*; la forma perfecta o sexual es la que causa *Leptosphaeria nodorum*. Los síntomas se presentan típicamente en las glumas, con frecuencia en los nudos, hojas y vainas foliares y, en ocasiones, en

los tallos. Las lesiones son similares a las que provoca *Septoria tritici*, aunque algo más oscuras. La reducción del rendimiento causada por el tizón de la gluma es fundamentalmente consecuencia de la disminución del tamaño y peso de los granos, que puede también estar acompañada de arrugamiento.

Tizón de la avena causado por *Septoria avenae*. El hongo *Leptosphaeria avenaria* f. sp. *triticea*, comúnmente conocido en su forma imperfecta, *Septoria avenae* f. sp. *triticea*, es el organismo patógeno en el caso de esta enfermedad. Su presencia se restringe a América del Norte y del Sur; produce síntomas similares a los de otras enfermedades causadas por *Septoria* y, al igual que éstas, es necesario el examen microscópico para una identificación positiva.

Mildiú polvoriento. El agente etiológico de esta enfermedad, *Erysiphe graminis* f. sp. *tritici*, tiene una amplia distribución en las regiones de cultivo del trigo con clima húmedo y subhúmedo, y es favorecido por los inviernos moderados seguidos de primaveras y veranos frescos y nublados. Las lesiones, en forma de masas algodonosas y grisáceas sobre la superficie de la planta, se encuentran comúnmente en las hojas y también pueden presentarse en las vainas foliares y espigas. A medida que avanza la estación, se desarrollan los pequeños cuerpos sexuales negros (cleistotecios) en las masas algodonosas. Las infecciones intensas con mildiú polvoriento causan pérdidas del rendimiento como consecuencia de la reducción del tamaño de los granos, que puede ser particularmente severa cuando las infecciones son tempranas.

Tizón de la hoja. Esta enfermedad es causada por el hongo *Cochiobolus sativus* (*Helminthosporium sativum*) y está muy difundida en las regiones del mundo donde se cultiva el trigo.

Se puede encontrar la infección en todas las partes de la planta, como lo indican los nombres comunes que se le dan: pudrición de la raíz, pudrición de la corona, tizón de la

hoja, tizón de la espiga y punta negra del grano. El síntoma principal de la enfermedad (el tizón foliar) son las manchas café oscuro, cada una rodeada por un margen clorótico. A medida que progresa la enfermedad, las hojas se tornan completamente cafés y mueren; las infestaciones intensas pueden provocar la muerte de toda la planta.

Se ha señalado que varias otras especies de *Helminthosporium* atacan los cultivos de trigo en todo el mundo. De ellas, la que tiene una distribución más amplia y mayor importancia en el mundo en general parece ser *H. tritici-repentis* (*Pyrenophora trichostema*). Las enfermedades causadas por estos organismos patógenos tienen síntomas similares y, por consiguiente, se requiere el examen microscópico para una identificación precisa.

Roña de la hoja. Se ha informado la presencia de esta enfermedad, causada por *Alternaria triticina*, sólo en el subcontinente de la India. Se caracteriza por lesiones ovales irregulares, de color verde a gris, en las hojas. Las lesiones tienen márgenes verdes amarillentos y en las infecciones graves se unen, causando necrosis, la muerte de las hojas y, con el tiempo, de toda la planta.

Carbón de bandera. Si bien es grave sólo en ciertos lugares, el carbón de bandera, provocado por *Urocystis agropiri*, tiene una distribución mundial. En contraste con los otros carbones, las infecciones afectan sólo las hojas y tallos, donde se presentan como largas estrías de color gris a negro que contienen numerosas esporas negras. La infección causa enanismo y desarrollo deficiente de las hojas, tallos y espigas, y finalmente la muerte de la planta. Las pérdidas de rendimiento son consecuencia de la ausencia de espigas o, cuando se forman éstas, de la ausencia de granos.

Rayado provocado por *Cephalosporium*. Se encuentra esta enfermedad, causada por el hongo *Cephalosporium gramineum*, sólo en el trigo de invierno en América del Norte y en el noroeste de Europa. Los síntomas aparecen en primavera como una coloración amarillenta que, aproximadamente en la etapa de espigamiento, se transforma en estrías foliares cloróticas, acompañadas de una decoloración cafésosa del tejido vascular. Las plantas infectadas muestran un desarrollo deficiente y la mayoría muere prematuramente con espigas blancas o granos poco llenos.

