# **ÍNDICE GENERAL**

ÍNDICE GENERAL	1
ÍNDICE DE CUADROS	4
ÍNDICE DE FIGURAS	5
I. INTRODUCCIÓN	7
II. OBJETIVOS	10
III. REVISIÓN DE LITERATURA	11
Origen del Maíz	11
Domesticación del maíz	12
Descripción del maíz	12
Principales razas de maíz	13
Tipos de maíz	13
Duro	14
Reventón	15
Dentado	15
Ceroso	15
Opaco 2 y QPM	16
Maíz dulce	16
Maíz normal para consumo tierno (jojoto)	16
Mazorcas (jojotos chinos)	17
Importancia del maíz	17
Ambientes de producción de maíz en los trópicos	18
Zonas y agroclimas de producción maíz en Venezuela	19
Desarrollo del maíz	20
Fase vegetativa	20
Fase reproductiva	21
Fase de Llenado de Grano	24
Grano de maíz descripción general	25
Pericarpio	25
Aleurona	26
Embrión	26
Pedicelo	27
Endospermo	27
Desarrollo	28

Biosíntesis de almidón en el endospermo	29
Estructura y composición del almidón	31
Lípidos	32
Proteínas	34
Cuerpos proteícos	34
Papel del almidón y las proteínas en la textura del grano de maíz	36
Molienda seca de maíz	37
Determinación de la dureza del grano de maíz	42
Densidad del grano	44
Grietas por estrés y ruptura de grano	44
Dureza del grano y vitreosidad	45
Factores que afectan la dureza del grano	48
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	51
Materiales	51
Ambientes	51
Diseño experimental y manejo agronómico	52
Acondicionamiento de la muestra	53
Humedad	53
Proteína	53
Grasa	53
Peso específico (PE)	53
Peso de 100 granos (P100)	54
Perfil amilográfico	54
Rendimiento de endospermo (RE)	55
Granulometría del endospermo	56
Análisis de los resultados	56
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	58
Caracterización la dureza de grano en maíces cultivados en tres zonas	
productoras de Venezuela	58
Evaluación del nivel de asociación de diferentes métodos de	
determinación de dureza de grano y su potencial para estimar el	
rendimiento industrial de los maíces nacionales	62
Evaluación de métodos de determinación de dureza	62
Correlaciones entre los métodos de dureza de grano	65

Regresiones lineales de las variables de dureza de grano frente al	
rendimiento de endospermo	68
Efectos del genotipo y el ambiente sobre las variables de dureza de	
grano	73
Efecto de algunas variables climáticas sobre los indicadores de dureza	
de grano	89
VI. CONCLUSIONES	100
VII. RECOMENDACIONES	102
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103

## **ÍNDICE DE CUADROS**

1. Perfil amilográfico utilizado en la evaluación del grano	55
2. Promedios por genotipo y ambientes de las variables de dureza de grano	59
3. Estadística descriptiva de las variables asociadas a la dureza del grano de	
maíz	64
4. Correlaciones de las diferentes variables de dureza de grano	66
5. Regresiones del rendimiento de endospermo mediante diferentes variables	
de dureza de grano	69
6. Regresiones del rendimiento de endospermo mediante diferentes variables	
de viscoamilografía	70
7. Significación de los cuadrados medios de las variables físicas asociadas a	
la dureza del granos en genotipos de maíz cultivados en Venezuela	73
8. Comparación de medias para variables asociadas a la dureza de granos	77
9. Significación de los cuadrados medios de las variables amilográficas de	
genotipos de maíz cultivados en Venezuela	82
10. Comparación de medias de variables del perfil amilográfico de maíces	
cultivados en tres ambientes	87
11. Correlaciones de las variables de dureza vs. variables climáticas durante	
el desarrollo del grano	90

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

1. Tipos de maíz en base a su apariencia	14
Desarrollo del gametofito masculino del maíz	22
3. Desarrollo del gametofito femenino del maíz	23
4. Sección longitudinal de un grano de maíz maduro	26
5. Microscopía (x6000) endospermo de maíz normal	28
6. Modelo de racimo del almidón	32
7. Micrografía electrónica de gránulo de maíz	33
8. Desarrollo del cuerpo proteíco del endospermo	36
9. Desgerminador de maíz Beal	40
10. Desgerminador de maíz Bulher MKDA	41
11. Desgerminador de maíz Satake VBF10A	42
12. Esquema de molienda seca para endospermo de maíz	43
<ul><li>13. Secuencia de los ensayos de dureza aplicados a las muestras de maíz</li><li>14. Promedios de rendimiento de endospermo (%) en genotipos de maíces</li></ul>	54
cultivados en tres ambientes	74
15. Promedios de partícula de endospermo +3,35 mm en genotipos de maíces	70
cultivados en tres ambientes	78
16. Promedios de partícula de endospermo +2 mm en genotipos de maíces	70
cultivados en tres ambientes	79
17. Promedios de partícula de endospermo +1,4 mm en genotipos de maíces	
cultivados en tres ambientes	80
18. Promedios de partícula de endospermo -1,4 mm en genotipos de maíces	
cultivados en tres ambientes	80
19. Promedios de viscosidad a 72,50°C del perfil amilográfico de genotipos de	
maíces cultivados en tres ambientes	83
20. Promedios de viscosidad a 74,75°C del perfil amilográfico de genotipos de	
maíces cultivados en tres ambientes	84
21. Promedios de viscosidad a 77,0°C del perfil amilográfico de genotipos de	
maíces cultivados en tres ambientes	84
22. Promedios de viscosidad final del perfil amilográfico de genotipos de maíces	
cultivados en tres ambientes	85
23. Comportamiento amilográfico de maíces con diferentes valores de dureza	88

24. Promedio de precipitación diaria durante la maduración de los granos en tres	
localidades	90
25. Precipitación acumulada durante la maduración de los granos en tres	
localidades	91
26. Temperatura promedio diaria durante la maduración de los granos en tres	
localidades	92
27. Temperatura máxima diaria durante la maduración de los granos en tres	
localidades	93
28. Temperatura mínima diaria durante la maduración de los granos en tres	
localidades	94
29. Rango de temperatura diaria durante la maduración de los granos en tres	
localidades	94
30. Humedad promedio diaria durante la maduración de los granos en tres	
localidades	95
31. Humedad máxima diaria durante la maduración de los granos en tres	
localidades	97
32. Humedad mínima diaria durante la maduración de los granos en tres	
localidades	97
33. Rango de humedad diaria durante la maduración de los granos en tres	
localidades	98
34. Radiación promedio diaria durante la maduración de los granos en tres	
localidades	99

## I. INTRODUCCIÓN

En Venezuela el maíz representa la principal fuente calórica en la dieta de sus habitantes (INN, 2007) y constituye el rubro agrícola de mayor producción y superficie cosechada. Durante el año 2007 se produjeron unas 2.570.869 toneladas en 740.372 hectáreas (FEDEAGRO, 2008). El consumo promedio de maíz de los venezolanos es de aproximadamente 32,5 Kg per cápita año (INN, 2007) y se realiza a partir de diferentes alimentos elaborados de harina de endospermo, siendo la "arepa" el más popular (Cartay, 2000; Serna-Saldívar et al., 1993). La industria nacional produce mayormente la harina de endospermo mediante el proceso de molienda seca, por lo que demanda cultivares de maíz de mayor dureza. Estos difieren del resto de los maíces por poseer un endospermo fuertemente empaguetado que no se disgrega durante la remoción mecánica de las otras fracciones del grano (pericarpio y germen) incrementando así el rendimiento de harinas cuando es procesado (Cartay, 2000). Los estándares de calidad de grano para la comercialización mundial del maíz son verificados por pruebas de laboratorio, los cuales proveen una referencia relativa de su comportamiento durante el procesamiento industrial (Grains Council U.S., 2006). En Venezuela la dureza del grano representa un factor de calidad normalizado y es determinada a partir del peso específico del grano durante la recepción del maíz en la industria (COVENIN, 1987). Durante muchos años diversos estudios han demostrado que además del peso específico, el rendimiento de endospermo "grit" (Grains Council U.S., 2006), la flotabilidad (Peplinski et al., 1989; McDonough et al., 2004), el peso de 100 granos (Kim, et al., 2002), la granulometría del endospermo (relación fino/grueso), la transmitancia de infrarrojo cercano (NIR) (Pomeranz et al., 1986; Robutti, 1995) y las propiedades funcionales de la harina de maíz por viscoamilografía (Almeida-Domínguez et al., 1997), son descriptores asociados a la dureza de grano.

La dureza del grano del grano de maíz difiere de acuerdo al cultivar y por ello, los programas de mejoramiento genético en muchos países incorporan los ensayos de dureza de granos de maíz como un criterio de selección para la obtención de cultivares óptimos para el procesamiento industrial de harinas (Robutti *et al.*, 2002). Lo anterior puede ser soportado en dos premisas la primera es que la selección de maíces basado solo en criterios agronómicos no garantiza la producción de maíces de alto rendimiento industrial. De hecho, existen maíces de altos rendimientos de campo (Kg/ha) pero de bajo potencial para la producción de harina de endospermo. Estos cultivares de maíz producen

pérdidas importantes en la industria y probablemente su participación en el mercado nacional sea muy limitada. La otra premisa radica en el aseguramiento de las características de dureza de los cultivares dentro del esquema de mejoramiento genético, debido a que maíces que han sido promocionados como de alta dureza para una zona específica no es garantía de que efectivamente mantiene este atributo para otras zonas de producción. Al respecto se ha demostrado que los parámetros de dureza pueden verse afectados además del cultivar, por la época y la zona de producción (Eyhérabide *et al.*, 2004).

La evaluación de la dureza en maíces venezolanos no ha sido abordada de manera extensa en lo referente al mejoramiento genético y no existen trabajos al respecto pese a la alta diversidad en las zonas de producción nacional. Otro aspecto de gran importancia para los programas de mejoramiento genético radica en la selección de un método rápido para la evaluación de dureza de grano, que permita discriminar los niveles de dureza del grano de diferentes maíces, además que sean rápidos, económicos y demanden un bajo tamaño de muestra. Por ejemplo, el rendimiento de endospermo es una variable que reproduce adecuadamente el rendimiento industrial de harinas de endospermo (Grains Council U.S., 2006). Sin embargo, este método de ensayo demanda de un tamaño de muestra de al menos 100 g y el tiempo de análisis por muestra es de unas cuatro horas.

En algunas fases de mejoramiento genético, sobre todo en etapas tempranas, se realiza selección a nivel de pocas plantas e incluso plantas individuales y no se dispone de un tamaño de muestra adecuado al método. Por otra parte, el número de maíces a evaluar es elevado y deben realizarse en tiempos relativamente cortos (cosecha-selección-próxima siembra). Con la caracterización de la dureza del grano de maíces venezolanos mediante métodos adecuados para los programas de mejoramiento se aseguraría la obtención de cultivares adaptados y de alta dureza a fin de mejorar la productividad de la industria nacional de harina de maíz y así la disponibilidad energética en la dieta.

Por lo anteriormente expuesto el presente estudio tiene como objeto caracterizar genotipos experimentales de maíz de un programa de mejoramiento genético a través de diferentes ensayos de dureza de grano, para evaluar su potencial industrial en molienda seca. Por otra parte, se persigue evaluar los métodos de determinación para los rangos

de dureza de los genotipos experimentales nacionales y finalmente evaluar el efecto del genotipo y el ambiente sobre las diferentes variables asociadas a la dureza de grano.

### **II. OBJETIVOS**

#### General

Caracterizar genotipos experimentales de maíz de un programa de mejoramiento genético a través de diferentes ensayos de dureza de grano, para evaluar su potencial de rendimiento de endospermo para la molienda seca.

## **Específicos**

Caracterizar la dureza de grano en genotipos experimentales de maíz cultivados en tres zonas productoras de Venezuela.

Evaluar el nivel de asociación de diferentes métodos de determinación de dureza de grano y su potencial para estimar el rendimiento de endospermo de los genotipos experimentales.

Evaluar el efecto del genotipo y el ambiente sobre las diferentes variables de dureza de grano en tres zonas de producción de maíz en Venezuela.

## III. REVISIÓN DE LITERATURA

### Origen del Maíz

El origen del maíz tiene elementos biológicos y arqueológicos. Existen dificultades de ambos campos para juzgar una evidencia de otra. Si se consideran la evidencia generada de investigaciones independientes de científicos formados como biólogos y donde se incluyen citología, genética, morfología, bioquímica, genética molecular, genética cuantitativa, genética de poblaciones, entre otras, todos están de acuerdo que el teosinte es el ancestro del maíz. (Bennetzen et al., 2001). Esta hipótesis fue propuesta hace 70 años, por George Beadle quien indicó que el teosinte (Zea species) fue el antecesor silvestre del maíz (la hipótesis del teosinte) (Beadle, 1939). No obstante, algunos autores han indicado que el maíz se originó de una progenie proveniente de un cruce entre especies teosinte (Zea diploperennis) y otras hierbas (tripsacum) (luego hipótesis tripsacum-diploperennis) (Mangelsdorf y Reeve 1939; Eubanks, 1995). Esta teoría ha sido rechazada debido a que el número de cromosomas de los híbridos putativos del cruce tripsacum-diploperennis son 2n=20, este es también el número de cromosomas tanto del maíz como el Z. diploperennis y por tanto el número que uno pudiera esperar en un híbrido maíz-diploperennis. Si el tripsacum (2n=36) ha sido uno de los padres, el híbrido tendría 28 o 46 cromosomas. (Bennetzen et al., 2001). Por otra parte, los resultados de marcadores moleculares presentados por Eubanks (1995) no establecen que los híbridos putativos de tripsacum-diploperennis son verdaderos.

A pesar de la evidencia descrita anteriormente MacNeish y Eubanks en el año 2000, usaron la hipótesis *tripsacum-diploperennis* como una plataforma para la reevaluación de la evidencia arqueológica del origen del maíz (MacNeish y Eubanks, 2000). Para ese momento y aún en la actualidad este estudio ha sido fuertemente cuestionado por los biólogos. Pese a estas discrepancias existentes entre las diferentes ramas de la ciencias, el consenso de la mayoría de los especialistas consideran que si existió un progenitor silvestre del maíz y que muy probablemente haya sido una o varias razas de *teosinte* (Bennetzen *et al.*, 2001; Beadle, 1972; Galinat, 1971).

Desde el punto de vista geográfico no ha sido posible determinar con precisión en cual región del continente americano tuvo origen el maíz. Diversos estudios de genetistas europeos, hispanos y de EE.UU., sugieren que es una planta originaria fundamentalmente de México (Guzmán, 1991). Otros investigadores sostienen que debido a la gran

diversidad de formas nativas encontradas, se cree que el maíz pudo originarse en los altiplanos del Perú, Bolivia y Ecuador (Díaz et al., 1974; Jugenheimer, 1990). En excavaciones arqueológicas y geológicas hechas en México se ha encontrado polen de maíz fosilizado con más de 80.000 años de antigüedad, así como de plantas de teosinte, tripsacum sp. y Euchlaena mexicana pertenecientes a la misma tribu del maíz (Guzmán, 1991).

En Venezuela las evidencias más antiguas de maíz lo ubican en Parmana al margen norte del Orinoco. Este se producía bajo inviernos secos alternados con veranos lluviosos a más de 1.500 metros sobre el nivel del mar. Una de las primeras especies identificadas fue la Onona o maíz de los dos meses (actualmente Aragüito) que fue cultivada por los Otomacos, Guamos y Páos (Nieves, 2008). Fray Antonio Caulin en 1979 señala las variedades cultivadas durante el siglo XVIII "Yucatán", blanco o amarillo, el "Cariaco", de grano blanco, el "Granadillo", de grano matizado blanco, rosado y amarillo y el "Amapo", variedad precoz. A los maíces "Cariaco" y "Granadillo" los indígenas los llamaban erepa (Cartay, 2000).

#### Domesticación del maíz

La domesticación del maíz ocurrió hace 5 mil años (Jugenheimer, 1990). Entre las plantas cultivadas, el maíz es la única que tiene un elevado nivel de domesticación, resultando en una especie totalmente dependiente del hombre, pues la transformación eliminó por completo las características ancestrales para su sobrevivencia en la naturaleza (Paterniani, 2000). La planta está sumamente especializada y no podría reproducirse por si misma sin ayuda del hombre. La mazorca está condicionada para producir elevados rendimientos de grano. Sin embargo, el cultivo carece de un mecanismo satisfactorio para dispersar la semilla y tiene escaso valor de sobrevivencia en la naturaleza. Por ejemplo, varias plántulas emergen cuando la mazorca cae al suelo. Estas plántulas compiten entre si por los nutrientes y la humedad del suelo y la mayoría muere antes del alcanzar la etapa de reproducción (Jugenheimer, 1990). Algunas de las características de la planta limitaron su éxito en la naturaleza; sin embargo, por su debilidad biológica la hicieron agrícolamente más útil y se facilitó su domesticación (Mangelsdorf y Reeves, 1959).

#### Descripción del maíz

El maíz Zea mays L. es una monocotiledónea perteneciente a la familia gramínea, tribu Maydae, género Zea. La planta de maíz es anual y su altura generalmente esta

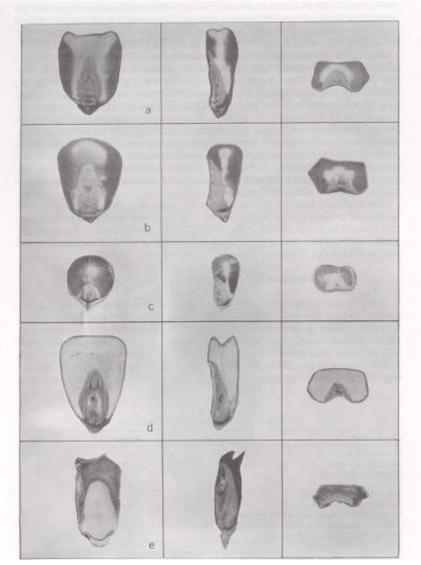
comprendida de 1 a 5 m; generalmente se constituye de un solo tallo dominante con hojas alternas pubescentes en la parte superior y lisas en la parte inferior. Los órganos masculinos y femeninos se sitúan en distintas estructuras de la planta (monoica), las flores femeninas se disponen en mazorcas laterales y las flores masculinas forman parte de la espiga terminal (Gordón, 2001). En promedio la espiga produce unos 25 millones de granos de polen; si una mazorca presenta en promedio 1000 granos entonces unos 25.000 de granos de polen pueden estar disponibles por cada grano (Darrah *et al.*, 2003). La polinización es libre y mayormente cruzada; Luego de la polinización los granos se disponen en hileras en forma de cuentas incrustados en la tusa; la mazorca en su totalidad cubierta por brácteas; presenta un metabolismo fotosintético tipo C4 (Gordón, 2001). El maíz esta entre los cultivos de mayor variabilidad genética y adaptabilidad ambiental. Se siembra en latitudes que oscilan desde los 55º Norte a los 40º Sur y el nivel del mar hasta 3.800 m de altitud. Existen cultivares de menos de un metro de altura, 8 a 9 hojas y madurez de 60 días, y otros con más de 5 m de altura, 40 a 42 hojas y una madurez de 340 días (Fischer y Palmer, 1984)

### Principales razas de maíz

Existe una multiplicidad de razas de maíz, cuyas diferencias están determinadas por aspectos morfológicos de la planta. Bejarano y Segovia (2000) describen las principales razas de maíz desde el punto de vista de la descendencia lineal en: Palomero Toluqueño, de la cual derivan todas las razas de maíz reventón; Complejo Chapalote Nal — Tel, antecesor de numerosas razas de México, América Central y Colombia; raza Pira, de la cual derivan todos los maíces duros tropicales de endospermo amarillo; raza Confite morocho, de donde derivan los maíces de ocho hileras; raza Chullpi, donde se originan los maíces dulces y amiláceos y la raza Kculli, de la cual derivan todos los maíces de aleurona coloreada y pericarpio.

#### Tipos de maíz

Existen diferentes tipos de maíz considerando las características del endospermo del grano, el maíz es ampliamente variable en color, textura, composición y apariencia. Este puede ser clasificado en distintos tipos basado en: endospermo y constitución del grano; color del grano; condiciones de producción del cultivo; maduración y uso Guzmán (1991); Bellido (1991) y George (1989). En la Figura 1 se presenta la clasificación de maíz conforme a su apariencia. Paliwal, (2000), presenta una breve descripción de los principales tipos de maíz los cuales se describen a continuación:



a: dentado,b:duro, c: reventón, d: opaco 2, e: dulce.

Fuente: Watson (2003)

Figura 1. Tipos de maíz en base a su apariencia

#### Duro

Los maíces duros son lisos y redondos. El endospermo generalmente esta constituido de almidón dispuestos de modo fuertemente empacado que le confiere una apariencia vítrea, con solo algunas regiones de endospermo con almidones débilmente empacados lo cual le brinda un aspecto opacos en todo el centro del grano. Este maíz germina mejor que otros tipos de maíces, particularmente en suelos fríos y húmedos; son más precoces en madurez y secan más rápido al alcanzar la madurez fisiológica. Estos son menos propensos a pérdidas durante el almacenamiento por hongos e insectos. Sin embargo, generalmente menor rendimiento que los maíces dentados; son preferidos en la alimentación humana para la producción de harinas. La mayoría del maíz duro que se

produce comercialmente es como granos naranja-amarillo o maíz blanco-crema, aunque estos pueden tener un amplio rango de colores, por ejemplo amarillo, naranja, blanco, crema, verde, purpura, rojo, azul y negro. En los trópicos, son ampliamente producidos.

#### Reventón

Este es una forma extrema de maíz duro con endospermo duro o corneo ocupando la mayor parte del grano y una pequeña parte de endospermo blando en la parte basal. Los granos son pequeños y redondos y tienen un pericarpio grueso; cuando el grano reventón se calienta el endospermo explota. Muchas formas primitivas de maíces poseen grano tipo reventón. Los granos con baja humedad son calentados a temperaturas superiores a 170°C para hacer las cotufas. La alta expansión del grano mejora su calidad como pasapalo. Hay una correlación negativa entre el rendimiento en campo y grado de expansión y la calidad. En muchos países del trópico, el maíz piedra es usado como explotado o tostado como harina y es usado como pasapalo.

#### Dentado

Los maíces dentados son el tipo más comúnmente producido para grano o ensilaje en el mundo El endospermo del maíz dentado tiene mayor proporción de endospermo suave o blando y la fracción de endospermo duro está confinada en los lados del grano. Cuando los granos comienzan a secarse, el almidón blando en el ápice del grano se contrae produciendo una depresión de apariencia semejante a un diente y de allí su nombre. En general los granos dentados son más grandes y más planos, tienen mayor profundidad y son más difíciles de desgranar que los maíces duros. Los maíces dentados tienen más rendimiento en cosecha que otros tipos de maíces, sin embargo generalmente tienden a ser más susceptibles al ataque de hongos e insectos en el campo y durante el almacenamiento y son mucho más lentos al secado que los granos de maíces duros. La mayoría de los cultivares pueden ser blancos, los cuales son preferidos en la alimentación humana, mientras que los amarillos son utilizados en la alimentación animal. Ambos tipos son importantes para forrajes y uso industrial. En los trópicos del maíz blanco dentado se producen unas 19 millones de ha y de amarillo unas 9,5 millones de hectáreas.

