

LOS CEREALES

Amando ORDÁS*

Misión Biológica de Galicia, CSIC. Pontevedra, España.

* aordas@mbg.csic.es

Recibido: 03-Noviembre-2023

Aceptado: 01-Diciembre-2023

Publicado on-line: 29-Diciembre-2023

Cita:

Ordás A. 2023. Los cereales. Mol 23: 6.

Resumen

Los cereales son plantas de la familia Poáceas (también conocidas como gramíneas) cultivadas principalmente por su grano, aunque en algunos casos la finalidad forrajera también tiene importancia. Cuatro cultivos (caña de azúcar, maíz, trigo y arroz) representaron la mitad de la producción mundial en 2020. Si bien la caña de azúcar no es un cereal como los otros tres cultivos, también es una gramínea. Los cereales más cultivados en España son, por este orden, cebada, trigo, avena y maíz. Además, también se cultivan triticale, centeno, arroz, sorgo, etc. El trigo se emplea para la producción de pan (trigo blando) y pasta (trigo duro). Las cebadas de dos carreras se emplean generalmente para la fabricación de cerveza, en tanto que las de seis carreras se usan para la alimentación del ganado. El triticale, un híbrido de trigo y centeno, ha visto como su superficie ha aumentado notablemente en los últimos años. La avena ha experimentado un gran auge últimamente ya que se ha descubierto que posee unas características alimenticias muy saludables. El maíz, el cereal más cultivado en Galicia, tiene numerosos usos. Además del maíz para grano para alimentación animal (el más común en las zonas templadas del planeta) y del maíz forrajero, se cultivan otros tipos para alimentación humana, como, por ejemplo, el maíz dulce, el maíz de palomitas y el maíz harinero.

Abstract

Cereals are plants of the Poaceae family (also known as grasses) grown mainly for their grain, although in some cases their use as forage is also important. Four crops (sugar cane, maize, wheat, and rice) accounted for half of global production in 2020. While sugar cane is not a cereal like the other three crops, it is also a grass. The most cultivated cereals in Spain are, in this order, barley, wheat, oats, and maize. In addition, triticale, rye, rice, sorghum, etc. are also grown. Wheat is used for the production of bread (soft wheat) and pasta (hard wheat). Two-row barley is generally used for brewing beer, while six-row barley is used for livestock feeding. Triticale, a hybrid of wheat and rye, has seen its acreage increase significantly in recent years. Oats have experienced a great boom lately as they have been discovered to have very healthy nutritional characteristics. Maize, the most cultivated cereal in Galicia, has numerous uses. In addition to grain maize for animal feed (the most common in the temperate zones of the planet) and forage maize, other types are grown for human consumption, such as sweet corn, popcorn, and maize for bread.

1. Introducción

En este trabajo se hará una exposición de qué son los cereales y se expondrá de modo especial su situación en España y, en casos particulares, en Galicia. Al maíz se le dedicará mayor atención que al resto de los cereales debido a su importancia en Galicia.

Si bien un gran número de especies vegetales son cosechadas alrededor del mundo, sólo cuatro cultivos representaron la mitad de la producción mundial en 2020: caña de azúcar (1.900 millones de toneladas, 20% del total), maíz (12 por ciento, con 1.200 millones de toneladas, 12% del total), y trigo y arroz (800 millones de toneladas cada uno, 8% del total). No es exagerado por ello decir que la base de la alimentación humana la constituyen los cereales, en concreto el arroz, el maíz y el trigo. La caña de azúcar, si bien no es propiamente lo que se entiende como un cereal, es también una gramínea, familia a la que pertenecen los otros tres cultivos. En este trabajo expondremos la situación actual de los cereales centrándonos en España, con particular detalle en lo que se refiere a su cultivo en Galicia.

Según la última edición del diccionario de la Real Academia Española de la lengua, un cereal es una «planta gramínea cultivada principalmente por su grano, muy utilizado en la alimentación humana y animal, y de la que existen numerosas especies, como el trigo y la cebada.» El uso del grano, que es un fruto (cariópside), es el uso común y ancestral de estos cultivos, pero algunos de ellos tienen también gran importancia como especies forrajeras, especialmente el maíz. El nombre de gramíneas es el término común para designar a la familia botánica de las «Poáceas». Una descripción detallada de los distintos cereales haría este trabajo excesivamente largo por lo que expondremos unas generalidades de los más importantes en España y Galicia, y nos detendremos especialmente en el maíz.

En general, y de acuerdo a los Anuarios de Estadística que publica el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, los cereales cultivados en España se dividen en dos grandes grupos: cereales de invierno y cereales de primavera. Los primeros comprenden aquellos que se siembran durante el otoño, con lo que, al llegar el invierno, ya están establecidos y se recolectan durante el verano. En este grupo tenemos los distintos tipos de trigo (duro y blando), cebadas (de seis y de dos carreras), avena, centeno, escaña, triticale, así como las mezclas, entre las que destaca el tranquillón (una mezcla de trigo y centeno). Los cereales de primavera que, como su nombre indica, se siembran durante esa estación, son el arroz, el maíz, el sorgo, el mijo, el panizo, el alforfón o trigo sarraceno y el alpiste. El alforfón no es estrictamente un cereal ya que no es una gramínea, sino una poligonácea, pero habitualmente se incluye entre los cereales por sus características agronómicas ya que es el grupo de cultivos en que más fácilmente se integra. En la tabla 1 se exponen las distintas especies botánicas de cada cultivo. Hay que señalar, también, que esta división no debe tomarse como cerrada ya que, dentro de los cereales de invierno, existen variedades de primavera, especialmente en el caso del trigo y de la cebada.

2. Características generales

2.1. Trigo

El trigo ocupa un lugar preponderante en la civilización occidental. Se le considera el cereal del Viejo Mundo, en contraposición al arroz (el cereal de Asia) y al maíz (el grano de América). De hecho, probablemente el hombre abandonó la vida nómada en el mundo occidental cuando hace unos 8.000 o 10.000 años, en el Creciente Fértil, se domesticaron los primeros trigos y la vida nómada dio lugar a la vida sedentaria.

Los diversos trigos pertenecen al género *Triticum*, diferenciándose tres especies por su nivel de ploidía. El número básico de cromosomas es 7 y así podemos encontrar trigos diploides, tetraploides y hexaploides (tabla 2).

Tabla 1. Cereales cultivados en España en 2020 (MAPA, 2021).

Grupo	Cultivo	Especie	Superficie (ha)	Reproducción
Cereales de invierno	Trigo duro	<i>Triticum durum</i>	250.903	Autógama
	Trigo blando	<i>Triticum aestivum</i>	1.661.696	Autógama
	Cebada	<i>Hordeum vulgare</i>	2.749.039	Autógama
	Avena	<i>Avena sativa</i>	506.168	Autógama
	Centeno	<i>Secale cereale</i>	137.590	Alógama
	Escaña	<i>Triticum monococcum</i>	737	Autógama
	Triticale	× <i>Triticosecale</i>	257.107	Autógama ¹
	Tranquillón	Mezcla de trigo y centeno	36.683	
	Otras mezclas	Diversas	7.582	
	Forrajeros	Varias	196.958	
Cereales de primavera	Arroz	<i>Oryza sativa</i>	102.064	Autógama
	Maíz grano	<i>Zea mays</i>	343.778	Alógama
	Maíz forrajero	<i>Zea mays</i>	115.121	Alógama
	Sorgo grano	<i>Sorghum bicolor</i>	5.248	Autógama ¹
	Sorgo forrajero	<i>Sorghum bicolor</i>	5.433	Autógama ¹
	Mijo	<i>Panicum miliaceum</i>	1.117	Autógama
	Alforfón	<i>Fagopyrum esculentum</i>	141	Alógama
	Alpiste	<i>Phalaris canariensis</i>	64	Autógama
Otros			2.395	

¹ Con cierto porcentaje de alogamia.

Tabla 2. Distintas especies de trigos.

Nivel de ploidía	Nº de cromosomas	Especie	Cultivo
Diploide	2n=2x=14	<i>Triticum monococcum</i>	Escaña, escaña menor, escanda menor
Tetraploide	2n=4x=28	<i>Triticum durum</i>	Trigo duro
Hexaploide	2n=6x=42	<i>Triticum aestivum</i>	Trigo blando
		<i>Triticum spelta</i>	Espelta, escaña mayor, escanda mayor

El trigo blando es el cereal panificable por antonomasia. Para la elaboración de pasta se emplea el trigo duro. La espelta ha generado mucho interés en los últimos años ya que se ha propuesto su consumo en algunas prácticas de la llamada medicina alternativa para el tratamiento de varios problemas de salud. En el Anuario 2021 (MAPA 2021) no figura ninguna superficie cultivada en España, aunque si una pequeña cantidad de semilla certificada en Cataluña. La escaña se cultivó antiguamente para alimentación de las gallinas, pero su uso actual es muy escaso.