Carbón volador. Esta enfermedad existe en todos los lugares donde se cultiva el trigo, pero es más frecuente en zonas húmedas, subhúmedas e irrigadas. Es causada por *Ustilago tritici* y afecta a las espigas. La infección se produce a través de las florecillas; las espigas infectadas aparecen antes que las sanas y las florecillas son reemplazadas en diversa medida por masas negras de esporas. La reducción del rendimiento es total ya que las espigas infectadas no producen granos.

Carbón apestoso o común. Esta enfermedad de distribución mundial se asocia con dos organismos patógenos principales, *Tilletia foetida* y *T. caries*. La infección se produce en la etapa de plántula y el hongo se desarrolla dentro de la planta, que tiene un color entre verde azulado y verde oscuro y un desarrollo ligeramente inferior al normal. La enfermedad se vuelve evidente en la etapa de espigamiento, cuando los granos son reemplazados por una estructura fungosa que se parece al grano pero contiene una masa de esporas negras y malolientes.

Carbón causante de enanismo. La distribución de esta enfermedad se restringe a las zonas productoras de trigo más frías, más elevadas o de mayor latitud. Es causada por *Tilletia controversa* y, como en el caso del carbón común, en las plantas infectadas las semillas son reemplazadas por estructuras fungosas que contienen numerosas esporas negras. Se distingue de los

otros carbones por el enanismo marcado que causa en las plantas en crecimiento.

Carbón parcial. Esta enfermedad, provocada por *Tilletia indica* (también llamado *Neovossia indica*), se encuentra fundamentalmente en el subcontinente de la India y en México, pero también puede presentarse, aunque con poca frecuencia, en otras importantes zonas productoras de trigo del mundo. En contraste con los otros carbones voladores y cubiertos, la infección se produce durante los períodos de espigamiento y floración y por lo general se limita a sólo unos granos en cada espiga, que pueden ser parcial o totalmente destruidos.

Roña. Esta enfermedad se asocia con varias especies del género *Fusarium* y se presenta predominantemente en las zonas de cultivo del trigo cálidas y húmedas. Las especies *F. graminearum* (*Gibberella zeae*), *F. culmorum* y *F. nivale* son comúnmente las causantes de la enfermedad, que hace que las espiguillas individuales, las florecillas o toda la espiga se vuelvan blancas. A menudo esto va acompañado de la producción de una maraña fungosa externa de color blanco o rosado sobre las superficies de las glumas y del desarrollo de grupos de pequeños cuerpos de fructificación negros. Las infecciones causan una gran reducción del peso de las semillas y el arrugamiento de los granos en los casos en que las plantas lleguen a producirlos. También la calidad del grano puede resultar seriamente afectada.

Ergot. Aunque se le considera de escasa importancia, el ergot, causado por el hongo *Claviceps purpurea* se presenta en ocasiones en regiones húmedas y subhúmedas del mundo. Las florecillas infectadas producen un exudado pegajoso, incoloro y de olor dulzón poco después de florecer. A medida que avanza la estación, se forman los "cuerpos del ergot" (esclerocios) de color negro azulado, que son más grandes que los granos de trigo y, por lo tanto, sobresalen de la florecilla infectada. Estos cuerpos del ergot son venenosos para el hombre y los animales.

Pudriciones comunes del pie o la raíz. Se ha asociado a distintos organismos patógenos con este complejo de enfermedades. Los más importantes son *Helminthosporium sativum*, que también causa mancha foliar y punta negra de la semilla, y *Fusarium culmorum* y *F. graminearum*, que producen además roña de la espiga. Este complejo de enfermedades tiene una distribución universal pero es más grave en las zonas más secas.

Las plántulas infectadas presentan manchas, así como también raíces e internudos bajo la corona café y podridos. En las plantas más maduras, la infección se manifiesta como una pudrición cortical cafésosa en las raíces, tejidos de los tallos basales y vainas foliares más bajas. Además, las plantas infectadas suelen tener un desarrollo deficiente o espigas blancas y poco llenas.

Las infecciones por *H. sativum* disminuyen el contenido proteínico del grano; esto, sumado a la producción de una toxina que interfiere en la utilización del nitrógeno, puede llevar a una mayor incidencia de "panza blanca".