#### Ceroso

Este es llamado ceroso debido a su apariencia pálida del endospermo. Los maíces duros y dentados tienen aproximadamente 70% de amilopectina y 30% de amilosa, mientras que los almidones cerosos son 100% amilopectina. Los mutantes cerosos fueron

reportados por primera vez en China y se consideran un maíz especial o para un uso específico. En algunas partes del este de Asia, este es preferido para producir preparados alimenticios y para rostizar las mazorcas en estado jojoto (tierno). Posee un buen precio en mercados industriales para un uso similar que el almidón de yuca. Actualmente el maíz ceroso es cultivado en los trópicos en nichos de áreas pequeñas donde los nativos los prefieren como cultivo alimentario.

## Opaco 2 y QPM

Estos maíces son mutantes recesivos del gen *opaco2* (*o2*) el cual le confiere el doble de contenido de los aminoácidos esenciales, lisina y triptófano, en el endospermo (Mertz *et al.*, 1964). Este mejora marcadamente la calidad proteica del maíz, los granos de cereales y tienen por lo general una baja calidad proteica. Los típicos granos de maíces *o2* tienen un endospermo muy suave con una apariencia de tiza y opaca. El gen *o2* también causa otros efectos indeseables como susceptibilidad a insectos de grano y bajo rendimiento. Estos efectos fueron removidos por esfuerzos intensivos en programas de mejoramiento mediante la acumulación de genes modificadores deseables en maíces casi duros o dentados, con buenos rendimientos que retuvieran el gen *o2* y el efecto deseado de alta calidad proteica, estos estudios fueron llevados a cabo por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) en México, Desde que estos maíces tuvieron esta modificación no han aparecido más tiza ni opacidad, y fueron llamados QPM debido a sus siglas en ingles (Quality Protein Maize) (Bjarnason y Vasal, 1992). A pesar de este suceso marcado en los esfuerzos de mejoramiento en maíz, los QPM aún no han sido ampliamente producidos en los trópicos.

#### Maíz dulce

El maíz dulce se diferencia del maíz normal en que sus granos, cuando están en la fase tierna, son muy ricos en azúcar. Este carácter azucarado es debido a la expresión de genes recesivos como (*sugary 1, brittle-1, shrunken-2*), el cual impide la conversión de gran parte del azúcar en almidón. Por su modo de crecimiento, la forma de su cultivo y uso, el maíz dulce puede considerarse como una hortaliza (Ramírez *et al.*, 2007; Avila *et al.*, 2007).

#### Maíz normal para consumo tierno (jojoto)

En la mayoría de los ambientes tropicales, los maíces normales duros y los cerosos se consumen alternativamente cómo mazorcas tiernas para consumo. Se ha prestado poca atención para el desarrollo de genotipos duros deseables para el consumo como mazorca tierna cocida en agua o asada. Existe una variabilidad considerable para el grosor del pericarpio y la textura del almidón del endospermo que pudieran ser explotadas en un desarrollo superior en mazorcas tiernas para el consumo como una fuente de alimento y de energía (Paliwal, 2000).

## Mazorcas (jojotos chinos)

Otro tipo de maíz que ha venido incrementando su popularidad es el "baby corn". Antes de la polinización, el brote joven es cosechado y es usado para consumo como vegetal fresco o cocido. Los ambientes tropicales son deseables para producir jojoticos. En Tailandia ha sido de mucha utilidad producir estos maíces. Algunas razas de maíz establecidos en el noreste del los Himalayas tiene un alto porcentaje de azúcar en sus partes vegetativas son muy populares en platos asiáticos (Galinat, 1985).

### Importancia del maíz

En la actualidad el maíz es el segundo cultivo, después del trigo, de mayor producción y es el primer cereal con mayores valores de productividad en granos por hectárea. Sus granos son reconocidos por su alto valor alimenticio para el consumo humano y animal, cuenta con numerosas aplicaciones industriales importantes de las cuales se genera un gran número de productos de consumo masivo (Paliwal, 2000). De acuerdo a las cifras del Fondo Monetario Internacional, la producción mundial de maíz durante el año 2008 fue de 772 millones de toneladas. El precio internacional del maíz ha venido registrando aumentos significativos de forma similar a la que han presentado productos como la soya, el trigo, entre otros (Medina, 2008). Los principales productores de maíz son Estados Unidos, China, Brasil Unión Europea, México y Argentina (FAO, 2009). El maíz al igual que los principales rubros alimenticios como el trigo, la soya y el arroz no escapa de las transformaciones en el mercado mundial de alimentos. El incremento de la demanda por el aumento demográfico y los efectos de los factores de producción como cambios climático, la expansión del uso de tierras y agua y las tecnologías agrícolas disponibles, han generado nuevos retos para los programas de mejoramiento genético en el desarrollo de híbridos mejorados de maíz que atiendan a los efectos antes mencionados, sin poner en riesgo la seguridad alimentaria mundial.

En Venezuela el maíz es el rubro agrícola más importante debido a que es el principal aportante de calorías en la dieta del venezolano seguido del aceite el aceite vegetal y el

azúcar refinado (Nieves, 2008). Para el 2002 el consumo promedio de maíz de los venezolanos fue de 32,5 Kg *per cápita* año (INN, 2007). Entre los años 1980 y 2000 la forma de consumo más popular de maíz (harina precocida) aportó entre 6% y 17% de la disponibilidad (energética) para el Consumo humano per cápita/día (Abreu y De Florez, 2004). Aunque el maíz no se conoce como una buena fuente de proteínas su alto consumo en Venezuela representó un 9% de la disponibilidad de proteínas total per cápita diaria durante el año 2001; para ese mismo año el maíz aportó el 27%, 24%, 21%, 19% y 16% de hierro, vitamina A, tiamina, niacina y riboflavina, respectivamente, de la disponibilidad *per cápita* /día (Abreu y De Florez, 2004).

El cultivo de maíz se ha definido como un rubro estratégico a nivel nacional y su mercado está constituido por productores agrícolas, semilleristas, industrias de producción de harinas precocidas, alimentos balanceados para alimentación animal y de producción de almidón. Actualmente se cultiva en casi todo el territorio nacional representando el 30% de la superficie agrícola cultivada y el 15% del valor de la producción agrícola vegetal del país. Más del 85% de la producción nacional corresponde a maíz de grano blanco semiduro, utilizado en un 80% por la industria de molienda seca en la elaboración de harinas precocidas, el resto se emplea al consumo humano fresco (jojoto o cachapas) y en industria de alimentos balanceados para animales (Nieves, 2008).

La producción de maíz en Venezuela experimentó un incremento del 89% en el período 1995-2005. Para el año 2007, la superficie cosechada fue de 740.372 hectáreas y se obtuvo una producción de 2.570.869 toneladas y un rendimiento promedio de 3.472 Kg/ha (FEDEAGRO, 2008). Uno de los mayores retos a los que se enfrentan actualmente los productores es aumentar la productividad nacional de maíz, a partir del uso de híbridos mejorados, que sean adaptados a las condiciones agroclimáticas de las regiones maiceras del país y los requerimientos de la industria nacional (Nieves, 2008).

## Ambientes de producción de maíz en los trópicos

Paliwal (2000), describe la clasificación de maíces por ambientes basada en la principal región climática correspondiente a la latitud donde los maíces son producidos. Las regiones o países ecuatoriales comprendidos entre 30° Norte y 30° Sur constituye el ambiente tropical y los maíces producidos en esta zona se denominan maíces tropicales; mientras que los países y regiones comprendidas entre los 30° a los 34° norte y sur son clasificados como ambientes sub-tropicales. Un gran número de genotipos tropicales y

subtropicales, generados por la combinación de germoplasma tropical y templado, son producidos en esta región. Los ambientes tropicales están sub-divididos en tres categorías basadas en la altitud: tierras bajas tropicales (menores de 1000 msnm); altitud media tropical (de 1000 a 1600 msnm); y tierras altas tropicales (mayores de 1600 msnm). En gran medida, el germoplásma sub tropical es producido en ambiente de altitud media tropical y en ese sentido se acopla a dichos ambientes que son clasificados como: (i) tropicales de tierras bajas; (ii) tierras bajas tropicales y de altitud media; y (iii) tierras altas tropicales. Aproximadamente unos 38 millones de hectáreas de maíz están ubicadas en los ambientes tropicales de tierras bajas, 17 millones de hectáreas, en ambientes tropicales y de altitud media y 6,5 millones de hectáreas, en tierras altas tropicales. Es necesario destacar que estas principales clases de genotipos de maíz no siguen necesariamente parámetros rígidos altitudinales y longitudinales y la temperatura durante las épocas de producción afecta considerablemente la adaptación de los maíces (Dowswell *et al.*,1996).

Muchos de los ambientes tropicales son críticos para el cultivo de maíz, debido a la limitada cantidad de radiación interceptada por el dosel de las plantas. Las plantas se ven afectadas por factores tales como la nubosidad y densidad de plantas. La mayoría de los ambientes de maíz dependen de las lluvias y sólo hay un área limitada de maíces tropicales con irrigación. Incluso existen variaciones dentro de los ambientes tropicales de producción de maíces que afectan sus rendimientos. En la mayoría de las áreas excepto en las tierras altas y altas latitudes del subtrópicos el maíz puede ser producción de maío, si la humedad no es un factor limitante. El verano es la principal época de producción de maíz y comienza con el inicio de lluvias. En esta estación el maíz es plantado cuando la temperatura es cercana al máximo pico. Este florece durante en días secos y calientes. La cosecha se hace en la temporada seca cuando las temperaturas van en aumento. En regiones con lluvias bimodales o con irrigación disponible, se puede establecer una segunda siembra de maíz en la llamada estación de invierno (Paliwal, 2000).

## Zonas y agroclimas de producción maíz en Venezuela

En Venezuela a partir de 1960 comenzaron estudios asociados a los efectos de la variabilidad espacial del clima sobre la producción de maíz en las principales zonas de producción. De allí se generaron diagnósticos de instituciones como el Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias (FONAIAP), Fundación Polar, Universidad Experimental Rómulo Gallegos, Fundación Danac, entre otras. Con la información generada pudieron

eliminarse aquellas áreas con mayores riesgos por déficit hídrico o problemas de drenajes o baja infiltración de suelos, estudios exhaustivos de los diferentes sistemas de producción indicaron que el déficit hídrico es uno de los factores más limitantes de la producción de maíz en Venezuela (Cabrera, 2000).

Conforme a Rodríguez (2000), el clima representa un componente importante en la producción de maíz. La mayor parte de este rubro a escala mundial se produce en condiciones de secano, por ello depende en gran medida del clima y más específicamente de la distribución de las lluvias. Como la precipitación está asociada con la temperatura, insolación, radiación, humedad relativa, entre otros, se considera que es la variable climática de mayor importancia en el desarrollo del cultivo. Más del 70% de maíz en Venezuela se produce en los llanos centrales, el valle medio del rio Yaracuy y los llanos occidentales. Las temperaturas máximas y mínimas son acordes para el desarrollo de maíz, no obstante a ciertas horas del día las temperaturas pueden superar más de los 32°C, lo cual produce un cierre estomático que reduce la fotosíntesis y en consecuencia afecta negativamente la producción de biomasa.

La explotación de maíz en las zonas de mayor producción se realiza durante la época de lluvias, definidas por la zona de convergencia intertropical. Las lluvias inician en los llanos occidentales, luego el valle medio del rio Yaracuy y finalmente en los llanos centrales, con una diferencia 15 a 20 días de entre sí. De manera que las siembras se realizan en los meses de mayo y junio (época de inicio de la temporada lluviosa), durante esta época la planta tiene un adecuado crecimiento y su desarrollo se realiza bajo condiciones óptimas de humedad y temperatura.

#### Desarrollo del maíz

#### Fase vegetativa

Es la primera etapa del cultivo, la semilla germina generando la plántula; durante la emergencia se expande el follaje hasta volverse fotosintéticamente activa controlando la producción de biomasa. La biomasa total producida por el cultivo está altamente correlacionada con el tamaño final de las mazorcas, ya que ésta ocupa cerca del 40% del peso total (Bolaños y Barreto, 1991).

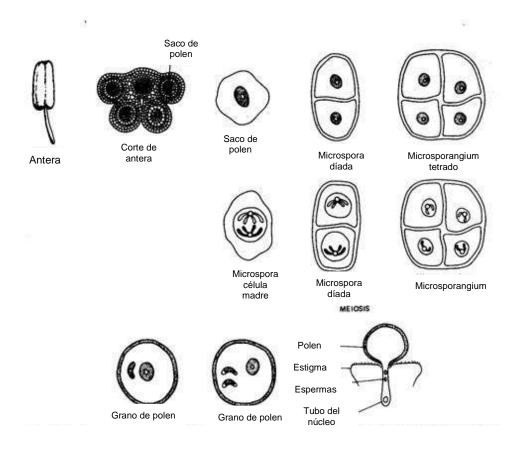
### Fase reproductiva

La fase reproductiva define la formación de la mazorca, el número de granos por mazorca y número de mazorcas por planta. La emergencia de los estigmas (barbas) ocurre 60 días después de la emergencia de la planta y uno a dos días antes ocurre la emisión del polen (Gordón, 2001). Como el polen debe viajar para fecundar los estigmas, las condiciones de distancia y sincronización entre los órganos reproductivos hacen que la polinización y la producción de granos sea una fase sensible al estrés ambiental (Bolaños y Edmeades, 1993). La liberación de polen y el alargamiento de los estilos tienen lugar mayormente en los días más cálidos; en esta fase se ha concluido el principal crecimiento vegetativo de la planta; las hojas y tallos han alcanzado su máximo tamaño y la actividad metabólica de los tejidos se encuentra en pleno funcionamiento; la absorción de potasio cesa completamente mientras que la del nitrógeno y el fósforo continúa. Como el objetivo primordial de la planta es producir el grano, en el período de floración la planta dirige la mayor parte de sus energías y funciones hacia la producción de granos en la mazorca (Gordón, 2001).

En una descripción detallada Darrah *et al.* (2003) indicaron que la célula de una planta de maíz tiene un núcleo de 20 cromosomas. Diez cromosomas provienen del óvulo (grano prematuro) y diez del núcleo espermático (grano de polen). Los pasos del desarrollo del gameto masculino se presentan en la Figura 2. En la inflorescencia masculina (panícula) cada espora de célula madre (microesporocito) se divide por meiosis, formando cuatro esporas de diez cromosomas cada una. Seguidamente cada núcleo de espora se divide por mitosis formando un núcleo vegetativo en forma de tubo y un núcleo germinativo. Este último se divide nuevamente para formar dos células espermáticas, de modo que un grano maduro de polen tiene tres núcleos haploides con 10 cromosomas cada uno.

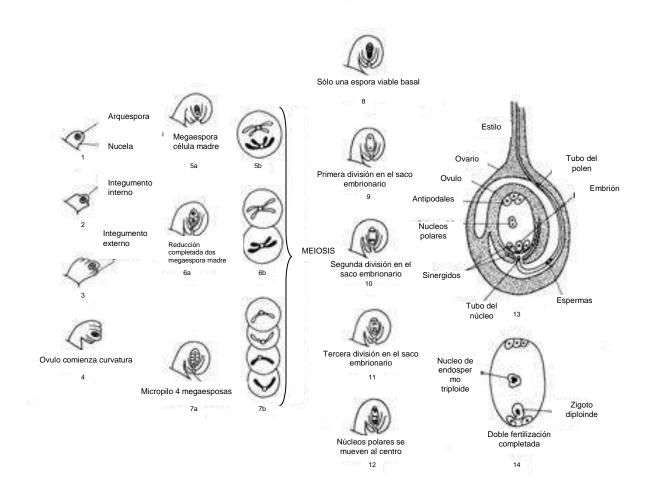
En el caso de la inflorescencia femenina (mazorca) cada pistilo de la constituye una sola espora de célula madre (megaesporocito), este forma cuatro esporas por meiosis con 10 cromosomas en cada núcleo. Tres de estas esporas abortan y la espora remanente sufre tres divisiones mitóticas que dan origen a ocho sacos embrionarios nucleados, es decir que cada núcleo produce cuatro nuevos núcleos (Figura 3). Luego los ocho núcleos se disponen en el saco embrionario quedando con tres núcleos en cada extremo del saco y dos núcleos en el centro. Seguidamente los dos núcleos polares se fusionan y cuando es fertilizado da origen al endospermo. Unos de los tres núcleos de la base del saco embrionario se alarga y se vuelve la ovocélula (gameto femenino). El saco embrionario

maduro, cuando esta listo para fertilizar, contiene un ovulo uninucleado y dos núcleos polares fusionados. En la fertilización el núcleo de la ovocélula se vuelve el zigoto diploide, mientras que la fertilización del núcleo polar resulta en un núcleo endospermico triploide (Darrah *et al.*, 2003).



Fuente: Darrah, et al. (2003)

Figura 2. Desarrollo del gametofito masculino del maíz



Fuente: Darrah et al. (2003)

Figura 3. Desarrollo del gametofito femenino del maíz

La polinización ocurre 65 días después de la siembra (DDS), cuando las barbas (estigmas) son interceptados por los granos de polen de las panículas, este germina en cada uno de los estigmas hasta que finalmente entran al saco embrionario, se rompe y libera dos espermas, cada uno con 10 cromosomas. A partir de este momento ocurre un fenómeno denominado la doble fertilización en el cual un núcleo de un esperma fecunda al ovulo (ovocélula) para formar el zigoto de 20 cromosomas. Este número puede persistir en algunas células somáticas de la planta, los núcleos de todas las nuevas células producidas durante el crecimiento son de 2n de 20 cromosomas. El otro esperma fecunda a los dos núcleos polares, que luego se fusionan formando el núcleo del endospermo primario con 30 cromosomas. La doble fertilización puede ser importante para preservar las diferencias epigenética que dirigen el desarrollo del endospermo y el embrión (Lopes y Larkins, 1993).

#### Fase de Llenado de Grano

La fase de llenado de grano comienza después de la polinización y determina el peso final del grano y de la mazorca. El peso de grano está correlacionado con la duración y la cantidad de radiación interceptada durante esta fase, y es afectada por estres hídrico y nutricional (Fischer y Palmer, 1984). La fase de llenado está marcada diferentes estados los cuales se describen a continuación conforme lo indicado por Cabrera (2002) y Gordón (2001)

Doce días después de la aparición de los estigmas se establece el grano en estado de *ampolla*. En este estado la mazorca crece rápidamente hasta su máximo tamaño y los nutrientes se acumulan en el grano desde diferentes partes de la planta. Para la producción de grano se requiere de una humedad adecuada y se debe evitar la pérdida de hojas en la planta a fin de lograr buen llenado de grano y rendimiento.

El estado *grano pastoso* se produce 24 días después de la aparición de los estigmas. Los granos son lechosos y presentan altos contenidos de azúcares y otros cuerpos proteicos que serán utilizados para la síntesis de almidón y proteínas; presentan estructuras bien diferenciadas que darán origen a un nuevo individuo. En este estado la falta de potasio resulta en mazorcas con granos incompletos y poco desarrollados, mientras que el déficit hídrico y la pérdida del área foliar de la mazorca reduce el número de los granos y en consecuencia su peso.

El estado de *grano dentado* ocurre aproximadamente a los 36 días después de la aparición de los estigmas. Los azúcares del grano son transformados a dextrinas y luego en almidón más seco y duro que inicialmente se deposita en la parte posterior del grano o corona. En el embrión, la radícula y las hojas embrionarias están totalmente diferenciadas y las raíces seminales comienzan a desarrollarse. Condiciones no favorables o deficiencia de potasio resulta en un mal llenado de los granos.

A los 48 días después de la aparición de los estigmas los granos están dentados en casi su totalidad. El embrión esta maduro con sus cinco hojas diferenciadas. Ya esta por concluir la acumulación de materia seca en el grano. El número de mazorcas y el número de granos por mazorca ya han sido determinados, sin embargo un serio déficit de humedad, escasez de nutrientes o la aparición de enfermedades podrían afectar el rendimiento. Las condiciones ambientales en este período determinan el tamaño del

grano, mientras que en etapas anteriores de crecimiento determinan principalmente el número de mazorcas por planta y el número de granos por mazorca.

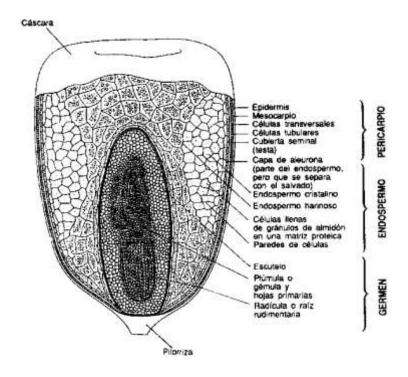
La fase de *madurez fisiológica* se produce a los 60 días después de la aparición de los estigmas; el grano ha finalizado la acumulación de materia seca y ha iniciado el secado donde continuará la pérdida de humedad conforme al clima; el grano ha aumentado su peso de materia seca como resultado de la síntesis de almidón. Cuando finaliza el depósito de almidón, el grano se endurece y alcanza el peso seco máximo cuando la humedad llega a un nivel inferior al 35%. Al alcanzar la madurez fisiológica se obtiene el rendimiento máximo, desde este momento la maduración del grano es sólo pérdida de humedad. Si no se dispone de un buen sistema de secado y almacenamiento el grano no esta listo para la cosecha desde el punto de vista biológico no ha completado todavía su maduración. De manera que los últimos días de la mazorca en la planta se dedican exclusivamente al secado.

## Grano de maíz descripción general

El grano de maíz es clasificado botánicamente como un cariopsis, sus principales constituyentes son el embrión, el endospermo, la aleurona y el pericarpio (Bartolini, 1990), estas a su vez están constituidas de partes diferenciables a nivel microscópico y pueden ser apreciadas en la Figura 4.

## Pericarpio

El pericarpio es la pared del ovario transformado, el cual recubre el grano y le brinda protección a los constituyentes internos del grano; es un tejido maternal por ello no tiene contribución genética del grano de polen al fecundar el óvulo, pero tiene un genotipo idéntico de la planta donde provino la semilla. Su espesor oscila entre 25 y 140µm y el peso seco generalmente representa 2% del peso total del grano (Darrah *et al.*, 2003). Está formado por un tejido denso y correoso, cuya composición es 77,7 % fibra, 9,1 % proteína, 7,3 % almidón, 1 % grasa y 4,4 % de otras sustancias. Las partes del pericarpio son la cutícula (con grosor de 0,7 a 1 mm), la epidermis (con grosor de 4 a 6 mm), el mesocarpio, las celdas cruzadas y las celdas tubulares (Bartolo *et al.*, 1999). Luego de la fertilización la pared del ovario comienza a transformarse en el pericarpio y gradualmente se incrementa en tamaño de la fertilización a la madurez. A los 20 DDP, el tejido tiende a



Fuente: Hoseney, 1994 (Facilitado por el Instituto de Harina de Trigo, Illinois, 1964)

Figura 4. Sección longitudinal de un grano de maíz maduro

incrementar su tamaño debido a un alargamiento y división celular y el interior y exterior del pericarpio son claramente diferenciables. El pericarpio más externo continua la división celular y se engrosa gradualmente con la maduración. Sin embargo, las células del pericarpio interno mantienen sus paredes delgadas y detiene la división pero continúa elongándose, así mantiene la integridad como un tejido distinto.