Uno de los problemas que tiene el grano de trigo (y todas las demás especies de la tribu de las triticeas: cebada, centeno, espelta...) es la presencia de gluten, lo que puede originar graves problemas para las personas intolerantes a estas proteínas.

2.2. Cebada

La cebada es también un cereal muy antiguo. Aunque se ha usado para panificación, usualmente se ha considerado el pan obtenido con esta especie de calidad inferior al hecho con trigo. Los tipos generalmente cultivados constan de dos filas de granos (cebadas de dos carreras) o de seis (cebadas de seis carreras), aunque también hay, aunque son mucho menos frecuentes, variedades de cuatro carreras. Las cebadas cerveceras deben tener un alto contenido en almidón y bajo en proteínas, por lo que las de dos carreras, que presentan estas características en comparación con las de seis carreras, son las que generalmente se utilizan para la fabricación de cerveza, mientras que las de seis carreras se usan para la alimentación del ganado.

2.3. Centeno

Este cereal ha destacado siempre por su gran rusticidad, por lo que ha sido un sustituto del trigo en las zonas de clima muy duro. Su superficie ha sufrido una gran disminución en relación a la que ocupaba hace unos 50 años, posiblemente por el abandono de la agricultura en zonas marginales, en las que era uno de los cultivos básicos, y probablemente también por su sustitución por el triticale. No obstante, el especial sabor que da al pan hace que siga siendo apreciado por muchos consumidores.

2.4. Avena

El género *Avena* comprende unas 20 especies, pero la mayoría de las avenas cultivadas pertenecen a la especie *Avena sativa*, aunque en España también se cultivan las restantes citadas en la tabla 3. La avena no pertenece a la tribu de las triticeas, pero también puede contener pequeñas cantidades de gluten.

La especie *Avena strigosa* es propia de la Europa Atlántica, en tanto que *Avena byzantina* y *Avena sativa* son más comunes en climas mediterráneos. *Avena strigosa* tiene como una característica peculiar presentar un grano de color negro y en Galicia se suele llamar avena “do país”. Por ello, en algunas zonas en las que se perdió, algunos agricultores han comenzado a cultivar *Avena sativa* de grano negro ya que, aunque en esta especie el color común del grano es el blanco, también existen variedades de grano negro, que posiblemente les recuerden la antigua variedad del país (comunicación personal de B. Ordás). La “avena de Noia”, de grano blanco, tiene los tallos de color rojo.

Tabla 3. Distintas avenas cultivadas en España.

Nivel de ploidía	Nº cromosomas	Especie	Cultivo
Diploide	$2n=2x=14$	<i>Avena strigosa</i>	Avena negra
Tetraploide	$2n=4x=28$	<i>Avena barbata</i>	Avena silvestre
Hexaploide	$2n=6x=42$	<i>Avena sativa</i>	Avena común
		<i>Avena byzantina</i>	Avena de Noia ¹

¹Nombre común en zonas de Galicia.

La avena ha experimentado un gran auge en los últimos años ya que, debido a la preocupación que existe en los países desarrollados por una alimentación sana, se ha descubierto que posee unas características alimenticias muy saludables por lo que es actualmente muy común encontrara en los supermercados numerosos productos que tiene avena en su composición.

2.5. *Triticale*

El triticale es un híbrido interespecífico entre trigo y centeno. La idea tras su obtención era conseguir un cereal que tuviera la rusticidad del centeno y la productividad y calidad del trigo. Una descripción de los trabajos que condujeron a su obtención pueden verse en Sánchez-Monge (1969).

Se emplea en el pastoreo, ensilaje, como forraje y como sustento para los animales. Asimismo, en diversas acciones concernientes a la manufactura o industria, como es la elaboración de bioetanol o alcohol etílico. Su implantación en España ha ido creciendo paulatinamente en los últimos años y así vemos (tabla 1) que los últimos datos consolidados referentes a 2020 (MAPAMA, 2021), le adjudican una ya respetable extensión de más de 250.000 ha.

2.6. *Mijo*

El mijo es uno de los cereales más antiguos que se conocen ya que hizo su aparición en Galicia y otras zonas del norte de España, de un modo generalizado, en el momento de la transición del Bronce final a la Primera la Edad del Hierro. En Galicia se encuentra presente en varios yacimientos castreños, tanto en la costa como del interior. En el caso concreto de Galicia era el cereal que se empleaba para la alimentación humana, junto con el trigo, especialmente en las zonas costeras en las que este último cultivo tenía problemas por la excesiva humedad del suelo. La aparición del maíz lo desplazó hasta prácticamente eliminarlo en Galicia, robándole incluso el nombre: millo, como se designa el maíz en esta zona, así como en Canarias. Actualmente, el mijo se cultiva en España principalmente en Castilla y León, Aragón, Cataluña y Andalucía, aunque la superficie total es pequeña (Tabla 1).

En Galicia no está completamente desaparecido. En 2020, el Grupo de Investigación de Adaptación y Sostenibilidad de Cultivos de la Misión Biológica de Galicia consiguió, a través de un arqueólogo (A. Teira Briones), una muestra de mijo procedente de un agricultor de Rois (A Coruña), perteneciente a una variedad que dicho agricultor seguía cultivando.

2.7. *Maíz*

2.7.1. Introducción

El maíz es el principal cereal cultivado en Galicia y por ello vamos a dedicarle un apartado especial, de cierta longitud. En 2020, el maíz (grano y forrajero) ocupó en España una superficie de 458.899 ha (MAPAMA 2021), si bien estas cifras son, con toda seguridad, inferiores a las reales ya que es muy difícil, si no imposible, cuantificar las hectáreas que se dedican a este cultivo en los minifundios de Galicia y la cornisa cantábrica. Por comunidades, y en lo referente a maíz grano, ocupó el primer lugar en superficie en 2014 Castilla y León (siendo León la provincia que más superficie le dedicó, no solo en la comunidad sino en toda España), seguida de Aragón (con Huesca como primera provincia y que, además, fue la segunda en España tras León) y Extremadura y Cataluña, con superficies similares. En conjunto España tiene un acusado déficit de este cereal ya que precisa importar mucho más grano del que produce. En el caso del maíz forrajero, el 61% de la superficie total se sembró en Galicia (MAPAMA 2021).

Últimamente se está difundiendo el uso de *grano húmedo*. La elaboración del grano húmedo se lleva a cabo aprovechando únicamente el grano de maíz y desechando el resto de la planta que queda triturada y esparcida sobre la finca. Con esto se consigue un alimento muy rico en energía y con un contenido en materia seca alto, de entre el 60 y el 70%. Así es que hay que considerarlo como un concentrado y no como un forraje, tanto por su valor nutricional como por su importancia económica.

El grano de maíz, como el del resto de los cereales, es un fruto en cariósido, que incluye el embrión, el endospermo, la aleurona y el pericarpio. Se encuentra también un resto del pedicelo, por el que el grano estaba unido al zuro. El pericarpio es la envoltura externa de la semilla y, como tejido materno que es, no tiene contribución genética del polen. En otras palabras, tiene un genotipo idéntico al de la planta sobre la que se asienta la mazorca. El grosor del pericarpio es muy variable, con un intervalo entre 25 y 140 μm dependiendo del genotipo (Zuber y Darrah 1987), lo que implica diferencias de calidad en aquellos casos en que el grano es consumido directamente por el hombre.

La aleurona, capa exterior del endospermo y triploide como él, está formada normalmente por una capa única de células, al contrario que en la mayoría de los cereales. El endospermo, que procede de la unión del núcleo secundario del saco embrional (2x) con uno de los núcleos espermáticos (x) del grano de polen, constituye la mayor parte del grano, generalmente el 80–85% de su peso. Sus células están rellenas de granos de almidón, lo que hace que el maíz se considere ante todo un alimento energético. La composición típica del grano de maíz puede verse en la tabla 4. Hay que tener en cuenta, no obstante, que los datos de esta tabla reflejan la composición del típico maíz norteamericano, con unos intervalos de variación pequeños alrededor del valor medio; las variedades lisas pueden presentar valores distintos. Así, en unos análisis realizados en la Misión Biológica de Galicia, la línea pura EP2 tuvo un contenido (media de tres ensayos) del 15,4% de proteína (datos sin publicar), valor muy superior a los que normalmente se citan.

Tabla 4. Valores medios de la composición de las distintas partes del grano de maíz (adaptado de Watson 1987).

Parte	Composición (%)						
	(1)	Almidón	Aceite	Proteína	Ceniza	Azúcar	Otros
Endospermo	82,9	87,6	0,8	8,0	0,3	0,62	2,7
Embrión	11,1	8,3	33,2	18,4	10,5	10,8	8,8
Pericarpio	5,3	7,3	1,0	3,7	0,8	0,34	86,7
Pedicelo	0,8	5,3	3,8	9,1	1,6	1,6	78,6
Grano entero	100,0	73,4	4,4	9,1	1,4	1,9	9,8

(1) Porcentaje del grano entero (peso seco).