Mal del pie. Esta enfermedad, causada por *Gaeumannomyces graminis* f. sp. *tritici* (antes llamado *Ophiobolus graminis*), tiene una distribución mundial. Si bien es fundamentalmente una enfermedad del trigo de invierno, también puede infectar los cultivos de primavera. Las plantas infectadas muestran un crecimiento deficiente y están decoloradas, con una coloración negra en la corona, las raíces de la corona y a menudo también en los tallos más bajos. El sistema radicular resulta gravemente reducido y podrido y por lo general las plantas mueren prematuramente. Si sobreviven y llegan a la madurez, las plantas infectadas comúnmente producen espigas vacías o con granos muy arrugados.

Pudrición del pie causada por *Cercospora*. Esta enfermedad, también conocida como mancha ocular o quiebra-paja, es provocada por el hongo *Pseudocercospora herpotrichoides* y se encuentra en la

mayoría de las regiones del mundo donde se produce trigo de invierno. Se caracteriza por la aparición de lesiones ovaladas o elípticas, generalmente con márgenes verdes cafésos opacos y a menudo con un punto oscuro en el centro, en las vainas foliares cercanas a la superficie del suelo. Cuando las infecciones son intensas, estas lesiones pueden unirse y debilitar el tallo a tal punto que se quiebra. La enfermedad también causa la producción de espigas blancas prematuras y/o vacías.

Mancha ocular muy nítida. Esta enfermedad tiene una distribución amplia en todo el mundo pero generalmente se la considera de importancia secundaria. En Australia, por ejemplo, causa una marcada disminución del crecimiento, rigidez y decoloración de las plántulas de trigo, que se conoce como "parche púrpura". Es causada por el hongo *Rhizoctonia solani* y se caracteriza por lesiones elípticas de color café claro con márgenes café oscuro en las vainas foliares basales.

Pudrición café de la raíz causada por *Pythium*. Esta enfermedad, provocada por un grupo de organismos patógenos del género *Pythium*, se presenta en casi todas las principales regiones del mundo donde se produce trigo. Causa lesiones definidas de color café y húmedas y áreas podridas en las raíces; las plantas infectadas se vuelven amarillentas, su crecimiento es inferior al normal, se reduce el macollamiento y se retrasa la maduración.

Mildiú veloso. Se asocia con el hongo *Sclerotinia macrospora* (*Sclerospora macrospora*) y tiene una amplia distribución dondequiera que se cultive el trigo. Sin embargo, es una enfermedad grave sólo en determinados lugares y por lo general es frecuente donde se han producido inundaciones durante los primeros estadios de desarrollo del cultivo. Las plantas muy infectadas muestran un macollamiento excesivo y enanismo, y no producen espigas. También pueden presentar partes rayadas, amarillentas, engrosadas o deformes. Como el micelio fungoso es

totalmente interno, rara vez existen síntomas visibles de mildiú como los que se manifiestan en las infecciones con mildiú polvoriento.

Moho blanco. Esta enfermedad es causada por varios hongos, de los cuales los más importantes son *Calonectria nivalis* (moho rosado provocado por *Fusarium nivale*) y *Typhula idahoensis* (moho blanco moteado). Si bien ocurre en todo el mundo, se considera que la enfermedad tiene una importancia secundaria.

Los mohos blancos tienen mayor prevalencia en zonas con inviernos rigurosos, donde se evidencian cuando desaparece la capa de nieve. En el caso del moho rosado, la enfermedad aparece a comienzos de la primavera y el abundante desarrollo de los hongos sobre la superficie del tejido afectado de la planta tiene un color rosado. Las infecciones por el hongo moteado se producen algo más tarde en la misma estación y se caracterizan por la presencia de numerosos esclerocios negros en el tejido mohoso. Los daños que causa la infección pueden ser graves en ciertas condiciones y fluctúan entre la pérdida completa y un escaso rendimiento de grano cuando las plantas logran recuperarse.

Punta negra. *Helminthosporium sativum*, junto con varias especies de *Fusarium* y *Alternaria*, especialmente *A. alternata*, son los principales agentes etiológicos de esta enfermedad, que existe en todo el mundo. Las infecciones se presentan como manchas irregulares negras o café en la cubierta externa del grano. Esas decoloraciones se concentran comúnmente cerca del extremo germinal, pero pueden encontrarse distribuidas sobre toda la cubierta de la semilla.