#### Aleurona

El tejido de aleurona, es una simple capa de células el cual se sitúa abajo del pericarpio y rodea todo el endospermo, este contiene un gran número de cuerpos proteicos pequeños (Lopes y Larkins, 1993, Olsen, 2001). Los núcleos de las células del aleurona tienen tres grupos de diez cromosomas, dos grupos vienen del parental femenino y un grupo viene del parental masculino (Watson, 2003). Moreau *et al.* (2000), en un estudio de composición fitosteroles en maíz indicaron que todo el contenido de aceite de germen de maíz y fitosteroles provienen del tejido de aleurona.

#### **Embrión**

El embrión representa un 8-10% del peso total del grano, allí descansa el poder germinativo para la producción de una nueva planta de maíz, la cual puede ser activada bajo ciertas condiciones de temperatura y humedad. En un corte de sección del embrión

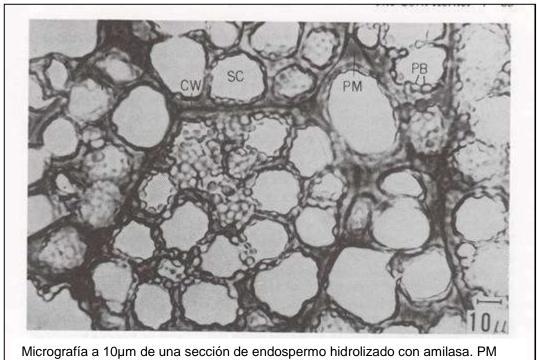
las partes más elementales de la planta son evidenciadas, por ejemplo, la plúmula con tallo y hoja y la raíz primaria. El escutelo es conocido como el primer brote. Este no funciona como una hoja, sin embargo es un órgano de almacenamiento; también ayuda a digerir el endospermo durante el desarrollo temprano de la plántula (Darrah et al., 2003). En lo referente al desarrollo del embrión a los 14 DDP ya se observa una masa de células donde aún no se diferencia claramente las subdivisiones; a los 22 DDP se distinguen la plúmula y la radícula. El escutelo se desarrolla mucho más rápido que el embrión. La deposición de lípidos, bajo la forma de cuerpos oleosos, comienza en el escutelo y continúa en la maduración. Conforme los gránulos maduran las paredes celulares del escutelo se engrosan formando una gran cavidad. Luego que la síntesis de almidón y proteínas se detiene, la deposición de lípidos puede continuar hasta que la planta muere. El contenido de ARN y ADN incrementa con la maduración en el embrión y está disponible para la rápida producción de enzima durante la germinación. Todos los triglicéridos en maíz están contenidos en cuerpos oleosos, los cuales tienen propiedades idénticas al del resto de las semillas. El aceite y los cuerpos oleosos se sintetizan en la superficie del retículo endoplasmático (Watson, 2003).

#### **Pedicelo**

Otra de las estructuras que se pueden destacar del grano en el pedicelo la cual se sitúa en la base del grano y sirve como punto de intersección entre el grano y la mazorca. Esta contiene el tejido conductivo el cual se constituye de una capa hilar en el grano maduro. Cuando se alcanza la madurez fisiológica del grano, ocurre un movimiento no muy vigoroso de nutrientes. Al mismo tiempo la capa hilar se vuelve marrón oscuro o negro y se define como capa negra, la cual es comúnmente un indicador de madurez fisiológica (Vieira et al., 1995).

#### **Endospermo**

El endospermo representa la mayor parte del grano con un 80-85% del peso total; se compone de 90% de almidón y 10% de proteína. Este tejido esta constituido principalmente por células elongadas donde se encuentran contenido el almidón bajo la forma de gránulos de almidón poliédricos (Bartolo *et al.*, 1999). Los gránulos de almidón se forman dentro de un organelo celular llamado amiloplasto, tienen un diámetro de hasta 25µm en los granos de maíz maduro. Cada gránulo de almidón se encuentra rodeado de cuerpos proteicos y estos a su vez pueden estar cubiertos por una matriz proteica continua (Lawton y Wilson, 2003) (Figura 5).



Micrografía a 10µm de una sección de endospermo hidrolizado con amilasa. PM Matrix proteíca; PB, Cuerpo proteico; SC, cavidad del gránulo de almidón; CW, pared celular del endospermo

Fuente: Christianson et al. (1969)

Figura 5. Microscopia (x6000) endospermo de maíz normal

#### Desarrollo

El desarrollo del endospermo se inicia las 3 horas después de la polinización (DDP), cuatro días después las paredes celulares comienzan a formarse alrededor del núcleo de endospermo e inicia la celularización. A los 6 DDP el endospermo es completamente celular y uninucleado, y a los 12 DDP las células llenan la vacuola central del endospermo y la cariocinesis y citocinesis se completan. Luego las células encima de la placenta se funcionan como un tejido conductivo alimenticio, resultando en las capas hilares del en el grano maduro. Al principio, el endospermo producido por la división celular se acumula en la región periférica, luego el tamaño de células en la región central se incrementan rápidamente y junto con el tejido de aleurona entran un estado denominado diferenciación entre los 20 y 25 DDP. Seguidamente, el endospermo crece continuamente hasta la maduración, por elongación celular, y las células aumentan su diámetro de 50 a más de 100 µm para una rápida acumulación de gránulos de almidón y cuerpos proteicos, que comienza a los 10 DDP y continúa por encima de los 45-50 DDP (Watson, 2003).

Biosíntesis de almidón en el endospermo

El almidón es sintetizado a partir de sacarosa siendo esta transportada para el desarrollo del endospermo. La sacarosa se convierte en glucosa-1-fosfato, que es incorporada como ADP-glucosa, este representa el sustrato principal para la síntesis de almidón. La naturaleza de las reacciones que convierten la sacarosa en ADP-glucosa no está clara, y el precursor que atraviesa la membrana de la amiloplasto no se ha identificado.

La primera reacción que se produce en la biosíntesis del almidón ocurre en el citoplasma e implica la separación de la sacarosa por la sacarosa sintetasa, codificada por los genes Shrunken-1 (SH1) y Sugary-1 (SU) para obtener UDP-glucosa y fructosa. Ambas hexosas luego son convertidas en glucosa-1-fosfato principalmente por la enzima UDP-glucosa pirofosforilasa. La glucosa-1-fosfato reacciona con el ATP a través de la enzima ADPglucosa pirofosforilasa (cuya subunidades son codificadas por los genes Shrunken-2 (SH2) y Brittle-2 (BT2) para producir ADP-glucosa. Se estima que la glucosa-1-fosfato o un precursor, se transporta del citoplasma al amiloplasto y que la síntesis de la ADPglucosa se produce en el amiloplasto (Lopes y Larkins, 1993). Sin embargo, algunas pruebas sugieren que la ADP-glucosa puede ser transportada por si misma al amiloplasto (Akazawa, 1991). También se ha indicado que la ADP-glucosa se sintetiza citoplasmasmicamente, debido a que las proteínas de SH2 y BT2 no muestran ninguna evidencia de tránsito de péptidos (Bhave et al., 1990), que es lo esperado si se transportaran al amiloplasto. El locus BT1 codifica una proteína que probablemente controla el transporte de ADP-glucosa hacia el amiloplasto, aunque también han sido relacionados con la síntesis de los iniciadores de la síntesis de amilosa y amilopectina (Hannah et al., 1993).

La síntesis de amilosa y amilopectina a partir de la ADP-glucosa incluye múltiples formas de las enzimas de almidón sintetasa (ADP-glucosa glucosil transferasa) y enzimas ramificadoras. Conforme a la revisión realizada por (Boyer y Shannon 2003) a continuación se resume la polimerización del almidón en cuatro reacciones enzimáticas:

Reacción 1: ADPG pirofosforilasa (EC 2.7.7.27)

ATP+G-1-P ----ADPG +PPi

Reacción 2: Almidón sintetasa (EC 2.4.1.21)

ADPG+  $\alpha$  (1-4)-glucano N---ADP +  $\alpha$  (1-4)-glucano N+1

Reacción 3: Enzima ramificadora de almidón (EC 2.4.1.18)

 $\alpha$  (1-4)-glucano---  $\alpha$  (1-4)-glucano ramificadora por un enlace  $\alpha$  (1-6) Reacción 4: Almidón fosforilasa (EC 2.4.1.1) G-1-P +  $\alpha$  (1-4)-glucano N---Pi+  $\alpha$  (1-4)-glucano N+1

ADP= adenosin difosfato, ADPG= adenosin difosfoglucosa, ATP= adenosin trifosfato, G-1-P=glucosa 1 fosfato, ppi=pirofosfato inorgánico, Pi=fosfato inorgánico.

La ADPG pirofosforilasa es una enzima alostérica que actúa sobre la glucosa 1 fosfato formando ADP glucosa (reacción 1). La actividad de la ADPG pirofosforilasa de las plantas superiores, es inhibida por fosfatos inorgánicos y es ampliamente activada por 3-fosfoglicerato y en menor grado por los glicolíticos intermediarios, fosfoenolpiruvato, fructosa bisfosfato y fructosa-6-P. Esta enzima se codifica por los genes Bt2 y Sh2 y las subunidades en forma de plastidios de esta enzima son codificadas por los genes Agp1 y Agp2.

La enzima almidón sintetasa transfiere las unidades de glucosa del ADPG para el extremo no reductor de un glucano  $\alpha$  (1-4) en crecimiento vía enlace  $\alpha$  (1-4) (reacción 2). La almidón sintetasa tiene dos formas físicas distintas: una soluble y otra estrechamente enlazada al granulo de almidón en crecimiento. La almidón sintetasa es separada en varias formas enzimáticas conforme a sus patrones de catálisis sobre diferentes sustratos. Se ha demostrado la presencia de cierto número de isoenzimas que al parecer juegan un papel importante en la actividad de la almidón sintetasa, pero debido a las limitaciones experimentales para su aislamiento y detección de su actividad ha sido difícil determinarlo.

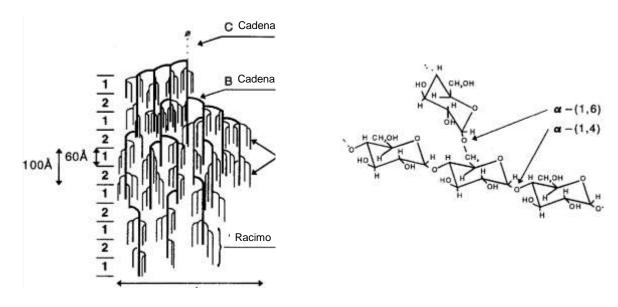
La enzima ramificadora cataliza la formación de puntos de ramificación de la amilopectina (reacción 3). La reacción ocurre por una escisión de un puente  $\alpha$  (1-4) y transferencia de una molécula de glucano  $\alpha$  (1-4) resultante para el mismo o diferente glucano  $\alpha$  (1-4) que puederesultar en la formación de un puente  $\alpha$  (1-6). Evidencias directa del papel de las enzimas desramificadoras del almidón no ha sido completamente satisfactoria. Se han encontrado tres formas de esta enzima en el maíz normal (no mutante) y la reducción de su actividad en maíces que expresan el gen sugary1 (su1) el cual acumula fitoglicógeno. Se ha sugerido que la amilopectina es el resultado de un equilibrio entre las actividades de las enzimas ramificadoras y desramificadoras.

La polimerización de las cadenas de glucanos  $\alpha$  (1-4) pueden ser catalizadas además de la almidón sintetasa (reacción 2) por la fosforilasa (reacción 4). Basados el arreglo y concentración de los metabolitos. Esta misma a diferencia de la fosforilasa (reacción 4) es activa en las síntesis de almidón de maíz, pero esta puede funcionar en la conversión de maltosacaridos G-1-P.

La ruta biosintética del almidón es complicada debido a la presencia de múltiples formas enzimáticas por ello es poco conocido el papel específico de las enzimas para la síntesis de amilosa y amilopectina en el gránulo de almidón, por ello continua siendo una pregunta fundamental para los investigadores en esta área (James *et al.*, 2003)

## Estructura y composición del almidón

El almidón es el glucano de almacenamiento más abundante del mundo, esta constituido por moléculas de glucosa unidas mediante enlaces glucosídicos de tipo  $\alpha$  (1-4) y  $\alpha$  (1-6), los cuales generan dos tipos de fracciones poliméricas: la amilosa y la amilopectina (Gilliard y Bowler, 1987). La amilosa se caracteriza por presentar enlaces  $\alpha$  (1-4) lo que le confiere una disposición en cadenas lineales en forma de hélices simples y dobles y tiene una masa de 10<sup>5</sup> a 10<sup>6</sup> g/mol (Takeda, et al., 1989). En el almidón de maíz la amilosa tiene un grado de polimerización de 100-1000 unidades de glucosa (Boyer y Shannon 2003). La amilopectina es el polímero más abundante del almidón, contiene cadenas lineales de diversas longitudes unidas mediante enlaces α (1-4) y el 5% de las unidades de glucosa de la amilopectina se unen a través de enlaces glucosídicos  $\alpha$  (1-6), lo cual le confiere una disposición ramificada (Lopes y Larkins, 1993). La estructura de la amilopectina es compleja: las cadenas son generalmente distribuidas bimodalmente con longitudes de 12-20 y 40-60 unidades de glucosa alternadas con puntos de ramificación α (1-6) y presenta una masa aproximada de 10<sup>7</sup>-10<sup>9</sup> g/mol (Takeda, et al., 1989). La naturaleza semi-cristalina dentro del gránulos de almidón no es del todo clara, sin embargo la hipótesis más aceptada es el modelo de racimo propuesto por Hizukuri (1986) (Figura 6), en el cual las cadenas lineales de amilosa y los puntos de ramificación de la amilopectina se disponen en regiones amorfas, mientras que grupos de cadenas cortas de la amilopectina se disponen en forma de hélice paralelas fuertemente empaquetadas en la región cristalina. El crecimiento cristalino en gránulos, probablemente se inicia en el centro del gránulo y se desarrolla en una dirección hacia el exterior resultando en una organización radial (Hizukuri, 1986).



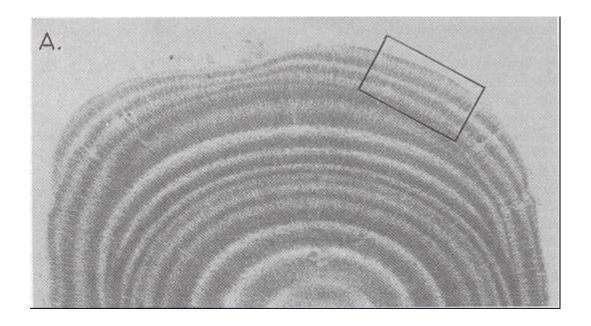
Fuente: Hizukuri (1986)

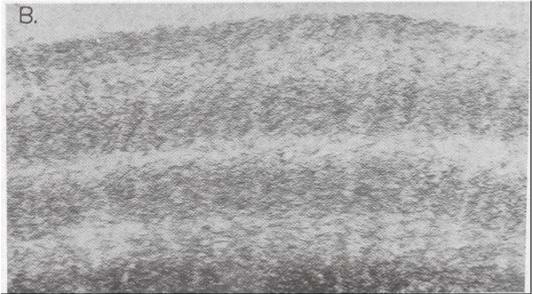
Figura 6. Modelo de racimo del almidón

La amilosa y la amilopectina en las células del endospermo de maíz están estructuralmente ordenadas en un gránulo insoluble, organizado en unos aros o capas radiales, las cuales pueden ser claramente visualizadas luego de una digestión parcial ácida (Figura 7). Dentro de las capas se forman unas lamelas paralelas a las capas, los racimos de amilopectina se disponen de forma perpendicular al crecimiento de los aros. Actualmente se cree que la síntesis procede por la elongación de las cadenas alrededor de la superficie del gránulo. Los gránulos de maíz tienen una estructura cristalina, demostrada por la birrefrigencia ante la luz polarizada, y tiene un patrón de dispersión característico en la difracción de rayos X. La cristalinidad del almidón se cree que es causada por la amilopectina y específicamente por el fuerte empacamiento pareado de las cadenas helicoidales lineales. La morfología de los gránulos del maíz que expresan el gen amylose extender (ae) sin embargo, varía con la fuente genética (Boyer y Shannon 2003).

#### Lípidos

Los lípidos a menudo han sido asociados con los almidones del endospermo, están presentes internamente en todos los gránulos de almidón de los maíces excepto el *waxy 1* (*wx1*). Morrison (1981), demostró que existen algunos lípidos en los gránulos de almidón y estableció dos tipos de lípidos: los lípidos de la superficie y los lípidos dentro de los gránulos. Los lípidos absorbidos sobre la superficie de los almidones incluyen los lípidos de las membranas del amiloplasto galactosildigliceridos y diasilfosfolipidos. Otros lípidos principalmente monoacil, son más herméticamente absorbidos y son retenidos luego que





- A. Muestran los aros concéntricos de las regiones amorfas y las cristalinas
- B. Detalle de las lamelas concéntricas y su disposición perpendicular. Fuente Boyer y Shannon (2003)

Figura 7. Micrografía electrónica de gránulo de maíz

todas las proteínas de la superficie han sido removidas. Los gránulos de almidón de maíz contienen ácidos grasos libres y los tres lisofosfolípidos: lisofosfatidilcolina, lisofosfatidiletanol-amina y lisofosfatidilglicerol (Morrison y Milligan, 1982). La localización de los lípidos internos de almidón en los gránulos no este del todo claro. Sin embargo, la mayoría de estos lípidos forman complejos de inclusión de tipo V con las hélices de amilosa en los almidones nativos (Morrison *et al.*, 1993).

#### Proteínas

## Cuerpos proteicos

Las proteínas de almacenamiento en el endospermo están localizadas mayormente dentro de cuerpos celulares conocidos como cuerpos proteicos. Estos cuerpos son los sitios de deposición de las prolaminas (zeínas) que están constituidas por cuatro tipos diferentes (Duvick, 1961). El volumen promedio de los cuerpos proteicos incrementa durante el desarrollo y varían de tamaño a través de las diferentes regiones del endospermo. En el endospermo en maíces que expresan el gen *opaco2* (*o2*) los cuerpos proteicos pueden estar deformados, en los maíces harinosos pueden estar ausentes y en el endospermo duro están estrechamente empacados. Existe una matriz proteica que rodea a los cuerpos proteicos y los gránulos de almidón (Christianson *et al.*, 1974). La apariencia de los tipos de endospermo (harinoso y duro) fue propuesta por las evaluaciones microscópicas realizadas por Wolf *et al.* (1969); Duvik (1961) y Robutti *et al.* (1974).

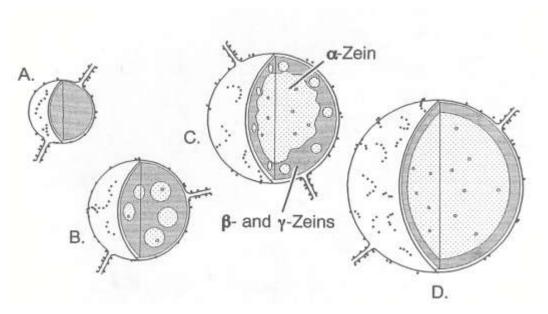
La apariencia opaca del endospermo harinoso se debe a que durante la maduración la zona central del endospermo, primer lugar donde se depositan los gránulos de almidón, aumenta de tamaño y su membrana proteica se extiende y se vuelve más fina. Luego, durante el secado del grano, la película de la matriz proteica se rompe, dejando espacios vacíos que se llenan de aire, lo que interrumpe la transmisión de luz; mientras que la apariencia traslúcida del en el endospermo córneo se atribuye a que la matriz proteica es más gruesa y por lo tanto más fuerte, haciendo que los gránulos sean pequeños y se compriman en formas poliédricas, que evita los espacios vacíos y por lo tanto no impide la trasmisión de luz confiriéndole un aspecto traslúcido o vítreo. Aproximadamente el 70% de las proteínas del endospermo se componen de varias clases de zeínas (Gibbon y Larkins, 2005).

Las prolaminas (zeínas) son las principales proteínas de almacenamiento del maíz. Las zeínas constituyen de 44 a 79% de las proteínas del endospermo, la variación de contenido depende del genotipo y del método de separación utilizado. Las zeínas se separan en cuatro distintos tipos: alfa, beta, gamma y delta. Las alfa zeínas son las prolaminas más abundantes del maíz, representan un 70% del total. Tienen bajo contenido de lisina y bajo contenido de aminoácidos básicos, niveles moderados de glutamina y prolina y altos niveles de residuos hidrofóbicos, alanina y leucina. Se han propuestos modelos estructurales de la alfa zeína una de forma globular y otro de forma

de hélice alfa antiparalela. Las beta zeínas representan el 5% de las zeínas totales, comparadas con la alfa zeínas, estas contienen mayor contenido de cisteína y metionina y menos glutamina, leucina y prolina, por otra parte tienen baja lisina y triptófano. Las gamma zeínas son las segundas más abundantes de las prolaminas de maíz, representan el 20% de la zeína total. Son ricas en prolinas y cisternas y no poseen lisina ni triptófano. Las delta zeínas tiene características de solubilidad similares a las alfa zeínas y representan menos del 5% de la zeina total del endospermo. Tiene una estructura diferente del resto de las zeínas aunque en la composición de aminoácidos son similares a la beta zeínas y presentan altos contenido de metioninas (Lawton y Wilson, 2003).

Durante el desarrollo del endospermo de maíz las zeínas son sintetizadas en una membrana de poliribosomas, siendo transportadas constraccionalmente a través del lumen del retículo endoplasmático, donde son ensamblados organizadamente como cuerpos proteicos insolubles (Larkins y Hurkman, 1978). Aún no es conocido de cómo las zeínas se mantienen en el retículo endoplasmático. Sin embargo se ha propuesto un modelo de la estructura del cuerpo proteico en donde la alfa zeina y la delta zeína están ubicadas en el interior del cuerpo; mientras que la beta y la gamma zeína están en la periferia. Lending and Larkins (1989), indicaron que durante el desarrollo inicialmente el cuerpo proteico contiene beta y la gamma zeína y muy poco o nada de alfa zeína. La alfa zeína comienza a acumularse dentro de la beta y gamma zeína y es la proteína que desarrolla el cuerpo. Como el cuerpo proteico madura vigorosamente, la alfa zeína llena los intersticios de la región interna para formar el núcleo del cuerpo, mientras que la beta y gamma zeína es desplazada a la periferia hasta formar una capa alrededor del cuerpo proteico (Figura 8).

Las albuminas, comparado con las globulinas, contienen altos niveles de ácido aspártico, prolina, glicina y alanina, pero bajos en glutamina y arginina; mientras que los niveles de lisina son altos en ambas proteínas. Las globulinas son proteínas de almacenamiento en el endospermo presentan altos niveles de arginina. Es muy poco conocido cual es la función de las albuminas y globulinas en el desarrollo del grano de maíz (Lawton y Wilson, 2003).



A-D. Indican los diferentes estados del cuerpo proteico durante el crecimiento (A) inicio (D) final del desarrollo

Fuente: Lending and Larkins (1989)

Figura 8. Desarrollo del cuerpo proteico del endospermo

La glutelina del maíz constituye la proteína de mayor contenido después de la zeina, sin embargo ha sido poco estudiada debido a la dificultad para separarlas y clasificarlas del resto de las proteínas. Su estructura consiste en diferentes polipéptidos con diversas propiedades asociadas a los enlaces disulfuro. Se han encontrado diversas interacciones hidrofóbicas que enlazan las glutelinas (Wall *et al.*, 1988; Landry *et al.*, 2000).