Desde el punto de vista de su apariencia física el almidón se presenta bajo dos consistencias distintas: almidón duro y almidón blando. La distinta proporción de uno y otro, así como su disposición en el grano, causa la aparición de distintos tipos de maíz: de palomitas (palomero, «popcorn», reventador), liso (duro), dentado y harinoso. El maíz que se cultiva habitualmente para la obtención de harinas para piensos animales —su uso más común en los países desarrollados de las zonas templadas— es el dentado, seguido del liso o tipos intermedios (semidentados) en zonas de clima más frío.

Numerosos mutantes afectan a la composición típica del endospermo, alterándola de forma sustancial y dando lugar a tipos especiales de maíz, con unos requerimientos de calidad específicos. Así tenemos el maíz dulce, el maíz de palomitas, tipos seleccionados para altos contenidos en amilosa, amilopectina, proteína o aceite, etc. Más adelante veremos algunos de estos tipos. La proteína del maíz que podemos llamar «normal» no presenta gluten, pero tiene, en cambio, el grave inconveniente, del bajo contenido en dos aminoácidos esenciales: lisina y triptófano. Algunos mutantes como el opaco-2 (*o2*) tienen un alto contenido en lisina, pero presentan problemas de baja productividad y mala calidad del grano, por lo que el CIMMYT y otros organismos han emprendido programas de mejora de este tipo de maíz para aquellos países en que esta especie se usa para alimentación humana.

2.7.2. Origen del maíz

El origen del maíz es algo que todavía está sin esclarecer completamente. Cuando en 1492 los españoles llegaron a América se encontraron con que los indios americanos habían domesticado completamente la especie y obtenido los tipos comerciales de endospermo hoy empleados (dentado, liso, dulce, «pop» y harinoso) a partir de una gramínea silvestre.



Figura 1. Mazorca de teosinte Balsas cultivado en la Misión Biológica de Galicia (Pontevedra).

Cuál es esa gramínea silvestre es algo en lo que todavía no hay un consenso absoluto entre los especialistas, aunque la opinión más extendida es la de que el maíz cultivado actual descende del teosinte Balsas (figura 1), una especie silvestre que crece de forma natural en México y Guatemala, y de aspecto tan diferente al del maíz que los primeros taxonomistas incluso le adjudicaron un nombre específico distinto: *Euchlaena mexicana*. Hoy se considera que todos los tipos de teosinte pertenecen al género *Zea*. La clasificación de Doble y Iltis (Iltis y Doebley 1980; Doebley 1990) reconoce la existencia de siete táxones y cuatro especies distintos. Su clasificación, resumida, es como sigue:

Taxonomía del género *Zea*:

Sección *Luxuriantes*

Zea diploperennis (teosinte perenne diploide)

Zea perennis (teosinte perenne tetraploide)

Zea luxurians (teosinte Guatemala)

Sección *Zea*

Zea mays

subsp. *mexicana* (teosintes Chalco, Meseta Central y Nobogame)

subsp. *parviglumis* (teosinte Balsas)

subsp. *huehuetenangensis* (teosinte Huehuetenango)

subsp. *mays* (maíz)

La primera clasificación de la variabilidad existente en el maíz fue hecha a finales del siglo pasado por Sturtevant (1899), quien dividió los tipos existentes en seis grupos: dentado, liso, harinoso, «pop» o de palomitas, dulce y tunicado. Esta clasificación, salvo en el caso del maíz tunicado, se basa en la composición del endospermo. En muchos casos las diferencias son simplemente monogénicas. Así, la diferencia de liso (*Fl1*) frente a harinoso (*fl1*) es un gen situado en el cromosoma 2. El carácter dulce (*su1*) frente a almidonoso (*Su1*) está situado en el cromosoma 4. El carácter tunicado es también monogénico y localizado igualmente en el cromosoma 4 (*Tu1*). Pero otras diferencias, tales como las existentes entre el maíz de palomitas y el liso, son poligénicas.

Los maíces de palomitas son básicamente un tipo liso de grano pequeño. Se considera generalmente que forman las razas más primitivas del maíz actual. Sus granos tienen la propiedad de reventar al aplicárseles calor, dando lugar a las típicas palomitas.

Los granos de maíz liso tienen fundamentalmente endospermo duro y poseen la ventaja de un fácil almacenamiento y germinación en condiciones difíciles.

El maíz dentado es un tipo intermedio entre el liso y el harinoso, variando el grado de dentición con el fondo genético. Los lados de los granos dentados son lisos, mientras que el núcleo central es harinoso. Debido a que el núcleo blando se contrae más durante el secado que los lados duros, el grano maduro adquiere el característico aspecto dentado.

Los granos de maíz harinoso tienen únicamente almidón blando. Al secar presentan la ventaja de una molienda muy fácil, incluso en el caso de que se haga a mano. Tienen, en cambio, el grave inconveniente de la facilidad para la aparición de mohos sobre la mazorca que pueden llegar a arruinar la cosecha. Por ello su uso está limitado a áreas con un clima muy seco en la época de la recolección.

En el maíz dulce el gen *su1* previene o retarda la conversión del azúcar en almidón durante la formación del endospermo. Como consecuencia de ello, los granos dulces al secar presentan una típica apariencia arrugada y cristalina.

El maíz tunicado tiene la peculiaridad de que cada grano está envuelto por unas largas glumas, de modo similar a lo que ocurre en otras gramíneas.

Andersson y Cutler (1942) apuntaron lo artificioso del sistema de Sturtevant y propusieron que las clasificaciones raciales debían basarse en las relaciones naturales. Estos autores definieron una raza como un grupo de individuos relacionados con suficientes características en común que permiten reconocerlos como un grupo. Genéticamente una raza es un grupo de individuos con un número significativo de genes en común.

2.7.3. Germoplasma

2.7.3.1. El maíz del «Corn Belt»

El maíz del «Corn Belt», quizás la raza más productiva del mundo en las zonas templadas, se originó hace relativamente poco tiempo y por una feliz casualidad. A mediados del siglo XIX Robert Reid, procedente del Sur de Ohio, se instaló en la parte central de Illinois trayéndose con él, como era común, su semilla de maíz (una variedad de la raza Southern Dent). En 1846 la semilla maduró mal y, como consecuencia de ello, en 1847 la nascencia fue muy pobre. Robert Reid resemeó los fallos con una variedad local (perteneciente a la raza Northern Flint) mucho más precoz. Afortunadamente, por esta siembra tardía de la variedad precoz, ambas variedades florecieron a la vez y se produjo un híbrido intervarietal. James, hijo de Robert Reid, seleccionó durante muchos años este material y,

finalmente, obtuvo la famosa variedad Reid Yellow Dent. Otras importantes variedades del Corn Belt son Lancaster Surecrop, Iodent, Minnesota No. 13, etc. (figura 2).



Figura 2. Mazorcas de una típica variedad del Corn Belt.

Prácticamente todos los híbridos cultivados en las zonas templadas del planeta llevan en su germoplasma una proporción más o menos grande de esta raza. Smith et al (2022) concluyeron que cuatro países, productores del 55% del maíz total del mundo, dependían en un 84–88% del Corn Belt Dent. En el caso de EE.UU. y China, que en conjunto producen el 46% del maíz mundial, esa proporción subía hasta el 92%.

2.7.3.2. Situación actual en el mundo

Las universidades norteamericanas y el USDA han abandonado la obtención de líneas puras y el desarrollo de híbridos ante los potentes programas de mejora montados por las grandes compañías productoras de semilla. Así, líneas puras disponibles públicamente con la protección de obtenciones vegetales vencidas (exPVP), y pertenecientes a ocho grupos de germoplasma (B14, B37, B73, Oh43, Iodent, Iodent-Lancaster, Lancaster, and Flint), constituyen el germoplasma élite usado en los híbridos cultivados por los agricultores norteamericanos durante el último medio siglo (White et al. 2020).

La situación en Europa Occidental es similar, aunque con una mayor difusión del patrón heterótico «Corn Belt Dent × Liso Europeo» para la producción de híbridos. El parental dentado contribuye con productividad al híbrido, en tanto que la línea lisa proporciona, entre otras características, vigor temprano, algo de suma importancia en las frías y húmedas primaveras de esta zona. No obstante, en los últimos años, aunque parezca que las variedades de polinización libre han desaparecido prácticamente del cultivo, la situación es algo diferente. Existe una demanda creciente de dichas variedades y en algunos casos han desplazado a los híbridos. Así, por ejemplo, dos asociaciones de agricultores han reintroducido dos antiguas variedades de polinización libre (Marano y Sponcio) en 1999 en la región italiana de Veneto (Fenzi y Couix, 2021). Reintroducciones similares han tenido lugar en Francia, Portugal, Suiza y Bélgica (Ordás et al. 2023).