Las infecciones por *Helminthosporium sativum* provocan la germinación deficiente de las semillas, mala calidad de tallo, reducción del rendimiento y aumento de la pudrición de las raíces; las infecciones por *Alternaria* afectan poco o nada la viabilidad de las semillas.

A1.2 Enfermedades bacterianas

Pajilla negra. Si bien esta enfermedad, provocada por la bacteria *Xanthomonas campestris* pv. *translucens*, se presenta en las plantas de trigo en todo el mundo, por lo general produce sólo daños leves. Las infecciones se caracterizan por manchas de color café a negro púrpura sobre las gluma y sobre los tallos que están inmediatamente debajo de la espiga. Las infecciones intensas reducen el número de granos que se forman y pueden causar el arrugamiento de éstos.

Pudrición amarilla de la espiga. Esta enfermedad, también conocida como tizón bacteriano de la espiga, es provocada por *Corynebacterium tritici*. A menudo se la asocia con el nematodo del trigo *Anguina tritici* y se ha comunicado su presencia en una serie de zonas diferentes (por ejemplo, América del Norte, India y Paquistán). La infección da origen a la aparición de una escrescencia bacteriana amarilla y viscosa en la espiga en la etapa de embuchamiento y puede impedir que surja la espiga o causarle una marcada deformación. El daño resultante rara vez es extenso, pero puede causar una considerable reducción del rendimiento en determinados lugares.

Pudrición basal de la gluma. Esta enfermedad, provocada por la bacteria *Pseudomonas syringae* pv. *atropaciens*, ataca los cultivos de trigo en todo el mundo, especialmente cuando llueve mucho en el momento del espigamiento. Los extremos germinales de los granos infectados se ennegrecen en la punta y aparecen lesiones húmedas en las bases de las glumas. Rara vez se produce una pérdida grande del rendimiento.

A1.3 Virosis

Mosaico del trigo transmitido por el suelo. Esta enfermedad se presenta en América del Norte, Japón, Egipto, Turquía, Brasil, Italia y Argentina, favorecida por bajas temperaturas y días cortos, generalmente durante el otoño y el invierno o a comienzos de la primavera. Los síntomas varían según la cepa de virus y fluctúan entre las plántulas con hojas verdes

azuladas moteadas con blanco y las plantas afectadas por el enanismo, con macollamiento excesivo y hojas de color verde claro moteadas con amarillo. Si la infección es intensa y la prevalencia elevada, las pérdidas en los cultivos pueden superar el 50%. Este virus puede ser transmitido por el hongo *Pylymyxa graminis* y ataca al trigo, cebada, centeno y otras gramíneas.

Mosaico estriado americano del trigo. Esta enfermedad tiene una amplia distribución en América del Norte, Europa, Australia y el subcontinente de la India e infecta principalmente los trigos de invierno, aunque también puede atacar a los cultivos sembrados en primavera. Es transmitida por varias especies de chicharritas (*Endria* y *Elymana* spp.) y produce la aparición de estrías blancas amarillentas, angostas como hilos, a lo largo de las nervaduras foliares, manchas amarillentas y necróticas en las hojas, achaparramiento, reducción del tamaño de las espigas y arrugamiento de los granos. También infecta la cebada, la avena y otras gramíneas.

Mosaico estriado del trigo. Se encuentra esta enfermedad en el trigo de invierno y el trigo de primavera sembrado en invierno en América del Norte, Europa y varios países del Medio Oriente. Es transmitida por el ácaro *Aceria tulipae* y, según la cepa del virus, la variedad del huésped y las condiciones ambientales, da origen a estrías y moteados de un color que varía entre el verde claro (infecciones leves) y el amarillo clorótico (infecciones intensas). La mayoría de las plantas enfermas padecen achaparramiento, y si producen granos, generalmente están arrugados. La enfermedad afecta también a la cebada, la avena, el centeno, el maíz y varias otras gramíneas anuales.

Enanismo de Nariño. Esta enfermedad, transmitida por una chicharrita tropical (*Cicadullina pastusae*), es importante en América del Sur. La infección temprana produce el enanismo grave de la planta o incluso su muerte; las

infecciones tardías son menos graves, pero inhiben el desarrollo de las espigas y causan manchas cloróticas en las hojas. Es frecuente la enación.