#### Papel del almidón y las proteínas en la textura del grano de maíz

La textura del grano de maíz es un aspecto de importancia fundamental para los productores y la industria de granos, es una característica que está relacionada con la densidad, la digestibilidad y la susceptibilidad al ataque de plagas y enfermedades, y el fracturamiento durante el procesamiento y almacenamiento (Correa et al., 2002; Pomeranz et al., 1984). Dos términos se utilizan normalmente para referirse a la textura del grano de maíz, la vitreosidad y la dureza, pero no designan la misma propiedad. El vitreosidad está relacionada con la apariencia del grano, mientras que la dureza se refiere a una propiedad física (Pereira et al., 2008).

El endospermo de los granos de maíz contiene una mezcla compleja de gránulos de almidón y cuerpos proteicos y, según Duvick (1961), su estructura física depende del tipo

de interacción entre estos componentes, donde las proteínas de almacenamiento juagan un papel importante en la estructura física del grano maduro. Las variaciones en la estructura física del grano se asocian al grado de compactación de los componentes celulares, el espesor de la pared celular, el tamaño de las células del parénquima de reserva del endospermo, el espesor de matriz proteica, en contacto con los gránulos de almidón, y la fuerza de adherencia entre la matriz proteica y los gránulos de almidón (Kriz, 1987). En granos de sorgo, maíz y mijo, las proteínas de reserva son las responsables de los enlaces entre el almidón y la proteína, en la matriz del endospermo, influyendo por lo tanto en la dureza del grano (Dombrink-Kurtzman y Bietz, 1993; Abdelrahman y Hoseney, 1984).

La composición y la disposición de la proteína de reserva del endospermo modifican su textura y, por tanto, su estructura física. Estudios han demostrado que las regiones de endospermo duro de granos de maíz tienen mayor contenido de α y γ zeina (Dombrink-Kurtzman y Bietz, 1993, Paiva *et al.*, 1991). También observamos que la γ zeina de 27 kDa tiene una gran participación en la formación del endospermo vítreo, ya que se observa un aumento de esta zeina en los genotipos QPM (vítrea), en comparación con suaves *opaco-2* (Wallace *et al.*, 1990). Este aumento de la zeina en los cuerpos proteicos conduce a un aumento en el diámetro de estos y consecuentemente proporciona una mejor compresión de los gránulos de almidón en el endospermo del QPM. También se ha observado que los granos de maíz de textura suave presentan gránulos de almidón mayores y cuerpo proteicos más pequeños que en los granos vítreos (Kriz, 1987).

En estudios con microscopía electrónica de maíz se encontraron que los gránulos de almidón del endospermo duro de maíz presentan un mayor empacamiento y forma poligonal, mientras que el endospermo harinoso tiene forma redondeada y espacios intergranulares más grandes (Robutti et al., 1974,). Gibbon y Larkins (2005), observaron en los genotipos de QPM que los gránulos de almidón presentaban un perfecto empacamiento, con espacios perfectamente cubiertos, lo cuales no fueron evidenciados para maíces mutantes del gen *opaco-2*.

#### Molienda seca de maíz

La molienda seca es usada para producir una gran variedad de productos alimenticios y no alimenticios. El proceso de molienda seca del grano involucra un gran número de etapas. Inicialmente, el maíz destinado al procesamiento industrial es cosechado a una humedad específica, esta varía conforme el ambiente y las prácticas de cosecha locales. En Venezuela la humedad de cosecha de grano para uso industrial se realiza generalmente entre 20-22%. Cuando la cosecha es mecanizada, la cosechadora realiza el trillado (desgranado) de la mazorca y el grano se colecta directamente en los camiones donde será transportado. Un retraso de cosecha implica que el grano se seca en el campo, esto puede afectar negativamente las características de calidad del grano y acelerar el deterioro del mismo (Willcutt, 2001).

Una vez que el grano se cosecha, es transportado húmedo a la industria para su comercialización. En países como EE.UU., este proceso es de alta tecnología y existen grandes centros de acopio donde el grano es limpiado, secado y almacenado en silos o albercas, para luego ser vendido a las procesadoras (Willcutt, 2001). En Venezuela, aunque existen centros de almacenamiento, mayormente las empresas procesadoras tienen la tarea del acondicionamiento (secado y limpieza) y almacenamiento del grano. Previo a la comercialización del maíz en la industria, se realiza una inspección del mismo mediante una evaluación de la materia prima húmeda que incluye la evaluación física y sanitaria de una muestra tomada del lote (carga) a esta se le determina la cantidad de material extraño, impurezas, humedad y mezcla varietal, así como los diferentes tipos de granos dañados y el peso específico, de acuerdo a la normativa oficial Norma COVENIN 1935-87 (COVENIN, 1987). Conforme las fracciones determinadas, se tipifica la calidad del grano y se ofrece un incentivo o deducciones al momento del pago del maíz.

Luego el grano ingresa para ser limpiado, secado y almacenado para así evitar el deterioro. Existen distintos métodos de secado de grano que va desde asoladeros o patios de secado hasta equipos de alta tecnología. El secado puede llevarse a cabo a temperaturas bajas, de 5 a 8°C por encima de la humedad ambiental, a temperaturas medias (hasta 43°C) y a temperaturas altas (hasta 60°C) (Rodriguez y Bartosik, 2006). Sin embargo, para molienda seca se recomienda realizar secado a temperaturas bajas o medias ya que las altas temperaturas puede ocasionar cristalización y/o quemado del grano lo cual afecta su rendimiento y calidad durante el procesamiento industrial. El secado industrial de maíz se realiza por equipos secadores de alberca estacionarios, de columna (continuos), o una combinación de de estos dos tipos. Cada sistema emplea diferentes cantidades de flujo de aire y calorías. Los diseños de los secadores son el resultado de la combinación entre alcanzar la capacidad deseada, el control de los costos de secado y mantener calidad del grano.

La limpieza del grano es otro proceso importante antes del procesamiento. Comúnmente consiste en una limpieza robusta antes del secado del grano y una profunda luego del secado. Por lo general, la limpieza del maíz en la industria se realiza mediante aspiradores de materia extraña y polvo y las cribas para separar material diferente al grano como tusas, tallos, hojas, piedras y otras semillas. También existen limpiadores magnéticos donde se hace pasar la masa de granos y se extraen piezas metálicas, como tuercas, tornillos, entre otros, como resultado del proceso mecanizado de cosecha (Duensing et al., 2003).

Los procesos de molienda actuales generalmente son precedidos por un riguroso proceso de limpieza mecánica de los granos. Esta etapa típicamente utiliza aspiración para remover el polvo, tusas y fracciones de metal, piedra y otros tipos de materiales extraños de la masa del grano (Duensing *et al.*, 2003). Posteriormente, el grano es secado, atemperado y almacenado en silos hasta lograr una temperatura y humedad de equilibrio, esta etapa puede extenderse de 30 días a varios meses.

La siguiente consiste en el remojo del grano. Como su nombre lo indica, este proceso de molinería involucra la adición de agua al maíz para facilitar la remoción del germen y el pericarpio. El remojo ayuda a fraccionar y separar el grano de maíz en sus componentes-endospermo, germen y pericarpio (Giguere, 1993). Como la textura, densidad y características de la harina de cada componente son diferentes, el remojo magnifica dichas de estas diferencias. Este efecto es críticamente importante debido a que el objetivo del desgerminado es remover la máxima porción de pericarpio y germen del endospermo y obtener una mayor cantidad de piezas de endospermo de mayor tamaño y con la menor cantidad de grasa y fibra posible (White y Pollak, 1995).

Numerosos estudios han sido desarrollados para evaluar proceso de remojo del grano, lo que ha permitido comprender mejor este proceso y optimizarlo. Se ha determinado que el agua penetra por el punto de inserción del grano en la mazorca (capa hilar) y se mueve a través del grano por capilaridad. El agua se difunde desde la capa externa del grano y aleurona hacia el germen (Ruan et al., 1992). Como el movimiento del agua dentro del grano requiere tiempo, el tiempo de remojo es crítico. Remojos de corto tiempo pueden generar una humedad no uniforme del grano; mientras los remojos por largo tiempo permiten el re-equilibrio de humedad del grano, lo cual desvirtúa el verdadero fin del remojo (Mehra et al., 2001). En tal sentido el tiempo de remojo es esencial para la

eficiencia del proceso. Asimismo, la cantidad y temperatura del agua y el método de adicción son factores importantes. Muchos autores han propuestos dos y hasta tres fases del remojo (Brekke, 1970), sin embargo debido a las características como densidad del grano, susceptibilidad a la ruptura y tamaño del grano, el remojo continúa presentando una gran proporción de arte en la mayor parte de la industria molinera de maíz (Duensing et al., 2003). Luego del remojo se realiza la desgerminación del grano. Esta consiste en un proceso de remoción física de las tres fracciones principales del grano, pericarpio, endospermo y germen (Brekke, 1970). Inicialmente el desgerminado se realizaba con el sistema de desgerminación de Beall "Beall Desgerminating system", patentado en el año 1901 (Figura 9). Este molino consiste en un cono de superficie estriada con numerosas formas y tamaños los cuales rotan dentro de una carcasa y, por efecto de abrasión, las protuberancias remueven la fracción de pericarpio y germen del endospermo (Duensing et al., 2003).



Fuente: Duesing et al., 2003 (Cortesía de Beall Desgerminator Co. USA)

## Figura 9. Desgerminador de maíz Beal

Posteriormente, se generó el sistema de desgerminado Bulher (Bulher, Suiza) el cual empleaba el mismo principio anterior (Figura 10), pero el diseño estaba orientado a recuperar la mayor cantidad de endospermo intacto, con lo cual se incrementó los rendimientos de producto.

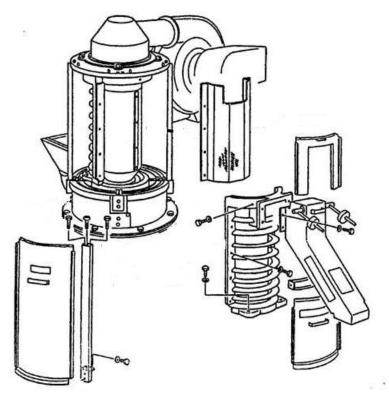


Fuente: Duesing et al. 2003 (Cortesía Buhler Inc., USA)

Figura 10. Desgerminador de maíz Bulher MKDA

Esta tecnología ha prevalecido en Venezuela y ha mejorado con el tiempo. No fue sino hasta principios del año 2000, luego muchos de años de experiencia y desarrollo que el sistema japonés de desgerminación Satake (Zatake, Japón), utilizado inicialmente en la pulitura de arroz, dio un cambio importante en los rendimientos de endospermo, al sustituir el principio de abrasión por el de fricción, con el cual se produjo un menor impacto mecánico al grano incrementando aún más los rendimientos de endospermo este equipo se presenta en la Figura 11 (Duensing *et al.*, 2003). Los procesos posteriores de molienda seca son variables conforme al producto final, pero pueden incluir cocción, laminación, secado, molienda, amasado, extracción, tamizado, entre otros.

En Venezuela la molienda seca es empleada para la producción de harina precocida de maíz. Este producto precisa de cierta cocción para su ingesta y resultó de un proceso de innovación producida por la industria cervecera mediante la molienda seca a mediados de los años 50. Para ello se separan los componentes del grano para obtener un máximo rendimiento de harina de endospermo. De este proceso se obtiene como sub-productos el pericarpio, la cáscara, el germen y las harinillas que representan el 5,5; 11,5 y 1%, del grano respectivamente, el endospermo (grits) se somete a cocción y luego por compresión mecánica se lamina formando la hojuela. Esta hojuela inmediatamente se , muele y la harina se clasifica conforme el tamaño de partícula, produciendo lo que hoy



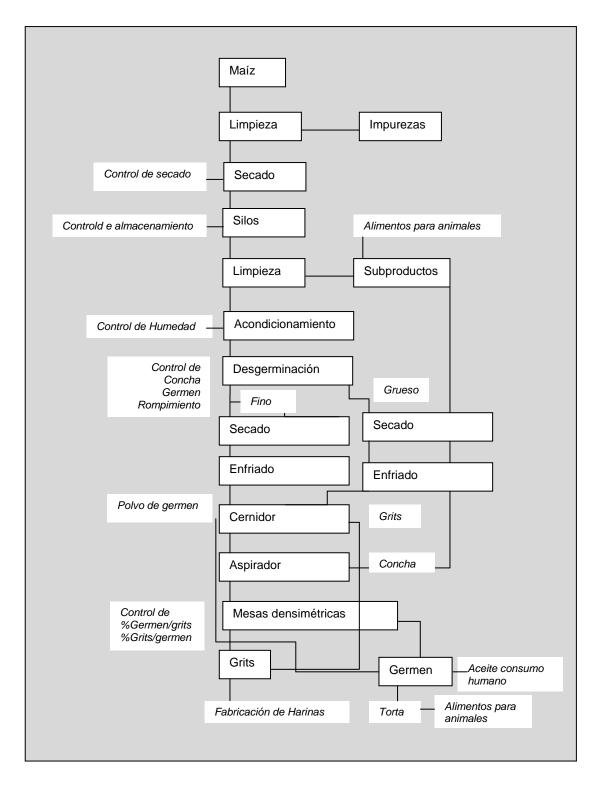
Fuente: Duesing et al. 2003 (Cortesía Satake, USA)

Figura 11. Desgerminador de maíz Satake VBF10A

se conoce como harina precocida de maíz conforme a la descripción de la Figura 12 (Cartay, 2000).

#### Determinación de la dureza del grano de maíz

A pesar de la importancia de la dureza del maíz en las aplicaciones industriales y el número de estudios que se han publicado en el tema, no hay ninguna norma generalmente aceptada para la evaluación de las características de molienda de maíz. Diferentes sistemas de medición han sido aplicados para investigar la relación entre la dureza del grano y otras variables como el contenido de humedad, las condiciones de secado, la proporción de endospermo duro e híbridos y cultivares. (Li *et al.*, 1996). La comisión de normas de maíz del Codex alimentario, Norma 153-1985, trata los aspectos relacionado a la calidad del grano, sin embargo, a excepción del color del grano, aborda aspectos de inocuidad y no de la calidad industrial. El manual del Departamento de Inspección de Granos, Envasadores y Corrales de Ganado de los Estados Unidos (GIPSA por su sigla en inglés), expone algunas pruebas para la predicción de la calidad industrial del maíz y adicionalmente existen una gran número de pruebas aprobadas oficialmente para calidad industrial que son aplicadas a maíz (Taylor y Gyebi, 2009). Estas incluyen la



Fuente: Cartay (2000)

Figura 12. Esquema de molienda seca para endospermo de maíz

medición de la resistencia a la molienda, abrasión, rendimiento de endospermo, almidón y de las propiedades de gelatinización, así como la molienda y tamizado y medida del infrarrojo cercano (NIR) (Fox y Manley, 2009).

## Densidad del grano

La calidad de molienda del maíz generalmente se estima con la densidad, una mayor densidad mejora la calidad. Esto es debido a que los defectos en el grano tales como, quemado, infestación y enmohecimiento reducen la densidad del grano. La medida mayormente usada para densidad es la densidad a granel de los granos, también se refiere como peso específico (prueba de peso), la cual es el peso de un volumen conocido de grano y su aire circundante. Esta es ampliamente utilizada en la regulaciones, por ejemplo en Venezuela la Norma COVENIN 1935-87 (COVENIN, 1987). En la mayor parte del mundo, el peso específico es expresado en Kg/ hl y es a menudo referida como Peso o masa Hectolitro, o masa por hectolitro. El peso específico es medido utilizando un aparato que consiste en una tolva que se llena con la muestra de granos (sin limpiar) y se vacía sobre el vaso de volumen conocido la muestra de grano hasta que se desborda. El exceso de grano es removido al ras del vaso usando una tabla llana con bordes curvos. El contenido de granos del vaso se enrasa y es usado para calcular el peso específico. (de un cuarto, medio o incluso un litro), (AACC, 2000b).

Otra medida de densidad es la densidad real, esta se basa en contar el número de granos de maíz que flota en una solución que puede ser de sacarosa, kerosene, tetracloruro de carbono, y el etanol, aunque la solución nitrato de sodio es la más común (Paulsen *et al.*, 2003), la mayoría de los granos que flotan son los más suaves. Sin embargo a fin de obtener resultado comparable el contenido de humedad debe tomarse en cuenta. Como el agua tiene una menor densidad que el maíz, la densidad del grano incrementa con el contenido de humedad. Otro problema es que el agua puede contaminarse rápidamente con el polvo del grado, originando falta de precisión de la data (Fox y Manley, 2009). Un procedimiento más preciso es el desplazamiento por gas, por ejemplo, usando un picnometro de desplazamiento por nitrógeno como lo describen (Serna-Saldivar *et al.*, 1993).

## Grietas por estrés y ruptura de grano

Los granos de maíz tienen tendencia a partirse o desfigurarse. Esto pasa durante el secado, especialmente con secado artificial. Las diferentes partes del endospermo se contraen a diferentes velocidades resultando en estrés que causa fisuras en el grano y estas se extienden radialmente hacia el exterior a través de endospermo vítreo hasta el pericarpio. El maíz duro es más susceptible a la ruptura que el maíz blando. El maíz con grietas es indeseable ya que se rompe fácilmente durante su manejo y procesamiento,

resultando en pérdidas de grano. En molienda seca, los granos se parten, debido a su poca resistencia a la fuerza mecánica de los molinos, resultando en bajos rendimientos de los productos primarios (los más valiosos) como las piezas gruesas de endospermo (Taylor y Gyebi, 2009).

El estrés de ruptura puede ser cuantificado por inspección visual de los granos a través de una mesa de luz fluorescente, tal como se describe en el Análisis de fractura por estrés en el manual del GIPSA sección 4.22 (GIPSA, 2007) con este procedimiento de luz que pasa a través de los granos, y las fisuras del grano se ven como líneas oscuras.

El potencial de los granos de maíz a la ruptura también pueden ser cuantificado mediante el método Nº 55-20 de la AACC llamado susceptibilidad a la ruptura del grano (AACC, 2000a), los granos son sometidos a molienda a través de un Molino Stein. El principio de la prueba de ruptura, es que la masa de grano se coloca dentro de una cámara del molino y es sometida al impacto de una cuchilla que rota a gran velocidad que lo puede fracionar. La masa total (enteros o partidos) es tamizada a través de una malla 12/64 pulgadas (4,75mm) y el porcentaje de susceptibilidad a la ruptura es calculado con la masa que pasa. Aparentemente el molino Stein no es de producción masiva, por ello otros molinos pueden ser empleados en este método, incluyendo molinos modificados de fácil construcción (Noble *et al.*, 2000).

## Dureza del grano y vitreosidad

La dureza de maíz, es decir la dureza del endospermo de maíz, es también una forma de ver el potencial del grano para molienda seca. En molienda seca, los maíces duros tienen alto rendimiento de los productos principales. Probablemente la mayoría de los métodos comúnmente utilizados de determinación de dureza de maíz es con el uso de un Stenvert de dureza (Pomeranz *et al.*, 1985).

La prueba Stenvert fue presentada por Stenvert para la dureza de trigo en 1974 (Stenvert, 1974), y luego fue introducida por Pomeranz durante la década de 1980, para mostrar la variación en la dureza del maíz (Pomeranz, *et al.*, 1984). En esta técnica, 20 g de granos de maíz con un contenido de humedad determinado, son molidos en un molino de martillo Culatti. Tres parámetros son elegidos para definir el índice de dureza: resistencia al tiempo (el tiempo necesario para moler 17 ml de harina), la altura de la harina coleccionada en el tubo, y el peso de grueso a fino de las partículas de harina resultante.

Un menor tiempo de molienda sugiere que los granos son más suaves. Este método sólo indica la dureza total y no proporciona ninguna información sobre la posible variación entre maíces (Grains Council U.S., 2000).

El método índice de tamaño de partícula revela la variación de la dureza de una muestra empleando para ello tamices diferentes, esto permite el cálculo de un tamaño promedio de partículas del grano y con ello es posible establecer la relación entre la partículas finas / gruesas. Adicionalmente, las distintas fracciones de granos pueden ser utilizadas para estudiar la estructura y la composición del endospermo que afectan a la dureza de grano. Ninguna otra prueba proporciona un intervalo de fracciones de endospermo (Taylor y Gyebi, 2009).

Uno de los primeros métodos en proporcionar una referencia de la textura de endospermo es la vitreosidad. Aunque no es una medida directa de la dureza, proporciona una medida del endospermo translúcido. Estudios sobre las zonas del endospermo que son translúcidas y opacas muestran diferencias en el contenido de proteínas y la composición (fracciones zeínas). Un gran número de estudios han correlacionado la dureza con la vitreosidad (Pereira *et al.*, 2004), también se han establecido asociaciones entre el nivel de vitreosidad a la calidad de uso final.

Existen métodos novedosos para medir la vitreosidad. Uno de ellos requiere de un sistema de análisis de imagen, donde un programa computarizado puede calcular con precisión el porcentaje de vitreosidad en cada uno de los granos. (Haddad *et al.*, 1998). Erasmus y Taylor (2004), probaron una técnica rápida y no destructiva de análisis de imagen para la determinación de vitreosidad del endospermo de maíz, mediante un sistema de luces que pasa a través de los granos. La intensidad de la translucidez en el maíz fue correlacionada linealmente con el porcentaje de iluminación del grano (r = 0,99, p <0,001). Por otra parte, se encontraron correlaciones significativas entre los valores de la translucidez corregida y los rendimientos de endospermo determinados por la disección manual.

La Abrasión Tangencial (TADD por sus siglas en ingles), es un proceso en donde los granos son molidos por abrasión en un período de tiempo definido. La cantidad de material extraído del grano se estima en gramos y los altos valores indican que los granos

son más suaves. La desventaja del TADD es que utiliza una muestra a granel y no proporciona datos sobre la variación de dentro del grano (Lee *et al.*, 2007).

Uno de los problemas de la determinación de la dureza del grano es que la base bioquímica no esta del todo clara, como en el caso de la dureza de otros cereales. Sin embargo, es conocido que el exterior, la parte vítrea del maíz, es más dura que la parte interna, de endospermo harinoso, y que la dureza esta relacionada con la proporción vítrea y harinosa del endospermo. Esta relación puede ser medida por la disección manual de los granos de las partes vítreas y harinosas que luego se pesan (Louis-Alexandre *et al.*, 1991), pero es extremadamente laborioso.

La dureza de maíz también puede ser estimada por métodos no destructivos de espectroscopía por transmitancia y reflactancia en infrarrojo cercano NIT y NIR (siglas en ingles, respectivamente). El principio de la medición por espectroscopia del NIT es que una luz a una determinada longitud de onda en la región cercana al infrarrojo la cual es absorbida por un enlace específico de diferentes sustancias químicas. La cantidad de luz reflejada, caso NIR, o transmitida, caso NIT, por la muestra, esta relacionada con la cantidad de sustancia presente. Cabe destacar que la espectroscopia por NIR es una técnica secundaria y como tal es un instrumento que debe ser calibrado por un modelo método estándar físico o químico. Hasta la fecha, la calibraciones se han desarrollado empleando el TADD (Lee *et al.*, 2005; Wehling *et al.*, 1996), el molino Stenvert (Armstrong *et al.*, 2007), método flotación (Eyhérabide *et al.*, 1996), El uso de una sola longitud de onda (860 o de 1680 nm) así como la absorción máxima / reflexión entre 620 y 680 nm también se ha utilizado para referirse a dureza (Robutti, 1995).