2.7.3.3. Razas españolas

En España se comenzó la recogida de variedades locales por Gallástegui (Ordás 1993) a comienzos de los años veinte. La primera descripción del germoplasma español fue realizada por Sánchez-Monge (1962). Sus razas se encuentran conservadas en la Misión Biológica de Galicia. A partir de los años setenta se han llevado a cabo numerosas recogidas por toda España (Alvarez y Lasa 1987a, 1987b, 1990a, 1990b; Llauradó y Moreno González 1993; Llauradó et al. 1993; Ordás et al. 1987, 1994; Ruiz de Galarreta y Alvarez 1990). Como consecuencia de todo ello se dispone de una amplísima representación (posiblemente incluso excesiva) de las antiguas variedades de polinización libre.

2.7.3.4. El maíz en Galicia

a. Pequeño apunte histórico

En Galicia existe constancia de una siembra en Mondoñedo en 1605, pero no deja de ser un hecho anecdótico. Magdalena de Luaces, esposa del hasta aquel año gobernador de Florida, al regresar a España trajo consigo maíz de aquellas tierras y lo sembró. Es más que dudoso que un maíz de Florida pudiera madurar convenientemente en las tierras mindonienses por lo que, con toda seguridad, el cultivo no pudo continuar en años posteriores. La introducción sistemática en Galicia tuvo lugar a partir de la primera mitad del siglo XVII por las Rías Bajas, sobre todo por la Ría de Arousa (Pérez García 1982). Hay constancia de una siembra en el Barbanza en 1610, otra en Cangas en 1618 y hacia la mitad del siglo el maíz colonizaba toda la costa occidental. La expansión por el interior fue más lenta, durando hasta el siglo XIX.

b. Las variedades “del país” en Galicia

Un estudio del material gallego (Ordás et al. 1994) ha mostrado que en Galicia existían, antes del advenimiento del maíz híbrido, tres grandes grupos de variedades:

1. Variedades atlánticas precoces, caracterizadas por poseer plantas de talla pequeña y mazorcas con pocas filas, de grano amarillo o blanco (figura 3).
2. Variedades atlánticas de ciclo medio. Se caracterizan por plantas, en general, de gran porte. Las mazorcas son largas, con bastantes filas y el grano puede ser de color amarillo o blanco. Este último color más abundante en las zonas costeras (figura 4).
3. Variedades de las tierras altas del interior. Poblaciones muy precoces, con mazorcas cortas y cónicas y, generalmente, de color amarillo (figura 5).

Este esquema general tiene numerosas excepciones ya que es frecuente encontrar variedades de otros tipos, por ejemplo, multicolores, en zonas de maíz blanco o amarillo (figuras 6 y 7).

Estas variedades “del país” tiene una productividad bastante baja, que suplen con una buena adaptación al medio, fundamentalmente vigor temprano y capacidad para madurar en otoños frescos. Un programa de selección recurrente (véase más adelante) aplicado a cuatro de estas variedades mostró, tras tres ciclos de selección que la respuesta difirió notablemente entre las poblaciones. Todas mejoraron en el primer ciclo de selección, pero la respuesta en los ciclos avanzados fue muy diferente, por lo que no se puede establecer una regla general (Ordás et al. 2023).



Figura 3. Típica variedad atlántica precoz.



Figura 4. Típica variedad atlántica de ciclo medio.

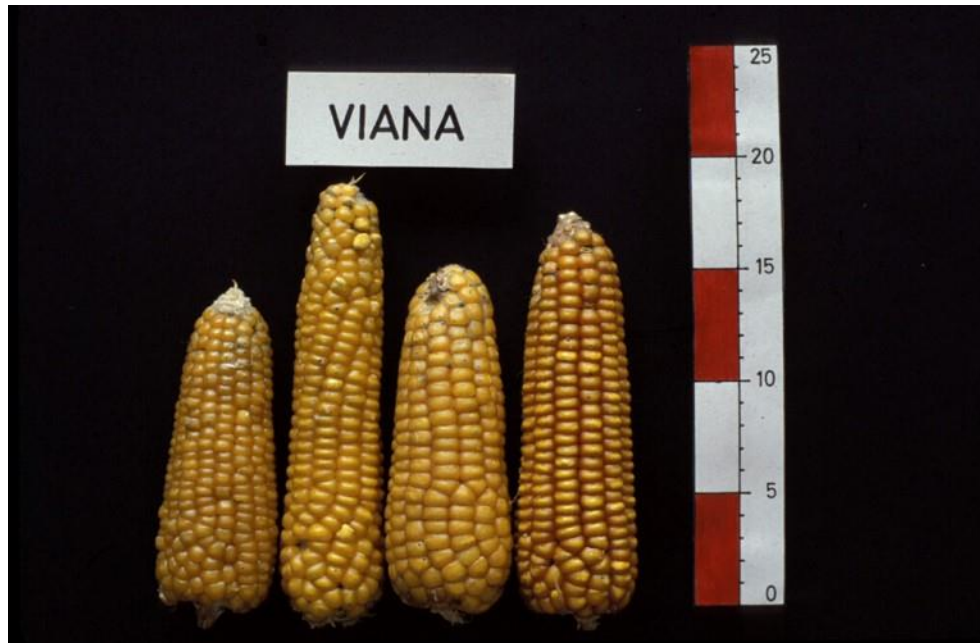


Figura 5. Variedad de las tierras altas del interior.



Figuras 6 y 7. Ejemplos de variedades que no se ajustan al esquema general.

2.7.4. Métodos de mejora

El método más simple de mejora es, sin duda, tan antiguo como la época en que el hombre neolítico en la mayoría de las culturas pasó de nómada y cazador a sedentario y agricultor. La genética, la ciencia que es en la actualidad la base de la mejora de las especies vegetales, es, en contraste, bastante reciente.

Poco puede saberse de los métodos de selección aplicada al maíz antes de la llegada de Colón a América. Lo que sí es cierto es que en 1492 los indios americanos habían domesticado el maíz y

obtenido los tipos comerciales hoy empleados: dentado, liso, dulce, «pop» y harinoso. Y esta labor debe ser considerada como un hallazgo fundamental para la humanidad. La mayor parte de esta domesticación debió ser hecha mediante una simple selección masal, es decir eligiendo para semilla de la cosecha siguiente aquellas mazorcas que presentaban características deseables.

Los pasos seguidos por los indios en alcanzar la productiva especie encontrada por Colón y el tiempo que emplearon en ello pertenecen al terreno de la conjetura y no se discutirán aquí. A partir del descubrimiento de los experimentos de Mendel, y con ello el nacimiento de la genética, se desarrolló lo que podríamos llamar la mejora vegetal científica y aparecieron numerosos métodos de mejora, siendo el maíz, por su importancia económica en EE.UU., una de las culturas en las que se desarrollaron la mayoría de los métodos de mejora de especies alógamas. En lo que sigue, me detendré únicamente en una breve exposición de algunos métodos ya que una descripción, aún somera de todos, sería imposible.

a. Selección masal

La selección masal por rendimiento de grano puede hacerse de numerosas formas, todas ellas consistiendo, en esencia, en la recolección de semilla en masa de varias plantas. Aún hoy la selección masal sigue siendo empleada en España por aquellos agricultores (fundamentalmente en el Norte y Noroeste) que todavía cultivan variedades de polinización libre. El agricultor elige en su almacén las mejores mazorcas para su uso como semilla de la cosecha siguiente. Una consecuencia inmediata de este método de selección es la falta de prolificidad de estas variedades: las mejores mazorcas proceden, normalmente, de plantas con una sola espiga. Por otra parte, en muchos casos el número de mazorcas seleccionadas es pequeño, lo que origina en pocos años un aumento considerable de la consanguinidad en la variedad con la consiguiente disminución de rendimiento que ello conlleva. A ello hay que añadir la baja heredabilidad del carácter «rendimiento de grano». Por todo ello, la selección masal no se considera un método efectivo para la mejora del este carácter.

La selección masal sí puede ser útil, en cambio, para caracteres que tienen una heredabilidad alta como, por ejemplo, fecha de floración. Con este método se llevó a cabo un programa de selección durante 18 ciclos en la Misión Biológica de Galicia para disminuir los días que median entre la siembra y la floración en dos poblaciones muy tardías ('Purdue Synthetic A o2' y 'Purdue Synthetic B o2') para las condiciones de Pontevedra. La selección por floración temprana fue muy efectiva en ambas poblaciones: 1,01 días de adelanto en la floración por cada ciclo de selección (Ordás et al. 2019).

b. Maíz híbrido

Ya en el siglo XIX se conocía la existencia del vigor híbrido, no sólo al cruzar especies distintas entre sí sino también al cruzar diferentes variedades de la misma especie. Darwin llegó a la conclusión de que el cruzamiento es beneficioso, en tanto que la autofecundación era perjudicial. Trabajando con maíz fue el primer investigador que presentó mediciones precisas de la respuesta a la consanguinidad y a la exogamia. Otros investigadores fueron avanzando a lo largo de los años en el conocimiento de los efectos de la autofecundación en el maíz y sentaron las bases para el desarrollo del maíz híbrido (Crow 1998).