Virus del enanismo amarillo de la cebada. Este virus, de distribución universal, es transmitido exclusivamente por áfidos. La infección temprana causa achaparramiento y enanismo, reducción del macollamiento, una variedad de coloraciones foliares que fluctúan entre el estriado clorótico y la clorosis foliar total, y disminución del tamaño y surgimiento de espigas. Las infecciones posteriores tienen menor efecto y sólo causan decoloración de las hojas y achaparramiento. La mayoría de los cereales y gramíneas son atacadas por esta enfermedad.

A1.4 Enfermedades causadas por nematodos

Quistes de la raíz. Los quistes de la raíz son causados por nematodos del género *Heterodera*, de los cuales *H. punctata* y *H. avenae* son importantes en el caso del trigo. Se ha informado que estos parásitos infestan los cultivos de cereales en todo el mundo y causan achaparramiento y algo de clorosis en las plantas afectadas. El examen de las raíces de esas plantas revela una ramificación excesiva y deformación por los numerosos quistes en forma de agallas.

Cóclea de la espiga. Esta enfermedad, causada por *Anguina tritici*, también conocido como nematodo de la espiga, tiene una incidencia escasa, pero su distribución es universal. Las plantas infestadas muestran achaparramiento y las hojas arrugadas, enroscadas o retorcidas (los síntomas son más marcados en las plantas jóvenes). Las espigas enfermas son más cortas y gruesas que las sanas y contienen agallas (con larvas del nematodo) en lugar de granos. En algunos casos, los síntomas de la infestación por nematodos del trigo se asemejan a los que causan el mildiú vellosa, el carbón cubierto o el daño provocado por el herbicida 2,4-D.

Apéndice 2. Características de las enfermedades de la cebada

Aunque las enfermedades son más bien un problema de producción en el caso del trigo, constituyen una amenaza cada vez más reconocida para la producción de cebada en todos los países del mundo excepto en los de clima seco. En consecuencia, adquiere gran importancia para lograr el aumento de la producción mundial de cebada el aporte sólido y bien estructurado de la fitopatología, basado en la identificación rápida y precisa de las enfermedades.

A2.1 Enfermedades causadas por hongos

Roya lineal. Esta enfermedad, provocada por *Puccinia striiformis* f. sp. *hordei*, tiene una importancia particular en los países del norte de Europa, el norte de Asia y América del Sur, y en la India, Paquistán, Nepal, Afganistán y zonas más elevadas de la península de Arabia. Al igual que la roya lineal del trigo, tiende a afectar sólo las zonas más altas y frescas de esos países y produce síntomas y efectos similares.

Roya de la hoja. Esta enfermedad es causada por *Puccinia hordei*; tiene una amplia distribución en los países del Mediterráneo y causa pérdidas del rendimiento particularmente serias en los países del norte de África y en Paquistán. La enfermedad se caracteriza por la aparición de pequeñas pústulas circulares de color café amarillento principalmente en las hojas o las vainas foliares. Más tarde se desarrollan pústulas teliales circulares u oblongas, de color café oscuro. Las pérdidas del rendimiento son fundamentalmente consecuencia de la reducción del número de granos y el arrugamiento de éstos.

Puccinia recondita f. sp. *tritici* también puede provocar infecciones de roya de la hoja con pústulas café rojizas, más oscuras.

Roya del tallo. La roya del tallo de la cebada puede ser causada por una serie de razas de *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* (roya del tallo del trigo) o *P. graminis* f. sp. *secalis* (roya del tallo del centeno), que son específicas para la cebada. Aunque existe en todas las zonas húmedas y subhúmedas del mundo, la roya del tallo no tiene una importancia

fundamental en la cebada, ya que no suele haber pérdidas serias gracias a la maduración temprana de las plantas.

Mildiú polvoriento. En contraste con la roya del tallo, esta enfermedad, causada por *Erysiphe graminis* f. sp. *hordei*, es de gran importancia dondequiera que se produzca la cebada. La humedad elevada favorece su desarrollo, pero la enfermedad causa pérdidas graves aun con poca lluvia, especialmente cuando el tiempo es fresco y nublado.

En general, los síntomas de esta enfermedad son similares a los que provoca el mildiú polvoriento del trigo. No obstante, ciertas combinaciones de razas del organismo patógeno causan la aparición de decoloraciones café claro u oscuro, que tal vez indiquen que existe algún tipo de resistencia.