La viscoamilografía a través del Rapid Visco Analyser (RVA) es una técnica que utiliza material molido, mezclado con agua y constantemente agitado mientras que la muestra se calienta a 100°C. El método proporciona información sobre las propiedades del almidón, incluyendo viscosidad de la pasta, la temperatura y el tiempo de empaste. Esta técnica como el método de Stenvert, requiere un paso de molienda y el tiempo de cada prueba puede variar de 10 a 25 minutos. Los gránulos de almidón en maíces con mayor dureza endospérmica tienen una hidratación más lenta cuando se calientan en agua y consecuentemente alcanzan menores niveles de viscosidad frente a maíces más suaves (Almeida-Dominguez *et al.*, 1997). El RVA genera una gran cantidad de datos los cuales

requieren un operador entrenado para interpretar los resultados. Este método es adecuado como un método rápido de rutina para determinar la dureza, proporciona resultados suficientemente robustos para distinguir claramente entre cultivares de maíz de diferentes durezas del maíz.

## Factores que afectan la dureza del grano

Los niveles de humedad tienen un efecto importante sobre la ruptura del maíz, un aumento del contenido de agua en el grano puede producir ablandamiento del endospermo (Fox y Manley, 2009). En un estudio llevado por Pomeranz et al. (1985), para la determinación de dureza mediante varios métodos de ensayo, encontraron que un aumento de la humedad del grano de 12% a 16% disminuye la densidad por el hinchamiento de los granos e incrementa los valores obtenidos por el equipo de medición NIR a 1680 nm. También encontraron que las altas humedades del grano disminuyen su fragilidad, incrementa el tamaño de partícula y el tiempo requerido para molerlo cuando se utiliza el Stenvert, esto se debe a un comportamiento plástico o elástico del grano por el alto contenido de agua presente.

Herum y Blaisdell (1981), al evaluar los efectos del contenido de humedad y temperatura sobre la dureza del grano mediante las pruebas de tiempo de molienda y tamaño de partícula, encontraron diferencias de la dureza por efecto del contenido de humedad. Por otra parte encontraron diferencias en la sensibilidad de los métodos conforme el contenido de humedad, por ejemplo a menos de 13% de humedad, la prueba de Ruptura por el Stein tiene valores estadísticamente más altos de ruptura que la prueba de impacto centrifugado del grano, mientras que por encima de 13% las diferencias entre las muestras son relativamente pequeñas.

Las propiedades de los granos varían de acuerdo al cultivar, condiciones ambientales, tales como el tipo de suelo, el agua, la fertilidad, y el clima, y el manejo durante y después de la cosecha (Watson, 1987). El ambiente de desarrollo de cultivo tiene un impacto importante en la calidad final del grano. Para los cultivos de cereales, el suelo, el perfil de nutrientes, la humedad disponible, y las condiciones ambientales antes y durante el llenado de grano pueden influir en el contenido almidón y proteínas. La proteína y el almidón del maíz condicionan la dureza, y estos a su vez son influenciados por el medio ambiente del crecimiento del cultivo (Fox y Manley, 2009).

En ensayos de campo, pequeñas variaciones dentro del campo, incluso dentro de un microambiente pueden afectar el contenido de proteínas y, en consecuencia, la dureza del grano (Kelly et al., 2007). Smith et al. (2001), indicaron que la exposición de maíces a ciertos rangos de variaciones de temperaturas ambientales durante su desarrollo afectan la dureza del endospermo. Por otra parte, temperaturas muy altas o muy bajas también pueden afectar las características del llenado de grano, que luego afectan almidón y la síntesis de proteínas (Monjardino et al., 2005). Conocer la relación entre componente ambiental y la dureza del maíz resulta importante para el agricultor ya que con ello se planificarían adecuadamente las labores de manejo y cosecha en función de obtener altos rendimientos y mejoras de la calidad de la dureza del grano.

Los fertilizantes nitrogenados tienen un impacto sobre el contenido final de proteínas, a su vez, el aumento de la proteína puede ser vinculado a un aumento en vitreosidad y dureza (Cheetham *et al.*, 2006). La dureza del grano puede ser aumentada mejorando la fertilización con nitrógeno (Hamilton, 1951). Estudios de la dureza de híbridos de maíz, cultivados en Argentina han evidenciado efectos importantes del genotipo el ambiente y su interacción sobre las variables asociadas a la dureza del grano (Eyhérabide *et al.*, 2004). En el caso de Venezuela, Robutti *et al.* (2000) indicaron que es posible el aumento de la dureza de los cultivares mediante la utilización de variedades autóctonas.

Las variedades de maíz varían genéticamente en la susceptibilidad a la ruptura y la medida de "dureza verdadera" es indicativa de la susceptibilidad a la ruptura. La susceptibilidad a la ruptura afecta el uso de maíz, por ello debe ser consideradas en la evaluación durante el desarrollo de cultivares (Pomeranz et al., 1984). Pereira et al. (2008), al evaluar maíces tipo normal, opaco y QPM indicó que existen diferencias importantes en cuanto a los niveles de dureza en un rango de 1,06 a 1,32 los menores valores fueron asociados a los granos con endospermo suave. Por otra parte, evidenciaron que los maíces de alta dureza presentaron altos contenidos de proteína totales.

La dureza de grano varía de acuerdo al genotipo de maíz. Almeida-Dominguez et al., (1997), al estudiar diferentes variables asociadas a la dureza incluyendo los perfiles amilográficos, encontraron que se alcanzaban mayores viscosidades cuando los maíces presentaban menor dureza endospérmica. Esto fue corroborado por González et al. (2005), al estudiar el efecto de la dureza sobre las propiedades de hidratación y cocción,

en siete genotipos de maíz. Estos autores encontraron una fuerte asociación entre la dureza y el poder de hinchamiento de los almidones, los cuales fueron atribuidos a la presencia de la membrana proteica en el endospermo, e indicaron que a medida que la dureza aumenta en los genotipos disminuye el poder de hidratación, la viscosidad y la consistencia de la dispersión de harina de maíz. Debido a que la dureza del grano está sujeta a un componente genético, es posible mejorar la dureza del grano vía mejoramiento genético por la introducción de líneas de tipo duro en el germoplasma con otras características deseables tales como alto rendimiento en cosecha (Fox y Manley, 2009).

En respuesta a todas las variables de calidad de grano la tendencia ha sido el establecimiento de un sistema de evaluación bien definido (regulaciones) y la selección de protocolos para la comercialización de un maíz con "calidad de molienda seca". Muchos de los atributos ya descritos, tales como peso específico y susceptibilidad a la ruptura, pueden ser medidos de una muestra de granos representativa. Estos ensayos pueden ser parte de las especificaciones de calidad del maíz destinado a las industrias ya que son medibles en la recepción del maíz y en tiempo real. Otros molinos han desarrollado una lista de cultivares de maíz mediante programas de mejoramiento genético los cuales han sido suficientemente evaluados considerando la trazabilidad en el tiempo y los ambientes de producción. Esto los ha hecho merecedores de la distinción "identidad preservada" para la calidad de molienda. En este contexto, todo parece indicar que la relación entre los programas de mejoramiento, semilleristas, molineros y usuarios finales del producto se volverá cada vez más fuerte.

# IV. MATERIALES Y MÉTODOS

#### **Materiales**

Para el estudio se emplearon veinte híbridos experimentales de maíz (genotipos), identificados con códigos, pertenecientes al ensayo Élite del programa de mejoramiento de maíz de Fundación Danac y tres testigos de híbridos comerciales, SEFLOARCA 96 (SEFLOARCA, Venezuela), DK777 (Dekalb, EE.UU) y 30R92 (Pionieer, EE. UU.). Los ensayos Élites constituyen la última etapa del desarrollo de cultivares dentro del programa de mejoramiento genético. Este se establece para seleccionar 1 o 2 genotipos experimentales que serán inscritos en pruebas de campo (siembras) en Venezuela denominadas Ensayos Regionales Uniformes (ERU) coordinados por el Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA) para el Servicio Nacional de Semillas (SENASEM), con la intención de evaluar su comportamiento en campo y rendimientos (Kg/ha) para así obtener la certificación de la semilla y poder ser legalmente comercializada. Un híbrido de maíz que opte para elegibilidad debe aprobar dos años de evaluación en el ensayo ERU, dicha aprobación se obtiene cuando el cultivar supera en rendimiento de grano el promedio del ensayo.

El ensayo Élite estuvo conformado por los mejores genotipos obtenidos luego de un fuerte proceso de caracterización y selección de varios ciclos de cultivo en un período de tiempo no menor de 6 años. Los criterios de evaluación durante el mejoramiento genético de los maíces, incluyeron la evaluación de descriptores agronómicos como el rendimiento en campo (Kg/ha), los días de floración, el acame de la planta, la inserción y dimensiones de la mazorca; la evaluación de resistencia del cultivo a las plagas y las enfermedades de importancia comercial y finalmente la evaluación de la calidad de uso final de maíz. En el presente estudio sólo consideró la información generada de las variables de calidad asociadas a la dureza del grano.

#### **Ambientes**

Los híbridos fueron sembrados en la misma época en tres de las principales regiones maiceras venezolanas las cuales se describen como sigue: i) Estación experimental de Fundación Danac, ubicada en San Javier, estado Yaracuy, (10°21′55′′ N, 68° 39′12′′ W) a una altitud de 103 MSNM; ii) Estación experimental del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA) Turén, ubicada en la Colonia Agrícola Turén, estado

Portuguesa (9°15′59′′ N, 69°105′40′′W), con 134 MSNM de altitud; y iii) Unidad de producción agrícola "Finca las Guacamayas", ubicada en El sombrero estado Guárico (9° 8′22′′ N, 67° 0′53′′ W) a una altitud de 170 MSNM.

## Diseño experimental y manejo agronómico

Los maíces fueron sembrados bajo un diseño completamente aleatorizado con dos observaciones por tratamiento. Los tratamientos fueron definidos por la combinación de 23 genotipos de maíz y tres ambientes. La unidad experimental estuvo constituida por muestras de aprox. 1,2 kg de granos acondicionados a 12% de humedad cosechados en parcelas de 2 hileras de 5 m de largo en un área de 7,28 m². La siembra se realizó en líneas separadas a 8 cm y a una distancia entre punto de siembra de 25 cm, se colocaron dos semillas por punto y se les aplicó directamente un herbicida pre-emergente. La fertilización básica se realizó a los 7 días después de la siembra (DDS) y el raleó se realizó a los 15 y 21 DDS. Entre los 20 y 28 DDS se aplicó un abono complementario con urea a una dosis de 150 Kg/ha. Finalmente las muestras se cosecharon manualmente a los 118 DDS a una humedad promedio de 20%.

De cada ambiente se tomaron los datos climáticos de precipitación (mm), humedad mínima, máxima y promedio del día (%), Temperatura mínima, máxima y promedio del día (°C) y radiación solar (cal/cm²/día). En El Sombrero se utilizaron los datos de la Estación de la Aviación Militar Bolivariana, Carrizales, ubicada en El Sombrero, Estado Guárico, latitud: 09°25′ N longitud: 66°55′ W. En San Javier se emplearon los de la Estación climatológica Naranjal de Fundación Danac ubicada en San Javier, estado Yaracuy, latitud 10°21′55′′ N y longitud 68° 39′12′′ W; en Turén se utilizaron los datos climáticos de la Estación Meteorológica de Araure del Centro de Investigaciones Agropecuarias del Estado Portuguesa, Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA) ubicada en las coordenadas Latitud 9° 36′ N y Longitud 69° 13′ W Altura: 200 msnm. Los datos climáticos fueron promediados por estado del grano durante el desarrollo y maduración de los granos considerando las etapas del cultivo descritas por Cabrera (2002) como sigue: estado polinización-inicio ampolla 50-65 DDS (días después de la siembra), estado ampolla 66-77 DDS, estado pastoso 78-84 DDS, estado dentado 85-95 DDS y estado madurez-secado 96-118 DDS.

#### Acondicionamiento de la muestra

El acondicionamiento y los análisis de las muestras fueron realizados en el Laboratorio de Calidad de Granos y Semillas de Fundación Danac, para ello las mazorcas de cada muestra se trillaron y los granos fueron empacados en bolsas de lienzo identificadas para facilitar su manipulación. Luego se secaron con exposición solar, para reducir los daños por calor sobre la dureza del grano, hasta alcanzar un nivel de humedad 13±1% y se reposaron durante 24 horas a temperatura ambiente para equilibrar la humedad y temperatura del grano. La limpieza de la muestra seca se llevó a cabo mediante aspiración de las impurezas con un aspirador Bates (Rapsco, USA). Finalmente la muestra fue homogenizada con el uso de un homogenizador Boerner (Seedburo equipment, USA) y se dividió en varias sub-muestras que fueron destinadas a los respectivos ensayos de dureza de grano siguiendo la secuencia descrita en el esquema de la Figura 13.

#### Humedad

La humedad del grano se determinó utilizando el método de desecación por estufa Nº 925.10 de la AOAC (1990) y los resultados se expresaron como porcentaje en base húmeda.

#### Proteína

La determinación de proteína fue realizada a la muestras de maíz desgrasado mediante el método de Kjeldhal COVENIN 1195-80 (COVENIN, 1980a)

#### Grasa

La determinación de grasa fue realizada a la muestras de endospermo limpia mediante el método de determinación Soxhlet COVENIN 1785-81 (COVENIN, 1980b).

## Peso específico (PE)

Se realizó mediante el método descrito en la norma venezolana COVENIN N° 1935-87 (1987) utilizando una balanza de peso específico Seed Buro Equipment (USA) con un receptor de muestra de 1 L Ohaus (USA). La tolva de alimentación se ubicó a una altura de 5cm del recipiente y los resultados fueron expresados en g/L.

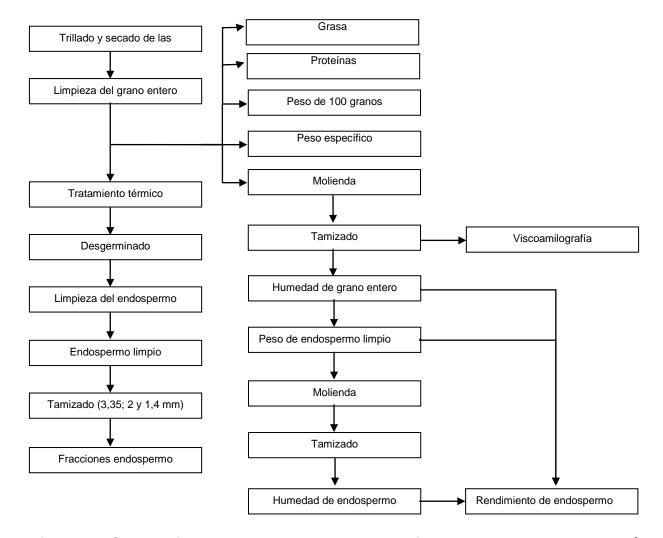


Figura 13. Secuencia de los ensayos de dureza aplicados a las muestras de maíz

## Peso de 100 granos (P100)

El peso de 100 granos se obtuvo del peso de 100 granos tomados al azar y los resultados fueron expresados en gramos conforme a los descrito por Grains Council U.S. (2000).

## Perfil amilográfico

La viscoamilografía de los maíces se determinó con el uso de un Rapid Visco<sup>TM</sup> Analizer (RVA) Super 3 (Newport Scientific, Australia). Para ello las muestras de grano entero fueron molidas en un Cemotec 1090 (FossTecator, Suiza) y luego tamizadas en una malla 180 μm. El perfil viscoamilográfico aplicado fue el utilizado previamente por Almeida-Domínguez *et al.* (1997) que consistió en tomar una solución de harina a una concentración sólidos de 18% (3 g de harina) y someterla a las condiciones operativas señaladas en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Perfil amilográfico utilizado en la evaluación del grano

Tiempo (min)	Variable	Definición y unidades
00:00:00	Temperatura	50°C
00:00:00	Velocidad	960RPM
00:00:10	Velocidad	160RPM
00:01:00	Temperatura	50°C
00:21:00	Temperatura	95°C
00:25:00	Temperatura	95°C
-		

Fuente: Almeida-Domínguez et al. (1997)

En las corridas se determinaron las viscosidades pico y final también se determinaron viscosidades a diferentes temperaturas de la corrida amilográfica que correspondieron a 72,5; 74,75 y 77,0°C todas expresadas en RVU; por otra parte, se determinó el tiempo en alcanzar la viscosidad pico (min) y la temperatura de empaste (°C).

## Rendimiento de endospermo (RE)

La determinación de rendimiento de endospermo consistió en sumergir 100 g de cada muestra de grano entero en agua a 100°C durante 90 segundos con agitación constante, luego se secó con papel absorbente y se dejó reposar durante 5 min para facilitar la separación de los constituyentes del grano. La remoción de la mayor parte del germen y pericarpio se realizó con el uso de un molino McGill Nº2 (Rapsco, USA) con un tiempo de operación de 25 segundos, utilizando una pesa de presión de 0,66 g situada a 1,5 cm del extremo del brazo de presión del molino. La muestra resultante se colocó en una columna densimétrica de aspiración Modelo 757 (Seedburo equipment, USA), durante 30 segundos para separar el resto de los constituyentes del grano y finalmente se realizó una remoción complementaria con espátulas de forma manual para eliminar los restos de pericarpio y germen que pudieran haber quedado adheridos al endospermo y se determinó el peso total del endospermo limpio en gramos. Se tomaron fracciones de endospermo limpio y también de otra sub-muestra de grano entero y fueron molidas para la determinación de humedad en base húmeda mediante el método de desecación por estufa N° 925.19 (AOAC, 1990). La humedad de las porciones ya descritas fue utilizada para la determinación del rendimiento de endospermo corregido a 12% el cual fue calculado a partir de la siguiente fórmula:

Re (%)= 
$$\frac{\text{Pe x (100-He)}}{\text{Pg x (100-Hg)}}$$
 X 100

Donde:

Re, representa el rendimiento de endospermo en base a grano entero corregido a 12% de humedad

Pe, es el peso de endospermo en gramos

Pg, es el peso de grano entero inicial (100g)

He, Humedad de endospermo (%)

Hg, Humedad del grano entero (%)

## Granulometría del endospermo

Para la determinación del tamaño de las diferentes fracciones de endospermo se tomaron 100 g de muestra y fueron aplicados los procedimientos utilizados para la determinación del rendimiento de endospermo hasta la obtención del endospermo limpio. De esta fracción se tomaron 50 g que fueron separados de acuerdo a su retención (+) sobre los tamices de 3,35; 2 y 1,4 mm con el uso de un agitador Octagon (Endecot, Inglaterra), esta operación fue realizada en un tiempo de 5 min a una intensidad de vibración de 9 amperios. Las fracciones retenidas en las diferentes mallas fueron determinadas en gramos y también se determinó la fracción resultante (-) del tamiz 1,4 mm. Finalmente se calculó el porcentaje de las diferentes fracciones de endospermo resultando en +3,35 (partículas >3,35 mm); +2 (partículas <3,35 mm y ≥2 mm); +1,4 (partículas <2 mm y ≥1,4 mm) y -1,4 mm (partículas <1,4 mm).

#### Análisis de los resultados

Los resultados corresponden al promedio de dos replicas por repetición para todas las variables evaluadas. Paras fines prácticos todas las variables que asociadas a la dureza y la susceptibilidad a la ruptura del grano serán denominadas en el presente estudio como "variables de dureza de grano". La caracterización de los genotipos experimentales fue realizada mediante estadística descriptiva de los datos colectados de todas las localidades. En la evaluación de los diferentes métodos de ensayo se realizaron ensayos de correlación y regresión y de esta manera estudiar el grado de asociación entre las diferentes variables de dureza de grano. En la evaluación de los genotipos y los ambientes se realizó un análisis de varianza de acuerdo al diseño establecido

considerando con fuentes de variación los efectos genotipos y ambiente y su interacción. Adicionalmente, se aplicó el análisis de correlación y gráficos para estudiar los efectos del clima sobre la dureza del grano. Todos los análisis fueron ejecutados por medio del programa estadístico SAS JMP. Versión 7.0.2 (SAS, 2007).

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de la dureza de grano en maíces cultivados en tres zonas productoras de Venezuela.

En el Cuadro 2 se presentan los promedios de las variables consideradas en el presente estudio, las cuales están clasificadas en tres sub-grupos: cultivares experimentales, cultivares comerciales y ambientes.