Se llaman variedades híbridas aquellas en las cuales el producto comercial se obtiene a partir del cruzamiento de dos líneas puras (un híbrido simple), dos híbridos simples (cuyo resultado es lo que se conoce como un híbrido doble) o una línea pura y un híbrido simple (un híbrido de tres líneas). Inicialmente, dado que las primeras líneas puras tenían un rendimiento de grano muy pequeño, la producción de un híbrido simple era muy cara por lo que los primeros híbridos que se comercializaron

fueron los dobles. Posteriormente, cuando las líneas puras fueron más productivas, se empezaron a introducir los híbridos simples (más productivos que los dobles) y hoy prácticamente todos los híbridos cultivados en los países desarrollados son simples.

Una línea pura es un genotipo homocigótico. En todos los casos, dado que un híbrido simple es el resultado del cruzamiento de dos líneas puras, la obtención de estas últimas es el primer objetivo de un programa de selección de híbridos. Para la obtención de líneas puras hay dos métodos: selección genealógica y dobles haploides.

b.1. Selección genealógica

Como se ha mencionado anteriormente, el maíz es una especie alógama, es decir de fecundación cruzada. En otras palabras, una espiga es fecundada normalmente por polen procedente de otras plantas. Esto es consecuencia de dos hechos: el ser una especie monoica (las flores masculinas y femeninas están separadas espacialmente dentro del mismo individuo) y protándrica (el polen madura antes que los estigmas). Si se fuerza la autofecundación se obtiene, en pocas generaciones, una notable disminución del vigor y tras cinco o seis generaciones de autofecundación se consiguen plantas con un elevado nivel de consanguinidad (superior al 90%). Estas plantas (o líneas puras) son de talla reducida, poco vigorosas y extremadamente uniformes. Cuando dos líneas puras se cruzan entre sí, se restaura el vigor (es el fenómeno de la heterosis) y se obtiene lo que comúnmente se denomina un híbrido simple (figura 8). Estos híbridos simples son, además, muy uniformes (figura 9) en comparación con las variedades de polinización libre (figura 10), lo que facilita enormemente la mecanización de su cultivo.



Figura 8. Mazorcas de un híbrido simple muy productivo (B73 × Mo17).



Figura 9. Plantas de un híbrido simple en que se puede apreciar su gran homogeneidad.



Figura 10. Variedad de polinización libre mostrando su gran heterogeneidad.

Originalmente, la fuente de líneas puras en Estados Unidos (país en el que comenzó la obtención de híbridos de maíz) fueron las variedades de polinización libre cultivadas por los agricultores. Durante las generaciones de autofecundación se ejerce selección sobre caracteres agronómicos favorables tales como maduración temprana, resistencia al encamado, resistencia a enfermedades y plagas, buena conformación de la mazorca, etc. También se presta alguna atención al rendimiento, dado que una línea pura productiva reducirá el coste de obtención de la semilla comercial.

Las primeras líneas puras se obtuvieron a partir de las variedades de polinización libre cultivadas por los agricultores. Ordás (2016) expone el papel de las variedades locales en la obtención de líneas puras de maíz, con especial énfasis en los trabajos realizados en España. En aquellos primeros tiempos se obtuvieron muchísimas líneas, pero solo unas pocas han tenido importancia histórica en la mejora del maíz: WF9, 38-11, C103, Oh40B, I205, 197-2, EP1, F2, F7... La obtención de líneas puras a partir de la autofecundación durante 5–7 años de las variedades de polinización libre era el único método disponible al comienzo del sistema de mejora destinado al desarrollo de híbridos. Sin embargo, con este método el porcentaje de éxito es muy escaso por la gran proporción de genes desfavorables que portan tales variedades. Cuando el programa está más avanzado se recurre a otras

fuentes más eficaces tales como F_1 's, poblaciones de base estrecha, etc. Es importante resaltar que para la obtención de todas esas líneas se empleó sólo una pequeña muestra del germoplasma disponible, fundamentalmente las variedades Reid y Lancaster en EE.UU. (ambas pertenecientes a la raza Corn Belt Dent) y el germoplasma «liso europeo» en Europa.

Las líneas obtenidas por este método de autofecundación durante varias generaciones nunca son completamente homocigóticas ya que siempre presentan una heterocigosis residual (por ejemplo, del 6,25% en la F_5), si bien esto no suele ser ningún problema a la hora de conseguir superar los controles de homogeneidad impuestos por los servicios oficiales de semillas de los distintos países. Este método de obtención de líneas puras tiene el inconveniente de su lentitud ya que se requieren bastantes generaciones para obtener una línea con un grado alto de homocigosis. Se pueden hacer dos generaciones anuales de autofecundación si se dispone de criaderos de invierno, pero esto solo sirve para material precoz ya que, aparte del tiempo que la planta está en el campo, hay que considerar que el proceso de envío de la semilla exige un tiempo para el transporte de la misma entre Europa y América del Sur, así como para satisfacer una serie de requisitos burocráticos que consumen, en ocasiones, mucho tiempo.

b.2. Dobles haploides

Debido a los inconvenientes apuntados anteriormente, está cobrando gran importancia la obtención de líneas puras a partir del método de dobles haploides. De hecho, es seguramente el sistema más empleado (sino el único) por las compañías de semillas en la actualidad. En Betrán et al. (2004) y Bernardo (2014) se puede ver una descripción bastante clara y detallada del método.

Tres son los métodos que se usan para obtener dobles haploides en diversas especies, principalmente cebada, canola, trigo y maíz: cultivo de anteras, eliminación cromosómica e inductores de haploidía. Este último método es el que se emplea habitualmente en maíz. Un inductor de haploidía es una línea que produce un alto porcentaje de haploides cuando se cruza con una planta heterocigótica. Líneas inductoras conocidas son 'Stock 6', 'RWS', 'KEMS', 'UH400'... Los inductores de haploidía difieren en su eficacia para la inducción de haploides; también hay diferencias dependiendo del grupo de germoplasma que estemos empleando.

c. Selección recurrente

Con el sistema «líneas puras-híbridos» se logró un avance espectacular en relación a las variedades de polinización libre. Sin embargo, una vez alcanzada rápidamente la primera ganancia, los ulteriores aumentos de producción fueron mucho menores y más lentos. ¿A qué se debe esto? Supongamos, como punto de partida, que las líneas puras proceden de una variedad y que dichas líneas se cruzan al azar para producir híbridos simples, entre los cuales se practica realmente la selección. Si suponemos también que la obtención de las líneas se hace al azar, cada uno de los híbridos obtenidos será uno de los posibles genotipos existentes en la variedad origen y la probabilidad de obtener un determinado genotipo en la población formada por los híbridos simples será la misma que la probabilidad de este genotipo en la población origen. La obtención de líneas puras de una variedad, seguida de la producción de híbridos entre tales líneas, no es un método para crear genotipos nuevos. Conocemos, no obstante, que los mejores híbridos se obtienen mediante el cruzamiento de líneas procedentes de material genéticamente muy distinto. Supongamos, por tanto, que conseguimos una serie de líneas puras al azar de cada una de dos variedades y que estas líneas se cruzan, las de una variedad con las de la otra, también al azar. El genotipo de cada híbrido obtenido será uno de los posibles genotipos del cruzamiento de las dos variedades y, por otra parte, la probabilidad de que un genotipo aparezca en un híbrido entre líneas será la misma que cuando crucemos las variedades originarias de dichas líneas. Una vez más vemos que el sistema no genera nuevos genotipos. La

pregunta, entonces, es: ¿cuál ha sido la razón del éxito del sistema «líneas puras-híbridos»? La respuesta es sencilla: los genotipos producidos por el cruzamiento de líneas puras son fácilmente reproducibles. Añadamos, además, la precisión obtenida en los ensayos de rendimiento para identificar los mejores híbridos y la facilidad de explotación comercial, todo ello debido a la exacta reproducción de cada genotipo. Aunque en la variedad de polinización libre original fuésemos capaces de identificar el genotipo ideal, seríamos incapaces de mantenerlo debido al mecanismo reproductivo del maíz. La pregunta que surge a continuación es importante: una vez alcanzada la primera ganancia mediante el sistema «líneas puras-híbridos», ¿pueden conseguirse avances parecidos mediante ciclos sucesivos similares? La respuesta teórica, corroborada por la experiencia, es negativa. La razón es fácil de explicar. Supongamos que se extrae un nuevo grupo de líneas de las mismas poblaciones utilizadas anteriormente. Los híbridos que se obtengan serán otra muestra de la misma población, ya muestreada anteriormente. La clave está en que, al extraer muestras sucesivas de igual tamaño de la misma población, la probabilidad de contener los individuos más extremos es la misma para todas las muestras.