Cuando la enfermedad se desarrolla tempranamente (en el estadio de plántula), puede reducir seriamente el sistema radicular y, por consiguiente, afectar mucho el rendimiento, en especial en las zonas más secas. La infección intensa antes del espigamiento tiende a disminuir el número de granos, en tanto que las infecciones posteriores al espigamiento sólo afectan el peso de los granos.

Mildiú veloso. *Sclerophthora macrospora* (*Sclerospora macrospora*) es el agente etiológico de esta enfermedad, restringida a las zonas donde se producen inundaciones durante los primeros estadios de desarrollo del cultivo. En consecuencia, su importancia es limitada, sobre todo cuando la cebada se cultiva en condiciones predominantemente secas.

Mancha reticulada. Tiene una distribución amplia en las zonas templadas y húmedas del mundo. La enfermedad es causada por *Helminthosporium teres* (a veces conocido en su estado perfecto, *Pyrenophora teres*) y puede provocar grandes pérdidas del rendimiento, especialmente en el norte de África, los países europeos del Mediterráneo y zonas de Asia Occidental alrededor del Mar Caspio.

Las infecciones en las plántulas causan la aparición de manchas reticuladas café en la punta de las hojas o cerca de ella, que se desarrollan para convertirse en la característica mancha reticular de color café oscuro, la cual finalmente puede cubrir toda la hoja, aunque nunca se extiende hasta la vaina. Pueden existir lesiones adicionales en las lemas, donde aparecen como una decoloración café claro en lugar de la mancha reticulada característica de la infección foliar. Algunas veces *H. teres* produce manchas foliares similares a las que origina *H. sativum*.

La mancha reticular provoca el arrugamiento de los granos, que puede ser muy intenso, sobre todo en las infecciones tempranas. En estos casos, suelen disminuir mucho el número de macollos por planta y el número de granos por macollo.

Tizón foliar. Esta enfermedad, causada por *Cochiobolus sativus* (*Helminthosporium sativum*), está muy difundida en los países del norte de África, Asia Occidental y el Mediterráneo europeo, donde las condiciones de humedad y temperatura cálida favorecen su desarrollo y propagación.

La infección de las plántulas causa la aparición del tizón, que con frecuencia provoca la muerte de las plántulas antes de que emerjan o después. Las infecciones de las plantas maduras se manifiestan con las características lesiones circulares u oblongas de color café oscuro, que pueden unirse y cubrir toda la hoja. Los granos y las brácteas florales también pueden resultar afectados por el tizón foliar, y en estos casos comúnmente se le llama punta negra.

Mancha estriada de la cebada. Esta enfermedad, ocasionada por *Helminthosporium gramineum*, casi invariablemente se presenta en los cultivos de cebada de todo el mundo. Sin embargo, provoca pérdidas grandes sólo en ciertas zonas (especialmente en las de escasa precipitación pluvial en el Cercano y Medio Oriente). En esas zonas se le considera una de las enfermedades de la cebada más importantes.

Los síntomas se manifiestan aproximadamente durante el estadio de plántula. Al principio se limitan a las hojas y vainas foliares más viejas, donde aparecen estrías amarillas paralelas, pero a medida que progresa la enfermedad, las áreas afectadas se tornan cafés y pueden extenderse a todas las hojas. Las plantas infectadas suelen presentar achaparramiento y las hojas se rasgan, se rompen o caen. Cuando la infección es intensa, no surge la espiga o, si lo hace, tiene manchas y un color café.

Escaldadura. Esta enfermedad es consecuencia de la infección por *Rhynchosporium secalis* y tiene gran importancia en las regiones húmedas y subhúmedas más frescas. Causa considerables pérdidas del rendimiento en Afganistán, Turquía, Etiopía, Kenia, Tanzania y muchos de los países del Mediterráneo. Afecta a la cebada de invierno y de primavera y se presenta al comienzo como lesiones húmedas irregulares de color verde azulado sobre las hojas y vainas foliares. A medida que avanza la enfermedad, las lesiones se convierten en áreas descoloridas con márgenes cafés. Las infecciones provocan pérdidas similares a las que origina la mancha reticular.

Carbón volador. *Ustilago nuda* es el agente etiológico de esta enfermedad, muy difundida en zonas donde predominan condiciones de lluvia y temperatura fresca durante el espigamiento. Los síntomas, consecuencia del reemplazo de los tejidos florales por esporas, aparecen durante la floración, cuando se rompe la frágil membrana de cobertura y queda al descubierto una oscura masa de esporas cafés. Las espigas infectadas generalmente emergen de la vaina unos días antes que las sanas, pero puede ser difícil distinguirlas antes de la floración.