Los promedios de humedad de los cultivares experimentales, cultivares comerciales y ambientes de producción fueron de 13,58%; 13,50% y 13,57%, respectivamente. Los rangos de humedad resultaron bajos dentro de cada sub-grupo, encontrándose rangos similares dentro de cultivares experimentales y ambientes de 0,52% y 0,62%, y rangos aún más bajos dentro de los cultivares comerciales con 0,09%. Debido a que existen efectos importantes de humedad sobre la dureza del grano, como fue demostrado previamente por Pomeranz et al. (1985), quienes revelaron que tres variables asociadas a la dureza del grano experimentaron disminuciones importantes con el aumento del contenido de humedad del grano de 12% a 16%, las condiciones controladas del ensayo y el secado natural que experimentó las muestras del presente estudio produjo bajas variaciones de los niveles de humedad dentro y entre los diferentes subgrupos. Las pequeñas variaciones encontradas en los niveles de humedad pueden ser atribuidas a diferencias estructurales de los granos, las cuales pueden favorecer o limitar la absorción de humedad por capilaridad de los granos (Paulsen et al., 2003), y en consecuencia su humedad de equilibrio con el ambiente.

niveles de grasa de los granos presentaron promedios similares en los tres sub-grupos enmarcados entre 5,20%; 5,22% y 5,34% en genotipos experimentales, comerciales y ambientes, respectivamente. Los rangos de grasa fueron bajos y similares para cultivares experimentales y comerciales (0,83-0,89%); y las diferencias entre ambientes fueron aún más pequeñas con un rango de 0,05%. De la evidencia bibliográfica se puede destacar que diferencias en los niveles de grasa probablemente pueden afectar la sensibilidad del método de dureza empleado, por ejemplo la relación fino/grueso y las propiedades de hidratación y cocción estudiadas por González *et al.* (2005) resultaron variables en maíces con diferentes niveles de grasa, esto también fue evidenciado por Almeida-Dominguez *et al.* (1997), al estudiar las variables viscoamilográficas en maíces enteros y

Cuadro 2. Promedios por genotipo y ambientes de las variables de dureza de grano

Genotipo	Humedad Grasa Proteínas	Grasa	Proteínas	Rend.	Peso	Peso			Malla (%)	(%)					RVA		
	(%)	(%)	(%)	de	especif.	de 100					ľ		Viscos	Viscosidad (RVU)		Tiemp.	Temp.de
				endos.	(a/L)	granos	3,35	7	1,4	-1,4	٥	72,5°C	74,75°C	77,00°C P	Pico Final	Ö	empaste
				(%)		(6)	E E	m E	шш	шш	/Fino					(min)	(၁)
Experimentales																	
D258	13,7	5,6	2,6	72,4	781,8	29,7	94,8	4,5	9,0	0,10	20,8	17,6	206,1		377,4 204,6	16,1	69,4
D786	13,6	5,1	7,8	73,1	765,8		94,2	4,9	2,0	0,13	18,3	16,1	199,1		372,1 191,7	, 15,9	69,4
D644	13,5	4,9	6,2	74,0	778,2		94,6	4,6	2,0	0,10	19,5	13,6	177,9	٠.	346,2 187,0	_	69,5
D361	13,6	5,2	7,3	74,8	793,3	30,3	93,9	5,3	2,0	0,10	17,2	17,1	189,5		368,3 196,4	16,2	69,1
D513	13,7	5,1	7,9	72,5	780,5	33,8	93,1	5,8	1,0	0,13	15,9	27,5	257,5	397,2 4	412,5 207,1	15,8	69,4
D442	13,4	5,4	7,2	75,2	783,2	29,2	95,7	3,8	0,5	0,08	22,7	10,4	169,4	338,7 3	352,2 188,2	16,0	69,5
D637	13,8	5,3	7,0	71,5	764,8		91,9	8,9	1,1	0,13	12,6	20,8	264,4		418,5 219,2	Ì	8'69
D564	13,7	4,9	7,3	72,2	774,4		94,8	4,4	2,0	0,13	19,4	20,3	226,8		393,4 201,1	•	669
D195	13,6	5,2	8,3	73,6	776,9		95,2	3,9	2,0	0,14	21,1	8,0	182,7		364,6 197,8		
D756	13,6	2,0	7,7	74,3	777,3		95,2	4,2	0,5	0,10	21,6	20,1	216,1		63,6 190,6		
D921	13,5		7,0	76,4	784,0		0'96	3,4	0,5	0,10	27,1	13,0	133,8		291,2 170,0	16,5	
D313	13,7	5,2	2'9	77,1	791,7		97,5	2,2	0,3	0,05	39,6	14,8	94,2		233,2 144,1		
D889	13,5		7,5	6'92	792,4		8'96	2,7	0,4	0,07	30,7	10,0	96,5		268,8 160,7	7 16,5	
D461	13,6		7,2	75,6	785,7	34,7	95,5	3,9	9,0	0,09	22,5	11,0	141,8		312,6 176,3	•	6,89
D695	13,5	5,2	7,4	71,5	774,2		95,2	4,0	9,0	0,12	24,1	29,4	331,4		462,9 231,9	15,1	069
D249	13,7		7,3	73,3	777,3	30,5	93,7	5,3	8,0	0,14	16,9	15,9	221,4		343,5 196,3		9'69
D374	13,5	5,3	2,6	2'69	767,5	29,2	94,5	4,7	2,0	0,14	17,7	22,9	323,1		458,3 203,1	•	69,4
D536	13,7	5,3	7,5	73,6	772,3	30,5	94,4	4,8	2,0	0,11	17,1	14,9	192,2		349,4 186,9	15,9	69,4
D833	13,3	5,4	8,9	73,1	769,4	32,2	6'26	3,5	0,5	0,10	24,5	10,0	204,3	372,3 38	381,8 200,7	`	8'69
D927	13,6	5,1	7,5	72,4	761,4	29,9	92,1	6,9	6,0	0,11	13,3	21,2	283,1	460,1 4	477,4 236,7	, 15,8	9,69
Comerciales																	
P1409BW	13,5	5,9	7,3	74,5	794,9		92'6	3,8	0,5	0,11	23,4	33,6	258,7		97,8 201,2	•	69,1
30R92	13,6	5,2	7,1	74,6	770,4	30,9	94,8	4,3	8,0	0,13	22,9	27,1	197,6	305,7 3	313,1 172,9	15,6	69,4
SEFLOARCA 96	13,5	5,0	7,6	72,4	786,4	28,9	93,9	5,2	8,0	0,14	17,7	17,2	192,6		350,7 190,9	•	
Ambientes																	
El Sombrero	13,2	5,2	7,1	75,1	791,0		95,5	3,9	9,0	0,10	22,8	13,1	160,7	320,9 3	345,9 192,8		9'69
San Javier	13,9		7,6	74,9	775,8		0'96	3,4	0,5	0,12	25,7	2,6	162,5	336,4 3	349,4 181,1	15,8	
Turén	13,6	5,2	7,3	71,2	768,4	29,5	92,9	6,1	6,0	0,11	15,1	30,4	290,9	391,7 39	396,3 205,8		069

desgerminados. Lo anterior se atribuye a la naturaleza hidrofóbica de los cuerpos aceitosos del maíz, lo cual puede afectar la absorción de agua. Los niveles de proteína presentaron promedios muy similares para los tres sub-grupos, mientras que los rango fueron bajos y similares entre los genotipos comerciales y los ambientes, sin embargo los cultivares experimentales exhibieron mayores diferencias en un rango de 2,08%.

Los promedios generales de rendimiento de endospermo (RE) de los sub-grupos cultivares experimentales, cultivares comerciales y ambientes fueron de 73,72%, 73,83% y 73,73%, respectivamente. Se encontraron altos promedios y bajos rangos de rendimiento de endospermo para los maíces comerciales (2,16%), esta respuesta puede ser atribuida a que estos cultivares ya han sido liberados en el mercado con rendimientos de harinas suficientemente probados y aceptados por la industria nacional. Los genotipos experimentales presentaron mayor rango de RE que los cultivares comerciales (7,16%), debido a la presencia de niveles tanto superiores (77,13%) como inferiores (69,74%) con repecto a los cultivares comerciales. Lo anterior podría ser atribuido a la diversidad genética de los genotipos. De acuerdo a la información suministrada por el programa de mejoramiento que llevó el presente estudio, se considera un maíz de alta calidad industrial aquellos que presenten un RE equivalente o superior a 70% del peso total del grano.

Los ambientes de producción de maíz presentaron un rango de variación de 3,96% para los promedios de RE donde los ambientes El Sombrero (Edo. Guárico) y Turén (Edo. Portuguesa) estuvieron asociados a altos y bajos rendimientos, respectivamente, pese a que ambas son zonas de elevada producción y rendimiento en Kg/ha (datos no mostrados). Lo anterior evidencia que algunas zonas de producción favorecen notoriamente la expresión de la dureza de algunos genotipos de allí la importancia de validar la dureza de grano en varios ambientes de producción nacional.

El peso específico (PE) es una medida rápida e indirecta de la dureza del grano y es el único método de ensayo de dureza considerado por la norma venezolana para maíz de uso industrial. Para los genotipos experimentales el PE alcanzó un valor promedio de 777,38 g/L y un rango de 31,83 g/L. Los promedios de PE de los cultivares comerciales alcanzaron los mayores valores de todos los sub-grupos evaluados, seguidos por los promedios ambientales; mientras que los rangos de PE para los cultivares comerciales y ambientes resultaron inferiores con valores entre 22 y 24g/L. El PE de los cultivares y entre ambientes superaron ampliamente los valores definidos por la Norma COVENIN

1935-87 para ser considerado como maíces de máxima calidad (Tipo I >750g/L). Las diferencias de PE encontradas probablemente se atribuyen a diferencias en el grado de compactación del endospermo, forma y tamaño del grano.

El peso de 100 granos (P100), al igual que los niveles de proteínas, presentaron promedios similares para los tres sub-grupos evaluados, siendo estos enmarcados entre un máximo de 30,90 g obtenido para los genotipos experimentales y un mínimo de 29,71 g alcanzado por los cultivares comerciales. En contraste, los rangos de P100 presentaron mayores diferencias entre los sub-grupos siendo estos de 7,38 g; 1,94 g y 4,45 g, correspondientes a cultivares experimentales, comerciales y ambientes, respectivamente.

Las diferencias existentes entre los materiales experimentales obedecen a la variabilidad genética de los genotipos evaluados en cuanto a dureza, tamaño y forma del grano. En el proceso de selección usualmente se considera cómo adecuados, para efectos de calidad industrial, aquellos genotipos experimentales que presenten promedios similares o superiores al mejor testigo, de manera que si se quiere asegurar que los genotipos evaluados tengan éxito en la industria, se seleccionarán aquellos que presenten valores superiores al menor valor P100 alcanzado por el testigo comercial, para este caso, DK777 con 30,86 g. De allí la importancia de cultivar un testigo de alto potencial como base comparativa al momento de seleccionar maíces de alta calidad industrial.

La granulometría del endospermo, luego se ser molido por el McGill Nº2, presentó los mayores promedios de tamaños de partícula en aquellas retenidas sobre la malla de 3,5 mm (+3,35 mm), con valores de 94,74%, 94,77% y 94,77% para cultivares experimentales, comerciales y ambientes, respectivamente; y se encontraron pocas variaciones entre los diferentes sub-grupos evaluados. El resto de los promedios al igual que los rangos disminuyeron conforme a la reducción del tamaño de la partícula y ambos parámetros estadísticos fueron indistinguibles entre los sub-grupos. Esto indica que a medida que se reduce el tamaño de las partículas probadas en este estudio, los niveles marcadamente bajos alcanzados por las mallas de menor tamaño, probablemente incrementen el error experimental y limite el establecimiento de verdaderas diferencias entre los cultivares y entre los ambientes, en lo referente a la dureza del grano.

Las variables amilográficas obtenidas durante el empaste del grano entero molido, presentaron diferentes promedios entre cultivares y entre ambientes. Las viscosidades

promedios a los 72,5°C fueron mayores para los cultivares comerciales con 25,96 RVU, el resto de los sub-grupos presentaron valores comprendidos entre 16 y 17 RVU. Las viscosidades a partir de los 74,75°C hasta la viscosidad pico (VPICO) experimentaron incrementos sostenidos de sus promedios, con cambios marcados de viscosidad entre los 72,5°C y 74,75°C.

Se encontraron menores cambios en los rangos de viscosidad a partir de los 77,00°C hasta la VPICO. Los rangos presentaron incrementos importantes para los maíces experimentales y para los ambientes; mientras que los cambios para los cultivares comerciales fueron comparativamente más bajos. Esto cambios de viscosidad pueden ser el resultado de las diferencias genéticas marcadas en la expresión de la dureza del grano de los genotipos experimentales la cual se ve reducida para los maíces comerciales. Para VPICO y viscosidad final (VFIN) los promedios resultaron, similares dentro de los subgrupos, mientras que los rangos para estas variables presentaron las mayores diferencias, siendo estos rangos mayores en los maíces experimentales seguidos de los comerciales y los ambientes.

La temperatura de empaste (TPAS) en general presentó poca variación de sus promedios y los sub-grupos estuvieron enmarcados entre 69,22 °C y 69,98°C. En lo referente a los rangos de TPAS, los cultivares comerciales y ambientes presentaron bajos niveles; mientras que dentro de los maíces experimentales las diferencias de TPAS fueron mayores, por ello exhibieron un rango superior al resto de los sub-grupos.

Evaluación del nivel de asociación de diferentes métodos de determinación de dureza de grano y su potencial para estimar el rendimiento industrial de los maíces nacionales.

#### Evaluación de métodos de determinación de dureza

La estadística descriptiva por genotipos evaluados bajo diferentes métodos de dureza de grano, se presentan en el Cuadro 3, allí se observa los valores promedios, desviación estándar (DE) máximos, mínimos, rangos, cociente rango / desviación estándar (R/DE), entre otros estadísticos.

Los métodos empleados presentaron diferentes niveles de variación de los estadísticos evaluados. Los promedios de RE variaron de 64,34% a 73,57% (rango 14,23%) este valor se atribuye a diferencias en los germoplasmas utilizados a pesar de estar categorizados dentro de un mismo tipo de maíz (duro), cabe destacar que las comparaciones de los diferentes métodos de dureza fueron realizadas dentro de este rango de niveles de dureza. Los valores de dispersión con base a la DE fueron bajos para RE, P100, TPICO, TPAS y en todas las fracciones de partículas salvo G/F, el resto de las variables presentaron altos DE y altos rangos en las respuestas.

En granulometría se encontró una disminución de la DE con la reducción del tamaño de partículas y las diferencias entre los tamaños de partículas de los maíces disminuyeron de 10,30 a 0,17 en las malla 3,35mm y -1,4mm, respectivamente. Esto es indicativo a que el pulidor McGill Nº2 es capaz de producir diferencias sustanciales en partículas grandes pero causa la misma recuperación de partículas pequeñas para los tipos de maíces duros estudiados.

En las variables de viscosidad los niveles de dispersión (DE) para TPICO y TPAS fueron los más bajos de todas las variables amilográficas estudiadas. Se encontró un incremento de la DE y el rango con el aumento de temperatura de 72,5°C a 74,75°C que luego disminuyó para la VPICO y posterior VFIN. Lo anterior explica que ciertas temperaturas del perfil amilográfico, favorecen al establecimiento de diferencias en las propiedades de hidratación y cocción evidenciadas por los cambios de viscosidad, que pueden ser indicadores indirectos de la dureza tal como lo señala Gonzales *et al.* (2005).

Para comparar las diferencia en la bondad de cada variable asociada a la dureza del grano se consideró la relación rango /desviación estándar (R/DE) usada por Tran *et al.* (1981), indica que mientras mayores sean las diferencias entre muestras y menor sea la desviación estándar entonces la prueba será más sensible y es más confiable para establecer diferencias de dureza entre las muestras.

Cuadro 3. Estadística descriptiva de las variables asociadas a la dureza del grano de maíz

Genotipo	Humedad Grasa Proteínas	Grasa	Proteínas	Rend.	Peso	Peso		2	Malla (%)	(9					RVA			
	(%)	(%)	(%)	Endos.	específico	de 100					l		Viscos	Viscosidad (RVL	(D,		Tiempo	Temp.de
				(%)	(g/L)	granos	3,35	2	1,4	4,1-	Grueso 72,5°C 74,75°C 77,0°C	72,5°C	74,75°C	77,0°C	Pico	Final	del Pico	empaste
						(B)	mm	mm	mm	E	/Fino						(min)	(၁)
Media	13,6	5,2	7,3	73,7	778,5	30,7	94,8	4,5	2'0	0,1	21,2	17,8	205,0	349,8	364,0	193,3	15,9	69,5
Mediana	13,6	5,2	7,3	74,1	780,3	30,7	95,3	3,9	9,0	0,1	20,3	13,5	174,5	345,0	361,0	192,3	15,9	69,4
Moda	13,8	5,1	8,1	75,2	790,5	33,7	96,3	3,1	0,5	0,1	26,2	16,7	174,5	313,7	412,5	190,3	15,7	9'89
Desviación estándar	. 0,4	9,0	1,2	3,0	18,4	3,1	2,2	1,9	0,3	0,0	8,4	15,4	0,66	79,8	74,7	28,7	2'0	6,0
Varianza	0,2	0,4	1,4	8,8	337,0	2,6	4,8	3,7	0,1	0,0	70,5	237,3	9796,4	6372,6	5582,8	823,5	0,5	7,0
Rango	1,5	2,6	4,7	14,2	0,96	18,8	10,3	8,9	1,6	0,2	43,5	101,8	425,0	372,5	360,9	173,3	4,0	3,4
Mínimo	12,9	4,1	5,1	64,3	724,5	21,3	8,78	1,6	0,1	0,0	7,2	9,0	76,1	173,2	190,6	114,2	14,1	68,4
Máximo	14,4	6,7	8,6	78,6		40,1	98,1	10,4	1,7	0,2	50,6	102,3	501,1	545,7	551,5	287,5	18,1	71,8
N° Datos	135,0	135,0	135,0	135,0	134,0	135,0	134,0	134,0	134,0	134,0	134,0	134,0	134,0	134,0	134,0	134,0	134,0	134,0
R/DS	3,9	4,3	4,1	4,8	5,2	0'9	4,7	4,6	5,3	4,2	5,2	9'9	4,3	4,7	4,8	0'9	2,6	4,0

Los métodos presentaron un rango de 2,74 para R/DE, los mayores valores de este cociente fueron obtenidos para las variables P100, fracciones +1,4 mm, viscosidad 72,5°C, y TPICO, con valores entre 5 y 6, el resto de los índices estuvieron enmarcados entre valores de 4 y 5 salvo la temperatura de empaste la cual obtuvo el valor más bajo de 3,96. Las valores de DE, DE/R obtenidos resultaron superiores a los encontrados por Tran, et al. (1981) y Pomeranz et al. (1984) en un estudio donde incluían germoplasma de maíces cerosos, dentados y duros. Estos autores también destacaron que existe diferencias de sensibilidad en los métodos dentro de los tipos de maíces por lo que el índice R/DE y los rangos de los diferentes métodos de dureza tienden a reducirse de los maíces dentado a los maíces duros, en nuestro estudio sólo empleamos germoplasma basado en líneas duras, sin embargo fue posible establecer la sensibilidad de los métodos de ensayos probados.

## Correlaciones entre los métodos de dureza de grano

Todas las variables evaluadas en el estudio presentaron niveles de correlación positiva y negativa a diferentes niveles de significación (Cuadro 4).

El contenido de grasa de los maíces evaluados presentaron bajos niveles de correlación con las variables de dureza del grano empleadas, incluyendo las variables de viscosidad. Los fabricantes del equipo RVA indican que los lípidos presentes en las soluciones pueden reducir la resistencia de la tensión cizallamiento de la dispersión de almidón y reducir la viscosidad (Newport Scientific, 1998) los cuales podrían afectar la expresión de la dureza por viscoamilografía, sin embargo la baja correlación de la grasa con las viscosidades podría ser atribuida a los bajos niveles de grasa en comparación con los altos niveles de almidón presente en el grano.

Los niveles de proteína no evidenciaron asociaciones importantes con las variables de dureza de grano, pese a que diversos trabajos han demostrado las estrechas relaciones entre el contenido de proteínas y la dureza de grano (Dombrink-Kurtzman y Bietz, 1993; Abdelrahman y Hoseney, 1984). Esto puede ser atribuido a que los estudios anteriores se han llevado a cabo en países de clima templado con maíces cerosos, duros y dentados todos estos tipos resultan igualmente importantes para su procesamiento y consumo, y exhiben un amplio rango de dureza. En nuestro estudio solo se emplearon maíces de tipo duro, que son los mayormente producidos y aceptados en Venezuela. Por otra parte, las

Cuadro 4. Correlaciones de las diferentes variables de dureza de grano

Variable	Grasa	Proteínas	Rend.	Peso	Peso de		_	Malla (%)						RVA			
	(%)	(%)	Endos.	espec.	100							Visco	Viscosidad (RVU)	VU)		Tiempo	liempo Temp. de
			(%)	(g/L)	granos	3,35	2 mm 1,4 mm	1,4 mm	-1,4	Grueso	72,5°C	Grueso 72,5°C 74,75°C 77,0°C	77,0°C	Pico	Final	del Pico empaste	empaste
					(g)	mm			mm	/Fino						(min)	(၁၀)
Humedad (%)	-0,049ns	0,10ns	-0,17**	-0,39**	-0,46**	-0,11**	0,10**		0,18**		0,05**	0,14**	0,15**	0,11**	0,00ns	-0,29ns	0,00ns
Grasa (%)		-0,05ns	0,05ns	0,11ns	-0,01ns	0,10ns -	-0,11ns		0,00ns			0,01ns	-0,01ns	-0,02ns	-0,01ns	-0,05ns	-0,13ns
Proteínas (%)			-0,04ns	-0,09ns		0,02ns -	0,02ns		0,05ns			0,08ns	0,11ns	0,09ns		-0,21**	0,05ns
Rend. Endos. (%)				0,52*		0,81**	-0,80**	-0,76**	-0,33**		-0,67**	-0,86**	-0,78**	-0,76**		0,64**	0,37**
Peso específico					0,35**	0,38**	-0,37**	-0,38**	-0,40**		-0,26**	-0,48**	-0,52**	-0,45**	-0,37**	0,50**	-0,00ns
Peso de 100 (g)						0,03ns	-0,04ns	0,06ns	-0,16ns	-0,11ns	-0,17**	-0,19**	-0,16ns	-0,11ns	0,07ns	0,32**	-0,09ns
Malla (%) 3,35 mm							**66'0-	-0,92**	-0,31**		-0,61**	-0,73**	-0,63**	-0,62**	-0,61**	0,44**	0,41**
2 mm								0,89**	0,27**	-0,88**	0,62**	0,73**	0,63**		0,60**	-0,44**	-0,42**
1,4 mm									0,38**		0,55**	0,64**	0,57**		0,56**	-0,42**	-0,35**
-1,4 mm										-0,29**	0,16ns	0,35**	0,41**	0,36**	0,34**	-0,34**	0,05ns
/Grueso											-0,47**	-0,63**	-0,61**	-0,60**	-0,60**	0,40**	0,39**
Fino																	
RVA Visc. 72,5°C												0,80**	0,60**		0,51**	-0,54**	-0,49**
(RVU) 74,75°C													0,89**	0,85**	0,75**	-0,75**	-0,40**
77,0°C														0,98**	0,86**	-0,65**	-0,20**
Pico															0,86**	-0,55**	-0,18ns
Final	.=															-0,37**	-0,26**
Tiempo del																	0,20**
Pico (min)																	

\*\* Significativo a nivel de P<0,01 \* Significativo a nivel de P<0,05 ns No significativo

condiciones variables del clima tropical, podrían afectar modo en que estas son sintetizadas estructuralmente en el endospermo. Al respecto, estudios realizados en otros cereales como arroz, por O'Brien *et al.* (1985), para determinar la causa probable del aspecto opaco o traslúcido del endospermo de los granos, evaluados en diferentes estados de maduración, encontraron que los precursores de la síntesis del almidón como las sacarosa están presente en iguales cantidades tanto en los granos opacos como en los granos traslúcidos, en tal sentido las diferencias en el aspecto del grano pueden estar asociadas, a la sensibilidad del conjunto de eventos bioquímicos responsable de conferir la estructura del grano durante la biosíntesis del endospermo, más que en los componentes químicos del grano.

El RE estuvo asociado significativamente con la todas las variables de dureza de forma positiva y negativa, salvo, grasa, proteína, M-1,4 mm y TPAS. Los altos valores de RE estuvieron asociados altos niveles de PE, Malla 3,35 mm, G/F, tiempo pico y bajos de malla 2 y 1,4 mm y todos los niveles de viscosidad probados. Los más altos niveles de correlación del RE fueron alcanzados para las retenciones en las mallas 3,35mm y 2 mm y para los cambios de viscosidad de 72,5°C a 74,75°C esto explica que a medida que aumenta el RE aumenta la producción de partículas gruesas y disminuye las pequeñas, por otra parte, se reduce la capacidad de hinchamiento de los gránulos de almidón y en consecuencia disminuye su viscosidad, conforme a lo señalado por Almeida-Dominguez et al. (1997).

Los niveles de PE y P100 presentaron baja correlación entre ellos y con el resto de las variables de dureza de grano. Los máximos de valores de correlación para estas variables fueron obtenidos para el contenido de humedad, pese a los bajos rangos de humedad entre las muestras ensayadas. Otras correlaciones observadas fueron PE y viscosidad a los 77,00°C y PE y tiempo pico (TPICO), alcanzando un valores de 0,52 y 0,50, respectivamente; mientras que P100 alcanzó una correlación máxima positiva de apenas 0,40 con las partículas de endospermo que pasaron la malla 1,4 mm. Pese a que estas variables son rápidas y de fácil aplicación, los datos de correlación no presentaron niveles de asociación esperados tal como los encontrados por Pomeranz, *et al.* (1984), Almeida-Dominguez *et al.* (1997). Esto se debe, conforme a lo descrito por Taylor y Gyebi (2009) y Grains Council U.S. (2000), que el PE y P100 puede ser afectadas no sólo por la relación de endospermo duro y harinosos, también, a los cambios de humedad, forma y tamaño del grano. Los resultados encontrados indican que el P100 y PE generalmente no tienen

asociación con la susceptibilidad a la ruptura como el resto de las variables de dureza consideradas en el estudio.