Nos encontramos, pues, con un problema en el sistema «líneas puras-híbridos». Una vez que se ha conseguido una gran ganancia inicial, los avances siguientes tienen que conseguirse a partir de cambios genéticos en las poblaciones base lo cual se puede conseguir mediante los diversos métodos de selección recurrente. Tal como su nombre indica, la selección recurrente implica el uso de métodos de selección que se ejecutan de una manera repetitiva. Independientemente del carácter que se trata de mejorar, la selección recurrente tiene siempre dos objetivos: (i) aumentar la frecuencia de los alelos favorables; (ii) mantener la variabilidad genética (Hallauer et al. 1988). En esta última referencia puede verse una completa descripción de los distintos métodos.

d. Sistema integrado

Un método eficaz de mejora, que trata de solventar todos los problemas expuestos a lo largo de los temas anteriores, fue propuesto por Eberhart et al. (1967) y lo podríamos denominar «sistema integrado». Este sistema comprende tres fases diferentes:

1ª Desarrollo de dos o (más poblaciones) que presenten una considerable heterosis al ser cruzadas y que posean una adecuada varianza aditiva.

2ª Selección continua de dichas poblaciones mediante un esquema de selección recurrente.

3ª Desarrollo de híbridos superiores en cada ciclo de selección mediante un procedimiento eficaz y sistemático.

El esquema es altamente flexible y apto para cualquier tipo de agricultura. En el caso de agriculturas poco desarrolladas, si no existe una infraestructura capaz de comercializar híbridos convencionales, se puede emplear como variedad comercial cualquiera de las poblaciones seleccionadas o el híbrido varietal entre ellas.

En la Misión Biológica de Galicia se comenzó en 1974 un programa de selección basado en este esquema. El primer paso para ello consistió en la búsqueda de las dos poblaciones base. Se eligieron poblaciones americanas y razas españolas. El muestreo del material americano se circunscribió al Norte del Corn Belt por ser éste el mejor adaptado a las condiciones de Galicia. Las poblaciones elegidas fueron dos antiguas variedades de polinización libre ('Minnesota No. 13' y 'Northwestern Dent') y dos variedades sintéticas ('AS-A' y 'AS-B') desarrolladas por la Universidad de Minnesota a partir de líneas puras precoces y de aptitud combinatoria superior (Peterson et al. 1976). Por parte española se escogieron cinco razas (Sánchez-Monge 1962) representantes de las principales zonas productoras de maíz: Galicia ('Gallego'), Cantábrico ('Norteño'), Valle del Ebro ('Rastrojero'), Levante ('Enano levantino/Hembrilla') y Andalucía ('Tremesino'). Con estas nueve poblaciones se planteó un dialelo, que se ensayó durante tres años en Pontevedra y Alcalá de Henares. Se tomaron

numerosos datos, si bien para la clasificación taxonómica se empleó únicamente el rendimiento. Normalmente el grado de similitud o disimilitud entre un grupo de objetos que se quieren clasificar se determina con medidas de las relaciones fenéticas basadas en la medición de un número de caracteres. La elección de caracteres es difícil y sujeta a controversia. El uso de la heterosis como medida de la disimilitud entre dos poblaciones soluciona los problemas mencionados (Ordás 1991).

Así, se construyó un árbol de cuyo análisis se deduce, en primer lugar, la existencia, de dos grupos de poblaciones claramente diferenciadas. Por una parte, forman un grupo muy afín las variedades que podríamos llamar del Sur de España (Rastrojero, Tremesino y Enano levantino/Hembrilla), muy separadas de las restantes. Dentro de estas últimas hay, a su vez, dos grupos: variedades americanas (Minnesota No. 13, AS-A y AS-B) y razas del Norte de España (Gallego y Norteño), con Northwestern Dent incluido con ellas (Ordás 1991). A la vista de estos resultados se formaron las poblaciones base del sistema integrado con únicamente germoplasma español buscando nuevos esquemas heteróticos. El patrón heterótico que se emplea es «germoplasma español del Norte × germoplasma español del Sur». La población del Norte (EPS6) se constituyó con las razas Gallego y Norteño, y las variedades gallegas de polinización libre Moeche y Tuy. La del Sur (EPS7) con las razas Enano levantino/Hembrilla, Rastrojero y Tremesino, a las que se añadió la variedad de polinización libre Amarillo temprano de Aragón, procedente del Valle del Ebro. Las poblaciones quedaron finalmente formadas en 1983.

Antes de comenzar la selección recíproca, dichas poblaciones fueron sometidas a tres ciclos de selección recurrente de líneas S1 para el rendimiento, carácter que mejoró significativamente con la selección (Vales et al. 2001). A continuación, se comenzó un programa de selección recurrente interpoblacional de hermanos completos, siguiendo el método de Hallauer (1973) para poblaciones no prolíficas. La evaluación de los tres primeros ciclos de selección mostró una notable ganancia en el comportamiento del híbrido interpoblacional (4,1%/ciclo) y en el de la población del Norte (6,7%/ciclo), mientras que la población del Sur no respondió a la selección (Romay et al. 2011). Actualmente (año 2023) nos encontramos en el desarrollo del ciclo séptimo de selección.

En la Estación Experimental de Aula Dei se llevó a cabo un esquema similar usando el patrón heterótico EZS1 × EZS2. El primer compuesto (EZS1), basado en germoplasma del Corn Belt, se constituyó con las poblaciones ‘AS-3(HT)C3’, ‘BS3’, ‘BS4’ y ‘BS17’. El compuesto EZS2 está formado por las poblaciones ‘Amarillo de Utrera’, ‘Fino’, ‘Hembrilla’ y ‘Hembrilla/Queixalet’; representa, pues, el germoplasma tardío de la zona seca española. La evaluación de los tres primeros ciclos de selección mediante el método de Hallauer mencionado en el párrafo anterior mostró un aumento significativo del rendimiento en los cruzamientos entre las poblaciones seleccionadas (3%/ciclo) así como en los cruzamientos de las poblaciones con probadores de distinto origen (Peña-Asín 2013).

2.7.5. Tipos especiales

En México, América Central y Sudamérica el maíz es un importante alimento humano; sin embargo, en los países desarrollados de la zona templada del planeta es concebido habitualmente como un cultivo para producir grano destinado a la alimentación animal. No obstante, hay muchos otros usos distintos a éste. Una descripción detallada de tales usos puede verse en Hallauer (2004). Aquí nos detendremos únicamente en presentar brevemente algunos tipos destinados a la alimentación humana.

2.7.5.1. Maíz dulce

Aunque en los últimos años se han empleado otros mutantes con el mismo fin (más adelante veremos brevemente dichos mutantes), maíz dulce era inicialmente material homocigótico para el gen *su1*.

Este gen tiene una doble acción. Por una parte, detiene la conversión de parte del azúcar en almidón; como consecuencia de ello el endospermo del maíz dulce tiene un contenido de azúcares (sacarosa, fundamentalmente) del doble al triple en relación al contenido del maíz *normal*. Una segunda acción de este alelo es que provoca la acumulación de fitoglucógeno (un polisacárido soluble en agua) en el grano.

a. Historia

Los indios americanos, aunque estimaban notablemente el maíz tierno, no empleaban el maíz dulce para este propósito; sí lo usaban, en cambio, desgranado y seco en algunas ceremonias. El maíz dulce, tal como se usa hoy en el mundo occidental, es un desarrollo del hombre blanco y, más concretamente, de los agricultores del este norteamericano de los siglos XVIII y XIX.

Según la leyenda, el maíz dulce fue introducido en 1779 entre los colonos de Nueva Inglaterra con el nombre de maíz «papoon» por el teniente Richard Bagnal, quien, al volver de la expedición del General Sullivan contra las Seis Naciones (una confederación de pueblos iroqueses), trajo consigo algunas mazorcas de dicho maíz. El maíz «papoon» fue cultivado privadamente entre 1779 y 1828. La primera variedad con nombre propio (Darling's Early) apareció en 1844 y fue producida cruzando maíz dulce (probablemente la variedad traída por Richard Bagnal) con maíz normal. Otra primitiva variedad (Old Colony) fue producida de un modo similar.

A partir de estas primeras variedades de maíz dulce, y mediante cruzamiento de ellas con variedades indias, se obtuvieron cientos de cultivares. En el momento de comenzar los primeros trabajos de autofecundación y desarrollo de híbridos había aproximadamente 180 variedades blancas de polinización libre y 50 amarillas, si bien muchos de los nombres se referían a una misma variedad. En el siglo XIX el endospermo amarillo se consideraba desventajoso (Singleton 1944). La variedad amarilla Golden Bantam, introducida hacia 1900, hizo, por sus excepcionales cualidades, que las preferencias de los consumidores cambiaran radicalmente. En esa época esta variedad era cultivada por un jardinero de Greenfield, Massachussets, sin saberse con certeza nada de tiempos anteriores. Se cree que probablemente procede del cruzamiento de una variedad llamada Sweet Orange con Black Mexican (Jones y Singleton, 1931). Después de que el Golden Bantam se popularizara, se hizo sentir la necesidad de variedades amarillas, en primer lugar, tardías, y así aparecieron Golden Giant, Bantam Evergreen, Whipples Yellow y, posteriormente, precoces desarrollándose, en consecuencia, Banting, Extra Early Bantam, Golden Sunshine, Burpee, Golden Early Market, Gold Coin, Golden Dawn, Golden Gem y muchas otras.