Carbón semivolador negro. Esta enfermedad, similar al carbón volador, es provocada por *Ustilago nigra* y tiene importancia en Europa, Asia y algunas partes del Cercano y Medio Oriente. Los síntomas se asemejan a los del carbón volador, pero la masa de esporas tiende a ser más compacta y está encerrada por una membrana floja que no perdura.

Las espigas infectadas con esta enfermedad suelen emerger después de las infectadas por el carbón volador.

Carbón cubierto. Esta enfermedad, causada por *Ustilago hordei*, es considerada una de las enfermedades de la cebada más graves y difundidas en el norte de África, el Cercano y Medio Oriente y el sur y sureste de Asia. Las masas de esporas, cubiertas por una membrana que persiste hasta que están por completo maduras, reemplazan totalmente a los granos. A diferencia de los carbones del trigo, el carbón cubierto de la cebada puede ser fácilmente identificado tan pronto como surge la espiga de la vaina.

Pudrición fungosa de la raíz. Como sucede con la pudrición de la raíz del trigo, esta enfermedad es ocasionada primordialmente por *Pythium* spp. y trae como resultado la necrosis de la raíz, que a su vez hace que las plantas se vuelvan cloróticas y presenten achaparramiento. Suele provocar grandes daños cuando la infección se produce durante el estadio de plántula; tiene menos trascendencia cuando se trata de plantas adultas. La especie que más comúnmente infecta la cebada es *P. graminicale*.

Roña o tizón causado por *Fusarium*. Los agentes etiológicos, síntomas y efectos de esta enfermedad son los mismos que en el caso de la enfermedad similar que afecta al trigo.

Ergot. También en este caso las características de la enfermedad son las mismas que se presentan en el trigo.

A2.2 Enfermedades bacterianas

Tizón bacteriano. Esta es la única enfermedad bacteriana de cierta importancia que afecta a la cebada. Es causada por *Xanthomonas campestris* pv. *translucens* y ocurre con mayor frecuencia en el norte de Europa, Asia, norte de África y varios países del Cercano Oriente.

Las infecciones tempranas se presentan como diminutas lesiones lineales húmedas en las hojas y vainas foliares. Las lesiones se

alargan y se fusionan formando estrías irregulares cuya superficie parece ser vítrea, de color amarillo claro, café claro u oscuro, según su edad. En las etapas posteriores de la infección, el centro de las lesiones se torna traslúcido y se pueden observar gotitas de un exudado amarillento.

En general, las infecciones sólo son graves cuando se inician en un estadio temprano del desarrollo del cultivo; en esos casos pueden provocar pérdidas graves y a veces totales.

A2.3 Virosis

Además de las virosis señaladas en relación con el trigo, hay otras dos que merecen ser mencionadas.

Mosaico estriado de la cebada. Se ha encontrado esta enfermedad en América del Norte, Europa, Japón, Corea, Paquistán, la URSS, Australia y algunos países de Asia Occidental. Sus síntomas varían desde las estrías café amarillentas hasta las manchas cloróticas y el moteado general. Los efectos sobre la planta huésped se conocen muy poco y la enfermedad es transmitida por las semillas y el polen.

Virus de los macollos de los cereales (CTV). Este virus ataca exclusivamente a la cebada y provoca síntomas muy variados, como la aparición de manchas en forma de mosaico, moteado, coloración amarilla y achaparramiento.

A2.4 Enfermedades causadas por nematodos

En general, la cebada es atacada por los mismos nematodos que comúnmente infestan al trigo. Son en particular importantes los nematodos del género *Heterodera* y también se ha comprobado que *Anguina tritici* causa la aparición de cóclea de la espiga en la cebada.

Como en el caso del trigo, son limitadas las investigaciones realizadas hasta ahora en relación con los nematodos, en particular en las zonas de clima seco. En consecuencia, tal vez su importancia sea considerablemente mayor de lo que actualmente se supone.



CENTRO INTERNACIONAL DE MEJORAMIENTO DE MAIZ Y TRIGO
INTERNATIONAL MAIZE AND WHEAT IMPROVEMENT CENTER
Lisboa 27 Apartado Postal 6-641 06600 México, D.F., México