La mayoría de las variables de granulometría presentaron correlaciones importantes salvo las partículas del fondo (-1,4mm). Los mayores niveles de correlación fueron alcanzados por las partículas >3,35mm la cual estuvo asociada positivamente al RE, y negativamente a las partículas de >2mm y a las diferentes viscosidades. Se obtuvieron bajos niveles de asociación con el PE, P100, TPICO y VFIN. Estos resultados indican que la alta proporción de partículas de endospermo de mayor tamaño (+3,35mm) esta asociada a altos RE y baja retención malla 2mm y bajos valores de las viscosidades del perfil amilográfico, estos resultados son similares a los obtenidos por Gonzales *et al.* (2005) y Almeida-Dominguez *et al.* (1997) al estudiar las variables de dureza de grano incluyendo las propiedades de hidratación cocción en diferentes maíces.

En amilografía todas las viscosidades estuvieron asociadas positivamente, los TPICO y TPAS presentaron los menores niveles de correlación de con el resto de las variables de dureza y a su vez estuvieron asociados negativamente a todas las viscosidades del perfil amilográfico. Como ya fue mencionada las viscosidades a diferentes temperaturas fueron asociadas de manera importante con el RE y la granulometría del endospermo.

# Regresiones lineales de las variables de dureza de grano frente al rendimiento de endospermo

Debido a que el RE representa uno de los análisis más utilizados para estimar el rendimiento de harinas por los programas de mejoramiento genéticos nacionales, pero a su vez este resulta laborioso y de alta demanda de tiempo (4 horas), se realizó la evaluación de algunas variables de dureza debido a su asociación con el RE. Se emplearon para ello modelos de regresión lineal que son presentados en el Cuadro 5 y 6.

El PE presentó una dependencia significativa con el RE, sin embargo el modelo de regresión simple presentó un bajo ajuste. El P100 presentó un ajuste aún más bajo que el PE y no resultó significativo, las pendientes de ambos modelos fueron las menos pronunciadas de todas las regresiones estudiadas. Los bajos niveles de ajustes encontrados pueden ser atribuidos a que valores inferiores de 790 g/L de PE y menores de 31 g de P100 devuelven una mayor dispersión del RE, por ello se evidenció que grandes cambios en las variables PE y P100 no se correspondieron a diferencias del RE.

Cuadro 5. Regresiones del rendimiento de endospermo con relación a diferentes variables de dureza de grano

Variable	Diagrama de dispersión	Modelo de	Significación	Ajuste
		predicción del	del modelo	(R <sup>2</sup> )
		rendimiento de		
		endospermo		
		(RE)		
Peso	78-	RE = 7,529 + 0,085	<0,0001	0,270
específico (PE)	76 - 770 70 70 70 70 70 70 80 80 820 830 pesp	x PE		
Peso de 100	80-	RE = 69,849 +	0,1253	0,017
(P100)	78 - 76 - 76 - 774 - 775 - 70 - 70 - 70 - 70 - 70 - 70 - 7	0,126 x P100	,	,
Malla 3,35	80-	RE = -30,715 +	<,0001	0,660
mm (SEI)	78 - 76 - 76 - 774 - 775 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770 - 770	1,102 x SEI	ζ,0001	0,000
Malla 2 mm	80	RE = 79,337 -	<,0001	0,651
(DIE)	78 76 74 87 70 68 66 64 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 die	1,255 x DIE	,,,,,,	-,
Malla +1,4	80 78	RE = 78,825 -	<0,0001	0,582
mm (CAT)	76- 274- 80 72- 90 70- 68- 66- 64- 0 0.2 0.4 0.6 0.8 1 1.2 1.4 1.6 1.8 cat	7,663 x CAT		
Grueso/finos (G/F)	80 78- 76- 274- 8772- 8770- 68- 66- 64- 10 20 30 40 50	RE = 68,140 + 0,263 x G/F	<0,0001	0,551

Cuadro 6. Regresiones del rendimiento de endospermo con relación a diferentes variables de viscoamilografía

Variable	Diagrama de dispersión	Modelo de	Significación	Ajuste
		predicción del	del modelo	(R <sup>2</sup> )
		rendimiento de		
		endospermo		
		(RE)		
Viscosidad	80 78 – ; ; ;	RE = 76,065 -	<0,0001	0,458
a 72,5°C	76- 274-	0,131 x V11		
(V11)	0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 Visc 11			
Viscosidad	80	RE = 79,085 -	<0,0001	0,750
a 74,75°C	78- 76-	0,026 x V13		
(V13)	0 74- 00 972- 00 70- 68- 66- 64- 100 200 300 400 500			
Viscosidad	80 - 78 -	RE = 84,031 -	<0,0001	0,620
a 77,0°C	76-	0,029 x V15		
(V15)	0 74- 0 70- 0 70- 0 8- 0 6- 0 6- 0 6- 0 6- 0 70- 0 70-			
Viscosidad	80 78	RE = 84,805 -	<0,0001	0,580
Pico	76- g 74-	0,030 x VP		
(VPICO)	0. 74- 0. 70- 0. 70- 0. 70- 0. 88- 0. 68- 0. 68- 0. 68- 0. 68- 0. 68- 0. 000 250 300 350 400 450 500 550 600 Viscosidad pico			
Viscosidad	80 78	RE = 87,186 -	<0,0001	0,448
final (VFIN)	76- 274- 200 72- 870- 68- 66- 64- 100 200 300 Viscosidad final	0,069 x VF		
Tiempo de	80	RE = 31,23 +	<0,0001	0,414
pico	76- g 74-	2,671 x TPIC		
(TPICO)	0. 74- 0. 70- 0.			

Probablemente esto es más evidente dentro de un rango de dureza más reducido sobre todo dentro de los maíces de tipo duro.

Para las variables Malla 3,35 mm y 2 mm los modelos resultaron significativos (P<0,01) y con un ajuste de 65 y 66% respectivamente (Cuadro 5). Las pendientes resultaron igual de pronunciadas y en diferentes sentidos. Cuando la proporción de de partículas retenidas en la malla 3,35 mm fueron del 95% al 98% los maíces superaron el 71% de RE cuando esta proporción se redujo al 91% el RE fue inferior de 71%, también se encontró una zona entre 91 y 95% donde se observaron maíces en un rango de RE de 68% y 76%, esta zona resulta limitada para establecer algún tipo de predicción del RE.

En cuanto a la proporción de partículas retenidas de malla 2 mm, se encontró que los maíces con niveles inferiores de 4% presentaron RE mayores de 72%, cuando estas mismas partículas alcanzaron valores mayores o iguales a 7% los valores de RE resultaron inferiores a 71%. En cuanto a la región definida por las proporciones de retención entre 4,5% y 7% los granos presentaron RE entre 68 y 78%. De los resultados anteriores se puede decir que la retención de partículas de mayores tamaños permitió discriminar bajos (RE<70%) o altos (RE iguales o mayores a 70%) niveles de RE, en consecuencia se esperaría la definición del potencial industrial de los maíces.

Las partículas más pequeñas (malla 1,4 mm) presentaron un modelo de regresión significativa pero con un menor ajuste al encontrado en las mallas de 3,35 mm y 2 mm para la estimación del RE. Lo anterior puede ser atribuido a los bajos niveles de partículas pequeñas presentes incrementa los errores debidos a variaciones por manipulación lo que pudiera resultar en falta de ajuste en las predicción del RE. La relación grueso/fino (G/F) presentó un modelo de regresión significativo, pero alcanzó el ajuste más bajo de todas las variables de granulometría, esto es indicativo que la interpretación del RE mediante la razón G/F no fue satisfactoria ni aún para tamizar los maíces de alta dureza (RE>70%) dentro el rango de maíces probados.

Los niveles de viscosidad durante el empaste del almidón presentaron modelos de regresión significativos (Cuadro 6), el ajuste fue mejorando con el aumento de la temperatura hasta 74,75°C donde alcanzó el mejor ajuste para la predicción RE, luego este valor fue disminuyendo para alcanzar un ajuste inferior en la VFIN. A los 72,5°C las viscosidades inferiores a los 30 RVU presentaron niveles variables de RE entre 68-78,5%

sin ningún comportamiento predictivo y la mayor parte de los datos estuvieron enmarcados en esta región. A partir de las viscosidades mayores de 30 RVU a 72,5°C se observaron reducciones marcadas del RE, pero sólo se observó un reducido número de datos.

A los 74,75°C la pendiente de la regresión indica que por cada cambio en de viscosidad en unidades de RVU produce una reducción de 0,026% del RE con una bondad de ajuste del 75%, alcanzando el mayor ajuste de todas las variables de dureza empleadas para la predicción del RE. El diagrama de dispersión indica que a 74,75°C los maíces que alcanzan viscosidades más altas los puntos tienden alejarse más de la recta de regresión. Por otra parte, se evidenció que las viscosidades inferiores a 200 RVU presentaron maíces con niveles adecuados para la industria nacional (RE>70%), mientras que aquellos maíces con viscosidades a los 74,75°C mayores a 200 RVU e inferiores a 350 RVU la prueba no es tan concluyente para la predicción del RE. Esto se atribuye a lo reiterado anteriormente donde los maíces del presente estudio estuvieron enmarcados dentro de un rango reducido de RE típico para el germoplasma de tipo duro. El ajuste mejorado con las viscosidades se explica según Almeida-Dominguez *et al.* (1997) por que los maíces más duros presentan menor capacidad de absorción de agua con el aumento de temperatura durante el período de empaste.

El TPICO obtuvo una significación estadística importante para explicar los cambios de RE, a medida que el tiempo para alcanzar el pico se prolongaba estos fueron acompañados de incrementos importantes del RE, sin embargo el ajuste fue muy bajo.

En el presente estudio a diferencia de otros autores se consideraron variables como las viscosidades a diferentes temperaturas de empaste, además de las viscosidades comúnmente evaluadas en los perfiles amilográficos, las cuales explicaron mejor los cambios de RE. Como los perfiles amilográficos fueron realizados en términos de tiempo relativamente cortos y usando solo una pequeña cantidad de muestra (20 g), resultaría un método promisorio emplear la viscosidad a los 74,75°C para predecir el RE en muestras, incluso a nivel de plantas individuales. Los métodos que emplean poco tamaño de muestra adquieren importancia durante las etapas tempranas de mejoramiento genético ya que durante el proceso de desarrollo y selección de líneas puras de maíz, se realizan evaluaciones de un gran número de plantas individuales, donde la cantidad de grano es limitada y parte ella debe ser reutilizada como semilla para desarrollar nuevas líneas

(progenies). Con la aplicación de ensayos de dureza a este nivel, es posible realizar el tamizado de un gran número de muestras acelerando el avance de la selección e incrementando la efectividad. Considerando los perfiles amilográfico como un ensayo promisorio de dureza, se podría seleccionar los maíces con alto potencial de RE en aquellos que alcancen viscosidades inferiores a los 200 RVU a los 74,75°C, mientras que para aquellos maíces con RVU>200 es recomendable realizar la determinación complementaria del RE.

## Efectos del genotipo y el ambiente sobre las variables de dureza de grano

En el Cuadro 7 se presentan la significación de los cuadrados medios de las variables asociadas a la dureza de grano considerando las fuentes de variación genotipo (G), ambiente (A) y su interacción (GxA). Se evidenció que la significación de las fuentes de variación probadas fue específica conforme a la variable.

El RE presentó diferencias altamente significativas (P<0,01) por los efectos genotipo, ambientes y la interacción GxA, indicando que los genotipos se comportan de forma diferente a través de las localidades para la expresión del RE. La distribución de los promedios de RE por genotipo en las diferentes localidades (Figura 14), revela que la contribución de la interacción puede ser atribuible los cambios de RE de los genotipos entre las Localidades de El Sombrero (Guárico) y San Javier (Yaracuy), ya que Turén (Portuguesa) generalmente estuvo asociado a bajos RE en la mayor parte de los genotipos.

Cuadro 7. Significación de los cuadrados medios de las variables físicas asociadas a la dureza de granos en genotipos de maíz cultivados en Venezuela

Fuente	Grados	Rendimiento	Peso	Peso de	Malla (%)							
de	de	de	específico	100 (g)								
Variación	libertad	endospermo	(g/L)		+3,35	+2 mm	+1,4 mm	-1,4 mm	Grueso/Fino			
		(%)			mm							
Ambiente	2	243,891**	6796,3**	261,92**	116,131**	915,994**	141,913**	0,00122ns	1293,87**			
Genotipo	22	202,596**	560,819**	176,004**	993,395**	718,079**	0,211**	0,00084*	196,198**			
Genotipo												
х	44	373,095**	164,289ns	363,723ns	264,637**	197,034**	0,0648**	0,00041*	251,121ns			
Ambiente												
Error	65	183,105	189,300	319,833	108,436	0,859	0,022	0,000261	197,134			
C. Total	134											

<sup>\*\*</sup> Significativo a nivel de P<0,01

<sup>\*</sup> Significativo a nivel de P<0,05

ns No significativo

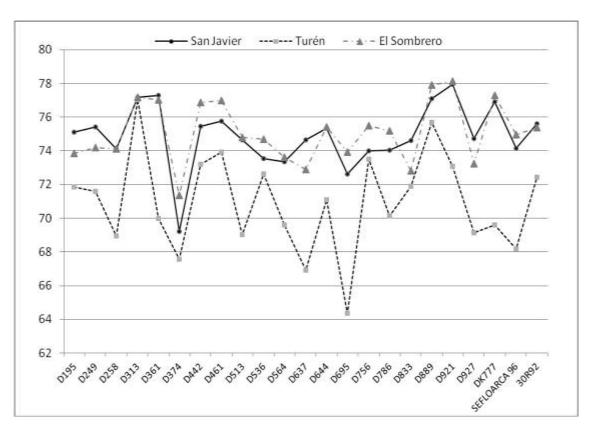


Figura 14. Promedios de rendimiento de endospermo (%) en genotipos de maíces cultivados en tres ambientes

Se observó que los genotipos D313 y D889 presentaron RE superiores al 75% y esta respuesta se mantuvo en los diferentes ambientes, por lo que se consideran maíces potenciales para el procesamiento industrial mediante molienda seca. Los genotipos experimentales D258, D361, D513, D564, D637, D695, D927 y los testigos DK777 y SEFLOARCA 96, alcanzaron niveles aceptables de RE para los ambientes de El Sombrero y San Javier, sin embargo no alcanzaron los niveles mínimos de dureza (70%) recomendados para su procesamiento industrial cuando fueron cultivados en Turén; mientras que los genotipos D195, D249, D442, D461, D536, D756, D833, D921 y el testigo comercial 30R92, presentaron un RE en un rango comprendido entre 72 y 78% igualmente aceptable para la industria de harinas aunque con un nivel de estabilidad intermedio a través de los ambientes. El genotipo D374 siempre estuvo asociado a menores RE en todos los ambientes.

Los niveles de PE fueron afectados significativamente por el genotipo y el ambiente, sin embargo no se encontraron efectos importantes debidos a la interacción GxA (Cuadro 7). La comparación de medias por genotipos indica el establecimiento de dos grupos homogéneos para el PE (Cuadro 8), donde los genotipos D361 y 30R92 presentaron los

mayores niveles de PE, mientras que el genotipo D927 se ubicó en un grupo estadísticamente inferior y presentó el menor promedio de todos los maíces evaluados. Los testigos comerciales probados estuvieron asociados al grupo con promedios estadísticamente superiores, el resto de los genotipos presentaron promedios de PE indistinguibles. Al evaluar los ambientes se encontró que las tres zonas bajo estudio resultaron significativamente diferentes en la expresión del PE donde los mayores y menores valores fueron alcanzados por El Sombrero y Turén, respectivamente. Esto indica que el ensayo de PE resultó más adecuado para diferenciar la dureza entre ambientes y menos sensible para establecer diferencias entre genotipos.

Los promedios de todos los genotipos y ambientes resultaron superiores de 760 g/l que define el máximo nivel de tipificación (Clase I) conforme a la norma venezolana de maíz para uso industrial (COVENIN, 1987), Los genotipos D637, D695, D786, D833 y D927, y así como el promedio de la localidad de Turén presentaron PE inferiores a los maíces cultivados en USA durante el año 2005 (772,40 g/l) (Grains Council U.S., 2006), esto indica que a pesar de ser genotipos de tipos duros estos pueden alcanzar valores de PE similares a las fuentes dentadas comúnmente sembradas en las zonas templadas. Los maíces con PE mayores a 60 lb/bushel (750 g/L), brindan más trozos de maíz para la molienda seca, y mayor consistencia para la cocción en la elaboración de "masa", mientras que los PE de 56 lb/bushel (722,9 g/l) son recomendados para la molienda húmeda. Si los granos son demasiado duros, la maceración es deficiente limitando la extracción de almidón y además los tangues de maceración poseen un volumen determinado (Grains Council U.S., 2006). Lo anterior indica que algunos de los genotipos evaluados podrían ser destinados alternativamente para la extracción de almidones por molienda humedad ya que en Venezuela también existen algunas industrias de extracción de gluten y almidón de maíz.

El P100 presentó diferencias estadísticas para los efectos genotipos, ambientes e interacción GxA, indicando que la respuesta de esta variable depende de la combinación de las fuentes de variación consideradas en el estudio (Cuadro 7). Las medias del P100 por genotipo revelaron la formación de 5 grupos homogéneos, donde los mayores promedios fueron alcanzados por los genotipos D195, D249, D461, D513, D564, D644, D695, D756, D833, D889 y el testigo DK777, los otros genotipos se distribuyeron en los cuatro grupos homogéneos restantes, donde los testigos comerciales 30R92 y

SEFLOARCA 96 estuvieron asociados a los grupos estadísticamente inferiores (Cuadro 8).

En la comparación de medias por ambiente se encontró el establecimiento de dos grupos homogéneos los cuales fueron definidos por la presencia de niveles estadísticamente superiores del P100 en El Sombrero (Cuadro 8). Los genotipos evaluados en este estudio presentaron un menor rango de P100 a los encontrados por Pomeranz *et al.* (1984), al evaluar maíces cultivados en EE. UU., estos autores encontraron un rango equivalente a 22,1-36,6 g y se atribuye a la diversidad de usos de maíz para esas latitudes; De acuerdo a los descrito por Grains Council U.S., (2000), típicamente el P100 oscila entre 24 y 39 gramos; los valores más altos indican granos de mayor tamaño y a menudo brindan mayores rendimientos de endospermo en la molienda en la molienda seca. En nuestro estudio encontramos que este planteamiento es consistente con los ambientes evaluados y no así para los genotipos, ya que genotipos como el D313 de mayores RE y PE presentó los menores promedios de P100. Lo anterior puede ser debido a las diferencias en tamaños del grano, en tal sentido para poder establecer el P100 como un indicador indirecto de la dureza es importante considerar su forma y tamaño.

La granulometría del endospermo se llevó a cabo mediante el efecto tangencial del molino McGill Nº2 el cual afecto de manera específica el endospermo de los diferentes maíces y se evidencia mediante las proporciones retenidas de los tamices considerados en el presente estudio. Se encontró que las diferentes fracciones te endospermo presentaron diferencias estadísticas para los efectos genotipos, ambientes, salvo malla -1,4mm, y la interacción GxA esto revela que los genotipos responden de un modo distinto a través de los ambientes para las diferentes proporciones de tamaño de partícula (Cuadro 7).

Los promedios de partículas 3,35 mm presentaron los mayores niveles de retención de partículas de todas las mallas probadas ya que siempre superaron el 87% (Figura 15). La presencia de la interacción GxA significativa se atribuye mayormente a las oscilaciones encontradas entre San Javier y El Sombrero, ya que Turén generalmente estuvo asociado a los promedios más bajos de malla 3,35mm. Para este tamaño de partícula todos los maíces comerciales se vieron notoriamente reducidos en Turén y en mayor grado los genotipos DK777 y SEFLOARCA 96. Los genotipos D313 y D889 presentaron una respuesta estable a través de los ambientes y con promedios superiores, seguido de

D536 este último alcanzó una respuesta igualmente estable aunque con promedios un poco inferiores de partículas >3,35 mm.

Cuadro 8. Comparación de medias para variables asociadas a la dureza de granos

Fuente	Medias <sup>1</sup>									
	Peso específic	СО	Peso de 100 gr	ranos	Grueso /fino					
Genotipo	(g/L)		(g)							
D195	776,9 A B		33,1 A B C		21,1 B C D E F					
D249	779,5 A B		31,1 A B C I	DE	16,9 D E F					
D258	781,8 A B		29,7 B C I	DE	20,8 C D E F					
D313	791,7 A B		27,3	Е	39,6 A					
D361	793,3 A		30,3 B C I	DE	17,2 D E F					
D374	763 A B		29 C I	DE	17,6 C D E F					
D442	783,2 A B		29,2 C I	DE	22,7 B C D E					
D461	782 A B		34,7 A		22,5 B C D E					
D513	780,9 A B		33,8 A B		17 C D E F					
D536	772,3 A B		30,4 B C I	DE	17,1 D E F					
D564	774,4 A B		30,9 A B C I	DE	19,4 C D E F					
D637	764,8 A B		30,5 B C I	DE	12,6 F					
D644	778,2 A B		32,5 A B C I	D	22,1 B C D E F					
D695	771,6 A B		31,9 A B C I	D	21,6 B C D E F					
D756	777,3 A B		31,5 A B C I	D	21,5 B C D E F					
D786	765,8 A B		29,3 C I	DE	18,3 C D E F					
D833	769,4 A B		32,2 A B C I	D	24,5 B C D					
D889	792,4 A B		31 A B C I	DE	30,7 A B					
D921	784 A B		28,9 I	DE	27,1 B C					
D927	761,4 B		29,9 B C I	DE	13,3 E F					
DK777	770,4 A B		30,9 A B C I	DE	22,9 B C D E					
30R92	794,9 A		29,4 C I	DE	23,4 B C D					
SEFLOARCA	786,4 A B		28,9 I	DE	17,7 C D E F					
96										
Ambiente										
El Sombrero	790,9 A		33,5 A		22,6 B					
San Javier	775,9 B		29,1 B		25,9 A					
Turén	767,3	С	29,5 B		15,1 C					

<sup>1</sup> Letras diferentes indican diferencias a nivel de P<0,05

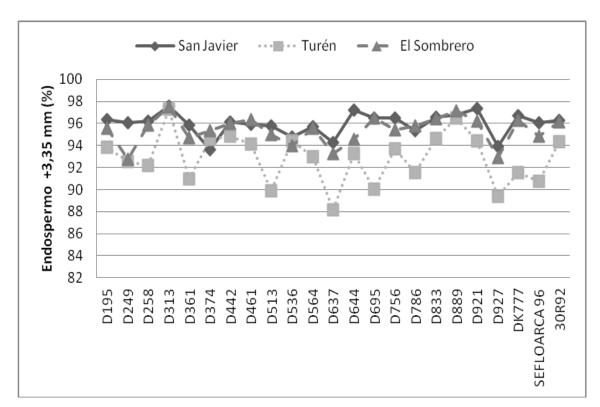


Figura 15. Promedios de partícula de endospermo +3,35 mm en genotipos de maíces cultivados en tres ambientes

Los genotipos D195, D374, D442, D461, D564, D644, D756, D833 y 30R92, presentaron una mayores diferencias entre ambientes pero con promedios igualmente altos de gran tamaño (3,35mm), el resto de los genotipos presentaron las mayores diferencias lo cual le confiere menor estabilidad en la respuesta y mayormente atribuido al efecto negativo de Turén (Figura 15).