Los primeros programas de autofecundación y cruzamiento comenzaron hacia 1920 en Indiana y Connecticut, siendo el director del primer programa G. Smith y del segundo D.F. Jones y R. Singleton. El primer híbrido cultivado extensamente fue Redgreen, desarrollado en Connecticut y entregado a la industria en 1924. El híbrido Golden Cross Bantam (cuya fórmula es 'P39 × P51', ambas líneas procedentes de la variedad Golden Bantam), puesto a disposición de los agricultores en 1933 por la Universidad de Purdue (Indiana), demostró su superioridad sobre las variedades de polinización libre tras unas tremendas epidemias de marchitez bacteriana que tuvieron lugar en 1932 y 1933. Golden Cross Bantam mostró, en adición, gran capacidad productiva y una excelente calidad, por lo que su cultivo se extendió con gran rapidez y sirvió, además, para que los híbridos se popularizaran rápidamente. Posteriormente se establecieron otros programas de hibridación en diversas estaciones experimentales de los Estados Unidos y Canadá y, como resultado de ellos se obtuvieron numerosos híbridos de fórmula abierta.

En los últimos años los centros públicos canadienses y norteamericanos (salvo la Universidad de Wisconsin) han ido abandonando la obtención de híbridos de interés comercial como línea prioritaria

de investigación (labor que realizan eficazmente las compañías de semillas) y dedican ahora sus esfuerzos al desarrollo de nuevo germoplasma, a estudios básicos de mejora y a la introducción de genes en las líneas establecidas. Otra tendencia es el abandono, aunque no total, del gen *su1* como sinónimo de «maíz dulce». En la actualidad la mayoría del maíz dulce que se cultiva con fines industriales pertenece a los tipos «dulce mejorado», «súper dulce» y otros. Una completa revisión de la situación de la mejora del maíz dulce en los últimos años puede verse en Revilla et al. (2021).

b. Usos

El maíz dulce se cultiva actualmente para uno de los usos siguientes:

- Enlatado o congelado industrial
- Hortaliza de estación en los mercados locales y de carretera
- Huertos familiares

Las características que se le exigen al cultivo varían en función del procesamiento que vaya a seguir la cosecha. Para la industria congeladora es fundamental la forma de la mazorca, así como su uniformidad y el dulzor, color y textura del grano. Para enlatar, las características deseadas son muy similares. En cambio, el factor fundamental en el consumo en fresco es el sabor. Cuando el producto tiene que viajar hasta un mercado más o menos lejano es preciso que la cosecha presente la mayor uniformidad posible, así como que tenga la propiedad de mantener el dulzor y una textura adecuada por un cierto tiempo.

2.7.5.2. Maíz de palomitas

El centro de origen del maíz de palomitas, palomero, reventador, rosero, saltador o «popcorn», que todos estos nombres tiene, parece ser América Central y del Sur. El principal carácter que separa el maíz de palomitas de los restantes tipos de maíz es la formación de grandes copos cuando los granos revientan como respuesta al calor, apareciendo la típica estructura de «roseta» o «palomita». Hay tipos de maíz liso y dentado que también revientan cuando se les aplica calor, pero las palomitas son muy pequeñas en comparación con las que forma el típico maíz palomero.

La planta de maíz saltador es muy similar a la de maíz liso o dentado, con algunas diferencias. Generalmente las ramas laterales del pendón tienden a colgar, lo que confiere a la planta un aspecto peculiar, aunque tal aspecto se encuentra también en ocasiones en los otros tipos de maíz. Una característica bastante típica del maíz de palomitas es su prolificidad, con mazorcas lógicamente mucho más pequeñas que las correspondientes del maíz «normal», así como la posesión de tallos bastante delgados, por lo que se encama más que el maíz dentado y el liso. La principal diferencia, no obstante, entre estos tipos de maíz y el reventador radica en la estructura interna del grano. El grano del maíz de palomitas carece prácticamente de almidón blando, frente al liso que tiene siempre una cierta cantidad de este tipo de almidón rodeando el embrión, y frente al dentado, caracterizado porque el almidón blando ocupa toda la parte central del endospermo.

Desde el punto de vista de la forma del grano, el maíz de palomitas se divide en dos grandes grupos: tipo arroz y tipo perla. El primero se caracteriza por granos alargados y de forma puntiaguda. El segundo es redondeado. Generalmente se ha asociado el tipo arroz al color blanco y el perla al amarillo, pero hay variedades de tipo arroz de color amarillo y viceversa. Hay otros tres tipos adicionales: Jap Hulless, con una mazorca corta y gruesa y granos estrechos y alargados; Lady Finger, con numerosas mazorcas muy pequeñas; y Eight Row, que es en realidad un maíz liso (Brunson 1955). El mercado actual se inclina por las variedades amarillas de tipo perla.

La mejora del maíz reventador no difiere, en general, de la mejora de los otros tipos de maíz. Únicamente hay que tener en cuenta que el principal carácter que se tiene en cuenta en su mejora es la capacidad de expansión, así como la forma de la palomita, que puede ser mariposa o champiñón, y el sabor, aunque este último carácter es muy difícil de evaluar (también es cierto que no suele haber diferencias importantes entre unas variedades y otras).

La capacidad de expansión se expone como volumen de maíz expandido (expresado en centímetros cúbicos) por gramo de grano. Actualmente no se admite una capacidad de expansión inferior a 40 cm³/g. Un factor crítico es la humedad del grano: los valores óptimos para una máxima expansión están entre 13,5 y 14,0%; como se ve, un intervalo muy estrecho. Un aumento o una disminución de un uno por ciento de humedad hace caer la capacidad de expansión de forma drástica.

Las palomitas tipo mariposa son de forma irregular, con numerosas alas en todas las direcciones. Estas rosetas se asocian habitualmente con blandura y ausencia de cáscara y suelen ser las preferidas por los consumidores. Sin embargo, tienen el inconveniente de que no soportan mucho la manipulación porque las palomitas se rompen fácilmente, lo que hace que este tipo no sea del agrado de los vendedores, que prefieren el otro tipo: las palomitas champiñón, especialmente los que procesan las palomitas para añadirle algún sabor especial. Las rosetas del tipo champiñón son redondas, con muy pocas alas por lo que soportan mejor la manipulación. Los dos tipos de palomitas están controlados genéticamente, pero también están influidos por el modo de cultivo y el sistema de producción (Hallauer 2004).

Otro aspecto que hay que tener en cuenta es que en muchas zonas el comportamiento agronómico del maíz palomero es inferior al del dentado o liso debido a tres razones: los esfuerzos dedicados a la mejora del maíz de palomitas han sido mucho menores que los que se han dedicado a la mejora del maíz liso y, sobre todo, del dentado; el germoplasma base del popcorn es inferior, agronómicamente hablando, al liso y al dentado; finalmente, en la mejora del maíz de palomitas se ha prestado más atención a la calidad que a las cualidades agronómicas.

Hacia el final del siglo XIX, cuando el maíz de palomitas se convirtió en un cultivo comercial en los EE.UU., las variedades más importantes eran Japanese Hulless, White Rice, Queen's Golden, Spanish, Superb y Tom Thumb. Cuando en los años 30 empezaron a aparecer los primeros híbridos de maíz reventador, las líneas que los formaban estaban basados en aquellas variedades. La mayoría de las líneas puras hoy en día proceden de las variedades Supergold, South America, Amber Pearl, Ohio Yellow, White Rice y Japanese Hulless. Además de las líneas derivadas de esas variedades, también se ha empleado maíz dentado como fuente de buenas características agronómicas. En la actualidad existen poblaciones sintéticas desarrolladas por las Universidades de Iowa, Nebraska y Purdue, que son excelentes fuentes de nuevas líneas puras.

La mejora del maíz de palomitas usa los mismos métodos que cualquier otro tipo de maíz. Se han detectado tres grupos heteróticos: Amber Pearl, South American y Supergold; las poblaciones del grupo Amber Pearl están asociadas con el grupo Stiff Stalk (Reid) de maíz grano dentado y las de los otros dos grupos con el Non-Stiff Stalk (Blanco et al. 2005).

Un híbrido clásico es Iopop 12, cuya fórmula es '(DS69 × DS91) × DS28'. Se trata, pues, de un híbrido de tres líneas. DS69 y DS91 son South American mientras que DS28 es Amber Pearl. La práctica totalidad de los híbridos cultivados actualmente son simples.

Otro factor que hay que tener en cuenta es la necesidad de que cualquier línea pura nueva sea homocigótica *Ga1S Ga1S*. Este alelo, que de modo natural suele estar en homocigosis en todo el maíz de palomitas, impide que el polen de maíz liso o dentado pueda emitir el tubo polínico. Así se

garantiza la pureza de la producción de semilla, especialmente en los EE.UU. donde la producción de semilla de maíz palomero suele hacerse en las mismas áreas que la del maíz dentado. A pesar de la generalidad de la presencia de este alelo en las variedades palomeras, es necesario comprobar su existencia para evitar sorpresas desagradables.

2.7.5.3. Maíz harinero

En las zonas templadas del planeta el maíz grano es, ante todo, un cultivo para producir pienso. Su uso como alimento humano es muy reducido. Sin embargo, no siempre ha sido así. En concreto, en el norte y noroeste de la Península Ibérica el grano de maíz se ha usado para producir harinas que se usaban para la fabricación de pan. Este pan es cada vez más apreciado por los consumidores de esta zona (pan de «broa» en Galicia y Asturias, y «talo» en el País Vasco son algunos de los nombres con que se conoce este pan). Sin embargo, las antiguas variedades de maíz específicamente seleccionadas para esos usos han sido reemplazadas por híbridos con mayor rendimiento y menor calidad harinera. Además, el maíz disponible procede de agricultura intensiva, donde se usan herbicidas, insecticidas y otros productos potencialmente peligrosos para la salud. La producción ecológica de variedades tradicionales de maíz para consumo humano puede ser una alternativa útil para la producción de este pan, así como para satisfacer las demandas de los consumidores.

En la Misión Biológica de Galicia se ha evaluado un conjunto de variedades autóctonas en condiciones de agricultura ecológica, así como la calidad panificable de las variedades con mayores rendimientos. Se identificaron cuatro variedades autóctonas con el mayor valor agronómico en condiciones de agricultura ecológica y calidad satisfactoria para hacer pan de maíz y otros alimentos tradicionales de maíz: ‘Tuy’ (grano amarillo y ciclo medio), ‘Sarreaus’ (grano amarillo y temprana), ‘Meiro’ (grano negro y tardía), y ‘Rebordanes’ (grano blanco y ciclo medio) (Revilla et al, 2008). También se ha estudiado el efecto de las condiciones de cultivo sobre su comportamiento en condiciones ecológicas, así como la influencia del almacenamiento sobre la calidad del grano (Revilla et al. 2012).

3. Referencias

- Alvarez A, Lasa JM. 1987a. Asturian populations of maize. I. Morphological-vegetative description and variability. *Anales de Aula Dei* 18:177–186.
- Alvarez A, Lasa JM. 1987b. Asturian populations of maize. II. Numerical taxonomy based on quantitative traits. *Anales de Aula Dei* 18:187–197.
- Alvarez A, Lasa JM. 1990a. Populations of maize from Cantabria. I. Morphological evaluation and variability. *Anales Aula Dei* 20:41–49.
- Alvarez A, Lasa JM. 1990b. Populations of maize from Cantabria. II. Numerical taxonomy based on quantitative traits. *Anales de Aula Dei* 20:51–58.
- Andersson E, Cutler HC. 1942. Races of *Zea mays*: I. Their recognition and classification. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 29:69–89.
- Bernardo R. 2014. *Essentials of plant breeding*. Stemma Press, Woodbury, Minnesota, EE.UU.
- Betrán FJ, Menz M, Bänziger M. 2004. Corn breeding. En: Smith CW, Betrán J, Runge ECA (eds.) *Corn: History, technology, and production*, 305–398. Wiley, EE.UU.
- Blanco MH, Gardner CAC, Salhuana W, Shen N. 2005. Germplasm enhancement of maize project (GEM): derived varieties. March 7–8, 2005, Champaign, Illinois, 41st Annual Illinois Corn Breeders School, 22–41.
- Brunson AM. 1955. En: Sprague GF (Ed.) *Corn and corn improvement*, 423–440. Academic Press, Inc. Nueva York, EE.UU.
- Crow JF. 1998. 90 years ago: The beginning of hybrid maize. *Genetics* 148: 923–928.
- Doebly J. 1990. Molecular evidence and the evolution of maize. *Econ Bot* 44 (3 suppl): 6–27.

- Eberhart SA, Harrison MN, Ogada F. 1967. A comprehensive breeding system. *Züchter* 37: 169–174.
- Hallauer AR. 2004. Specialty corns. En ç: Smith CW, Betrán J, Runge ECA (Eds.) *Corn: origin, history, technology and production*, 897-933. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, EE.UU.
- Hallauer AR, Russell WA, Lamkey KR. 1988. Corn breeding. En: Sprague GF, Dudley JW (eds.) *Corn and corn improvement*, 3^a ed. *Agronomy* 18: 463–564.
- Iltis HH, Doebley JF. 1980. Taxonomy of *Zea* (Gramineae). II. Subspecific categories in the *Zea mays* complex and a generic synopsis. *American Journal of Botany* 67:994–1004.
- Llauradó M, Moreno-González J. 1993. Classification of Northern Spanish populations of maize. I. Morphological data. *Maydica* 38: 15–21.
- Llauradó M, Moreno-González J, Arús P. 1993. Classification of Northern Spanish populations of maize. II. Isozyme variation. *Maydica* 38: 249–258.
- MAPA. 2021. Anuario de Estadística 2021. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Ordás A. 1991. Heterosis in crosses between American and Spanish populations of maize. *Crop Science* 31: 931–935.
- Ordás A. 1993. Perspectiva histórica de los maíces híbridos en Galicia. En: Barrecheguren MA, Cabrero M, Collar J, Moreno J, Santaolalla G, Zea J (eds.). 100 años de investigación agraria 1888-1988, 189-195. Vol. II. Xunta de Galicia, España.
- Ordás A. 2016. Maíz. En: Ruiz de Galarreta JI, Prohens J, Tierno R (eds.) *Las variedades locales en la mejora genética de plantas*, 133–154. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco, Vitoria-Gasteiz.
- Ordás A, Malvar RA, Ron AM De. 1987. Heritability of several traits in an early population of maize. *Anales de Aula Dei* 18:171–176.
- Ordás A, Malvar RA, Ron AM. 1994. Relationships among American and Spanish populations of maize. *Euphytica* 79:149–161.
- Ordás B, Revilla P, Romay MC, Malvar RA, Butrón AM. 2019. Eighteen cycles of recurrent mass selection for early flowering in two maize synthetics. *Euphytica* 215: 49.
- Peña-Asín J, Álvarez A, Ordás A, Ordás B. 2013. Evaluation of three cycles of full-sib reciprocal recurrent selection in two maize populations from the Northeast of Spain. *Euphytica* 191: 301–310.
- Pérez García XM. 1982. O millo en Galicia: un estado da cuestión. *Revista Galega de Estudos Agrarios* 7/8: 87–104.
- Peterson RH, Geadelmann JL, Rinke EH, Sentz JC. 1976. Registration of six maize germplasm populations. *Crop Science* 16: 605–606.
- Revilla P, Landa A, Rodríguez VM, Romay MC, Ordás A, Malvar RA. 2008. Maize for bread under organic agriculture. *Spanish Journal of Agricultural Research* 6: 241–247.
- Revilla P, Landa A, Rodríguez A, Ordás A, Malvar RA. 2012. Influence of growing and storage conditions on bakery quality of traditional maize varieties under organic agriculture. *Crop Science* 52: 593–600.
- Revilla P, Anibas CM, Tracy WF. 2021. Sweet corn research around the World 2015–2020. *Agronomy* 11: 534.
- Romay MC, Ordás B, Revilla P, Ordás A. 2011. Three cycles of full-sib reciprocal recurrent selection in two Spanish maize populations. *Crop Science* 51: 1016–1022.
- Ruiz de Galarreta JI, Alvarez A. 1990. Guipuzcoan populations of maize. I. Morphological evaluation and correlation between quantitative traits. *Anales de Aula Dei* 20: 27–39.
- Sánchez-Monge E. 1962. Razas de maíz en España. Ministerio de Agricultura. Madrid.
- Sánchez-Monge E. 1969. La saga del “Cachirulo”. *Anales de Aula Dei* 10: 795–799.
- Smith JS, Trevisan W, McCunn A, Huffman WE. 2022. Global dependence on Corn Belt Dent maize germplasm: Challenges and opportunities. *Crop Science* 62: 2039–2066.
- Sturtevant EL. 1899. Varieties of corn. USDA. Office of Experimental Station Bulletin 57. U.S. Gov. Print. Office. Washington DC, EE.UU.
- Vales MI, Malvar RA, Revilla P, Ordás A. 2001. Recurrent selection for grain yield in two Spanish maize synthetic populations. *Crop Science* 41: 15–19.

- Watson SA. 1987. Structure and composition. En: Watson SA, Ramstad PE (Eds.) Corn chemistry and technology, 53–82. American Association of Cereal Chemists Inc. Saint Paul, EE.UU.
- White MR, Mikel MA, de Leon N, Kaeppler SM. 2020. Diversity and heterotic patterns in North American proprietary dent maize germplasm. *Crop Science* 60: 100–114.
- Zuber MS, Darrah LH. 1987. Breeding, genetics, and seed corn production. En: Watson SA, Ramstad PE (eds.) Corn chemistry and technology, 31–51. American Association of Cereal Chemists Inc. Saint Paul, EE.UU.