Los promedios de partículas de endospermo malla 2 mm, presentaron un comportamiento completamente inverso a las retenidas sobre la malla 3,35 mm (Figura 16). Para esta malla Turén estuvo asociado a los mayores promedios frente a El Sombrero y San Javier. El genotipo comercial 30R92 presentó los menores niveles de retención para malla 2 mm aunque Turén igualmente estuvo asociado a los promedios más altos. Los genotipos experimentales D313 y D889 presentaron promedios bajos y similares de las partículas malla 2 mm a través de los ambientes probados. D258, D361, D513, D637, D695, D786, D927 y SEFLOARCA 96 presentaron las diferencias marcadas entre localidades, atribuida principalmente a los altos niveles alcanzados en Turén, el resto de los genotipos presentaron diferencias modestas entre localidades y generalmente asociados a promedios bajos de malla 2 mm.

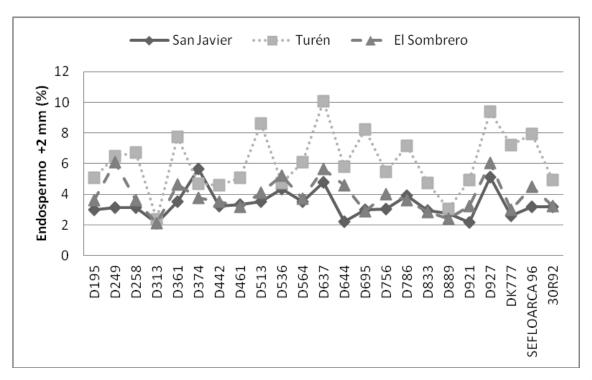


Figura 16. Promedios de partícula de endospermo +2 mm en genotipos de maíces cultivados en tres ambientes

Las partículas malla 1,4 mm al igual que en malla 2 mm, presentaron generalmente mayores promedios en Turén, aunque los promedios de retención en esta malla es muy reducida frente a la malla 3,35 y 2 mm con apenas un máximo cercano al 1,8% del la fracción total del endospermo (Figura 17). Los genotipos D313, D374, D442, D461, D536, D564, D756, D833, D889 y D921 presentaron una respuesta baja y estable a través de las localidades que puede ser atribuido a los bajos niveles de partículas de tamaño reducido, el resto de los genotipos presentaron variaciones debidas los altos promedios de partículas pequeñas encontrados en Turén.

Las partículas de menor tamaño (-1,4 mm) presentaron lo menores niveles de retención de todas las mallas probadas y sin ningún comportamiento específico a través de las localidades (Figura 18), esto puede ser atribuido, en gran medida, al efecto abrasivo del molino que devuelve una respuesta similar para la producción de las partículas más pequeñas.

Las partículas que no son retenidas en las mallas de mayor abertura pasan a los siguientes tamices de menor tamaño, cuando esto ocurre se evidencian incrementos de partículas de menor tamaño como resultado de un mayor fraccionamiento del endospermo. Como la partícula más grande tiene mayor peso, a medida que el tamaño de

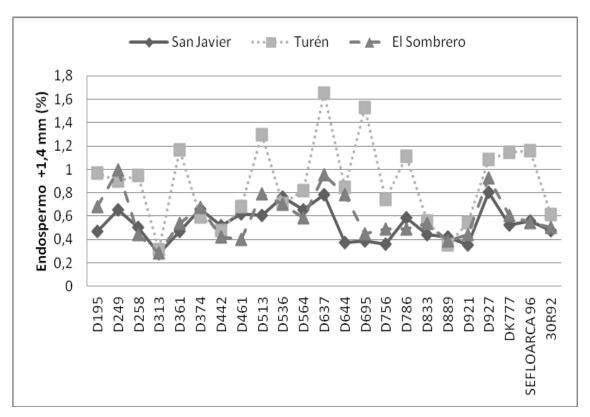


Figura 17. Promedios de partícula de endospermo +1,4 mm en genotipos de maíces cultivados en tres ambientes

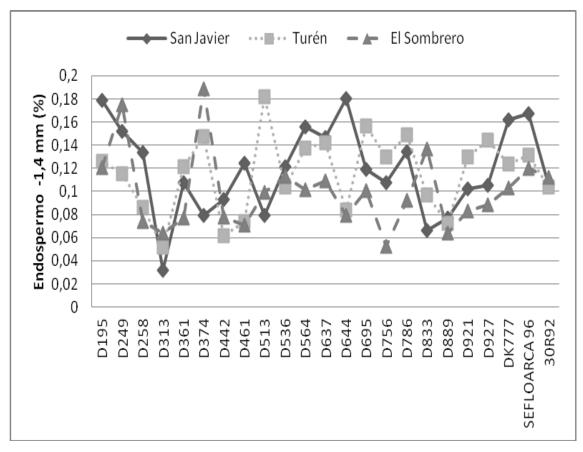


Figura 18. Promedios de partícula de endospermo -1,4 mm en genotipos de maíces cultivados en tres ambientes

partículas se redujo en los tamices probados también se redujo la proporción porcentual en peso de las partículas de endospermo, esta reducción fue mayor para las mallas 1,4 mm y -1,4 mm. Adicionalmente los promedios de estas malla más pequeñas reproducen un aumento de la estabilidad de genotipos a través de las localidades. Estos resultados indican que mallas como la 3,35 mm y la 2 mm permiten establecer diferencias de fraccionamiento que están asociadas a la diferencias de dureza endospérmica resultando en una mayor sensibilidad para establecer diferencias del potencial de rendimiento industrial entre genotipos y entre ambientes.

La relación grueso/fino (G/F) de las partículas de endospermo se vio significativamente afectada por los genotipos, los ambientes, pero no por la interacción GxA (Cuadro 7). La comparación de medias por genotipo indica la formación de seis grupos homogéneos, establecidos por las diferencias marcadas de G/F (Cuadro 8). Al evaluar los testigos comerciales se encontró que ninguno de sus promedios de G/F formó parte de los grupos estadísticamente superiores ubicándose en los grupos de promedios intermedios de G/F. Sin embargo, DK777 y resultaron estadísticamente superiores a SEFLOARCA 96. Los genotipos experimentales D313 y D889 presentaron formaron parte del grupo estadísticamente superior ya que presentaron la mayor relación de partículas de gran tamaño y dichos genotipos también estuvieron asociados a los mayores niveles de RE y PE. Los genotipos D637 y D927 estuvieron asociados a los grupos estadísticamente inferiores debido a una menor proporción de partículas de gran tamaño frente al resto de los genotipos.

Los ambientes presentaron tres grupos homogéneos correspondientes a las tres localidades evaluadas, indicando que todas fueron estadísticamente diferentes en cuanto a la relación G/F. San Javier, estuvo asociado a los mayores promedios, mientras que Turén alcanzó los menores promedios de G/F. Diferencias significativas entre genotipos con diferentes niveles de dureza también han sido encontradas en maíces de EE. UU., conforme al estudio de Pomeranz et al. (1986). Eyhérabide et al. (2004), también estableció diferencias en maíces de tipos duros y dentados cultivados en diferentes zonas de producción en Argentina durante dos períodos 2002/2003 y 2003/2004, sin embargo en este estudio los ambientes no resultaron diferentes, pero si la interacción GxA. González et al. (2005), también evidenciaron diferencias estadísticas de la relación G/F entre genotipos de maíz y al respecto concluyeron que maíces de alta densidad y alta

relación grueso/fino están altamente asociadas y son indicativos de que el maíz será más duro.

Los resultados de los análisis de varianza de las variables amilográficas obtenidas mediante el Rapid Visco Analyser (RVA) se presentan en el Cuadro 9. Se encontraron diferencias significativas debido a los efectos genotipo, ambiente y la interacción GxA para la viscosidad del empaste a las temperaturas 72,50°C. 74,75°C, 77,00°C y la viscosidad final. Lo anterior indica que la respuesta de estas variables depende de la combinación específica de los genotipos en cada ambiente.

Cuadro 9. Significación de los cuadrados medios de las variables amilográficas de genotipos de maíz cultivados en Venezuela

Fuente	Grados	RVA											
de	de		Vis		Tiempo	Temp.de							
Variación	libertad	72,5°C	74,75°C	77°C Pico		Final	del Pico	empaste					
							(min)	(°C)					
Ambiente	2	6190,4**	283680**	75975,3**	46565,7**	7966,6**	123215**	10,0**					
Genotipo	22	306,3*	23002,7**	23208,1**	20741,1**	2589,1**	103081**	0,5ns					
Genotipo	44	171,7*	3879,3*	2424,8*	2366,0ns	507,6**	0,2ns	0,6ns					
X													
Ambiente													
Error	65	101,226	1738,03	1486,09	1614,01	251,76	0,20	0,59					

<sup>\*\*</sup> Significativo a nivel de P<0,01

VPICO y TPICO presentaron efectos importantes para los factores genotipo y ambientes; mientras que la temperatura de empaste resultó significativa sólo para el efecto ambiental. En general los niveles de viscosidad incrementaron con el aumento de temperatura hasta alcanzar el máximo pico atribuido mayormente al hinchamiento de los gránulos de almidón antes de su disrupción (Almeida-Dominguez *et al.*, 1997).

Los promedios de viscosidad a 72,50°C para los genotipos D313, D442 y D889 fueron bajos y presentaron la mayor estabilidad a través de las localidades (Figura 19). Los genotipos D195, D461, D536, D644, D833 fueron un poco menos estables entre ambientes pero igualmente bajos, el resto de los genotipos, incluyendo los testigos comerciales, presentaron mayores variaciones de este nivel de viscosidad debido, en gran

<sup>\*</sup> Significativo a nivel de P<0,05

ns No significativo

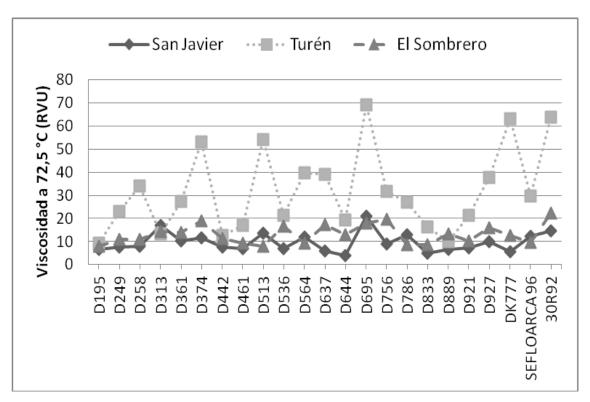


Figura 19. Promedios de viscosidad a 72,50°C del perfil amilográfico de genotipos de maíces cultivados en tres ambientes

medida, a la respuesta de viscosidad alcanzada en Turén. En general 17 de los 23 genotipos evaluados presentaron valores cercanos a 20 RVU para todas las localidades el resto presentaron niveles superiores de este valor.

Las viscosidades a los 74,50°C para los genotipos D313 y D889 fueron las menores y más estables entre localidades (Figura 20). Los genotipos D195, D442, D461, D536, D614, D756, D786, D833 y SEFLOARCA 96 presentaron pocas diferencias entre ambientes y los genotipos D374 y D695 altos niveles de viscosidad en todos los ambientes evaluados. Generalmente los genotipos presentaron una respuesta baja y similar de esta variable para San Javier y El Sombrero; mientras que en Turén los promedios de viscosidad a 74,50°C fueron superiores incluso para los testigos comerciales. A los 77°C las diferencias de los promedios de viscosidad son menores entre genotipos y entre ambientes (Figura 21), Turén continúa presentando generalmente los mayores promedios, en algunos genotipos la respuesta de esta localidad no muestra una diferencia marcada del resto de los ambientes. En viscosidad final los valores de viscosidad se reducen notoriamente así como las diferencias de los genotipos a través de los ambientes, sin embargo aún en esta variable Turén generalmente alcanza los mayores promedios (Figura 22).

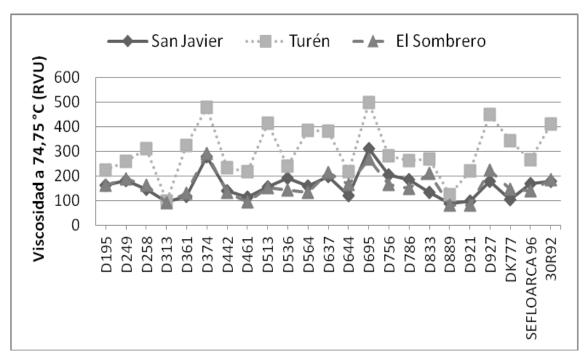


Figura 20. Promedios de viscosidad a 74,75°C del perfil amilográfico de genotipos de maíces cultivados en tres ambientes

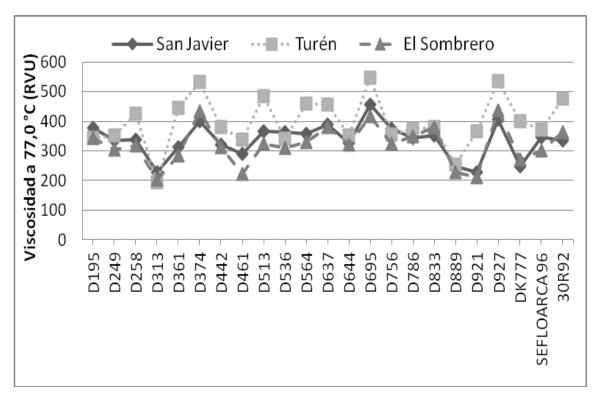


Figura 21. Promedios de viscosidad a 77,0°C del perfil amilográfico de genotipos de maíces cultivados en tres ambientes

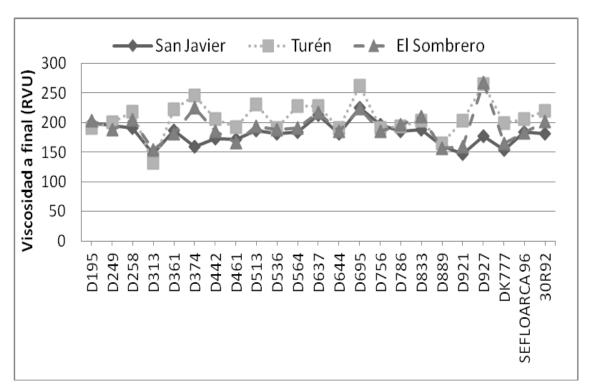


Figura 22. Promedios de viscosidad final del perfil amilográfico de genotipos de maíces cultivados en tres ambientes

Se encontró que las viscosidades a 77°C y final se redujeron con respecto a la 74,75°C, estas respuestas puede ser explicadas debido a que muchos gránulos de almidón de la mezcla ya han alcanzado su máximo poder de hinchamiento y colapsan por efecto de las altas temperaturas y agitación constante de la mezcla, en consecuencia la viscosidad se reduce.

Menores niveles de variación entre localidades y genotipos implican una menor capacidad para diferenciar niveles de dureza de grano. Los maíces de menor dureza generalmente estuvieron asociados a las mayores viscosidades, quizá estos maíces son fuentes potenciales de materia prima para proceso de molienda húmeda los cuales requieren un proceso de maceración en solución y probablemente faciliten la extracción de almidones por métodos químicos

Las diferencias de viscosidad encontradas entre genotipos para todas las localidades pueden ser atribuidas al poder de hinchamiento de cada material el cual también se ve diferenciado de acuerdo al ambiente. A medida que los genotipos tengan mayor grado de empacado de los gránulos y por ende mayor dureza, menor será la capacidad de absorber agua con el calentamiento y en consecuencia su viscosidad se verá reducida

(Almeida-Dominguez *et al.*, 1997). Adicionalmente, los maíces menos duros tienen una matriz proteica (de zeínas) que recubre los gránulos de almidón muy pequeña o inexistente esto favorece la aparición cavidades intergranulares ocupadas por aire los cuales son rápidamente desplazados por el agua de la dispersión cuando se calienta y potencia su capacidad y velocidad de hinchamiento y por ende su viscosidad (Crosbie y Ross 2007).

La comparación de medias por genotipo y por ambiente para las variables VPICO, TPICO y TPAS se presenta en el Cuadro 10. Los promedios de viscosidad pico por genotipo fueron enmarcados en ocho grupos homogéneos, donde D695, D927 y D374 presentaron valores significativamente superiores y D313, D889 y D921 presentaron los menores valores, mientras que los otros genotipos se distribuyeron en el resto de los grupos homogéneos.

Los maíces comerciales fueron indistinguibles estadísticamente para VPICO, sin embargo el genotipo 30R92 fue el único que formó parte del grupo de máximos promedios. En cuanto a la comparación de medias de VPICO entre ambientes se formaron dos grupos homogéneos atribuido a los valores significantemente superiores de Turén con respecto a los otros ambientes. Al igual que las viscosidades evaluadas a diferentes temperaturas, existen genotipos estrechamente vinculados a los máximos y mínimos valores de viscosidad, los cuales pueden ser debido al grado de empacado de los gránulos de almidón.

Para el tiempo pico los genotipos formaron cuatro grupos estadísticamente diferentes. Los genotipos D313, D461, D889 y D921 tardaron más en alcanzar el pico de viscosidad, los genotipos D374, D695 y el comercial 30R92 alcanzaron el pico de viscosidad en un menor tiempo. El resto de los genotipos se distribuyeron en los grupos intermedio donde 11 genotipos (incluyendo SLEFLOARCA 96) presentaron tiempos estadísticamente similares.

Los promedios entre ambientes, indican diferencias marcadas del tiempo pico en todos los ambientes siendo estos máximos en El Sombrero y mínimos en Turén. Las diferencias encontradas en el tiempo pico al igual que las viscosidades, pueden ser atribuidas a diferencias estructurales del grano ya que mientras mayor sea la compactación de los gránulos tendrán menor poder de hinchamiento y en consecuencia tardarán mayor tiempo

Cuadro 10. Comparación de medias de variables del perfil amilográfico de maíces cultivados en tres ambientes

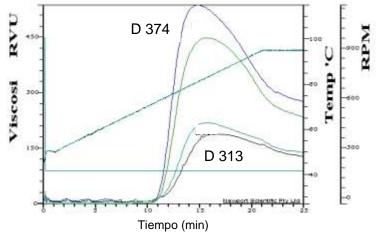
Fuente						
_	Viscosidad pico (RVU)	Tiempo Pico	Temperatura			
		(min)	de empaste			
Genotipo			(°C)			
D195	364,60 C D E F	15,80 A B C D	70,0 A			
D249	335,90 C D E F G	15,60 A B C D	69,6 A			
D258	377,40 B C D E F	16,10 A B C	69,4 A			
D313	233,20 H	16,60 A	69,5 A			
D361	368,30 C D E F	16,20 A B C	69,1 A			
D374	471,10 A B	15,00 D 6	69,4 A			
D442	352,20 C D E F G	16,00 A B C D	69,5 A			
D461	312,60 E F G H	16,60 A B	88,9 A			
D513	408,30 A B C D	15,90 A B C D 6	69,4 A			
D536	349,30 C D E F G	15,90 A B C D 6	69,4 A			
D564	393,40 A B C D E	15,60 B C D 6	69,9 A			
D637	418,50 A B C	15,60 B C D 6	69,8 A			
D644	346,80 C D E F G	16,00 A B C D	69,5 A			
D695	477,60 A	15,00 D 6	69,0 A			
D756	363,60 C D E F	15,90 A B C D	69,8 A			
D786	372,10 C D E F	15,90 A B C D	69,4 A			
D833	381,80 B C D E	15,80 A B C D	69,8 A			
D889	268,80 G H	16,50 A B	69,7 A			
D921	291,20 F G H	16,50 A B	69,9 A			
D927	477,30 A	15,80 A B C D 6	69,6 A			
DK777	313,10 D E F G H	15,60 B C D 6	69,4 A			
30R92	397,80 A B C D E	15,50 C D 6	69,1 A			
SEFLOARCA	350,70 C D E F G	16,00 A B C D	69,2 A			
96						
Ambiente						
El Sombrero	345,10 B	16,40 A	69,60 A			
San Javier	350,30 B	15,90 B	69,90 A			
Turén	403,60 A	15,40 C 6	69,00 B			

<sup>1</sup> Letras diferentes indican diferencias a nivel de P<0,05

fragmentarse en cocción frente al maíces con menor dureza de endospermo, por ello probablemente los maíces más duros, aunque son recomendados en proceso de molienda seca, quizá requieran un mayor tiempo de extracción o un rendimiento inferior de almidón frente a los maíces de baja dureza de acuerdo a lo señalado por González *et al.* (2005).

Los niveles de TPAS no presentaron diferencias importantes entre genotipos, pero si entre ambientes y es debido a los niveles significativamente inferiores de Turén. Esta variable tiene muy poca asociación con la dureza de los granos de maíz lo cual indica que los maíces evaluados tienden alcanzar el empaste al mismo rango de temperatura independientemente su dureza.

Los resultados obtenidos en el presente estudio son consistentes a los encontrados por (Almeida-Dominguez et al., 1997) y el comportamiento también es similar a los obtenidos por González et al. (2005). Sin embargo, en dichos estudios se emplearon variables comúnmente usadas en estos perfiles como la VPICO, VFIN y TPICO y diferentes tipos de maíces. En este estudio se consideraron sólo maíces de tipo duro y se consideraron viscosidades a diferentes temperaturas del empaste donde algunas de ellas fueron lo suficientemente sensibles a los efectos ambientales o genéticos y que pueden ser explicadas por las diferencias de dureza endospérmica. La Figura 23 revela el comportamiento de los perfiles amilográficos en maíces de diferentes dureza, como ya fue señalado mientras mayor sea la dureza endospérmica menor será los niveles de viscosidad.



D313: Mayor RE, PE y Granulometría, menor viscosidad D374: Menor RE, PE y Granulometría, mayor viscosidad

Figura 23. Comportamiento amilográfico de maíces con diferentes valores de dureza

Los resultados revelan el potencial de los perfiles amilográficos como métodos indirecto de determinación de dureza de grano. Los análisis de regresión indican que es posible predecir los valores de rendimiento de endospermo aún dentro de maíces de tipo duro, en tiempos relativamente cortos y ser aplicado incluso a nivel de plantas individuales (cada corrida requiere unos 5 g de harina de maíz), lo cual puede ser adecuado en programas de mejoramiento genético permitiendo no sólo diferenciar la dureza del grano en etapas

tempranas de mejoramiento del maíz. Los métodos físicos de dureza generalmente requieren entre 500g a 1,5 kg, en algunas etapas de selección no se dispone de un tamaño de muestra suficiente. También permite evaluar otras características funcionales de valor agregado en procesos como molienda húmeda.

### Efecto de algunas variables climáticas sobre los indicadores de dureza de grano

A pesar que las interacciones GxA explicaron gran parte de las variaciones de dureza de grano, la localidad de Turén generalmente estuvo asociada con los menores valores de dureza de grano. Algunos autores han comprobado que condiciones climáticas particulares explican las variaciones de dureza de grano (Fox y Manley, 2009; Eyhérabide et al., 2004; Cloninger et al., 1975). Para determinar si existen algunas condiciones climáticas particulares de los ambientes durante el desarrollo y maduración de los granos y la expresión de la dureza del grano en el Cuadro 11 se presentan los coeficientes de correlación de los datos climáticos y las variables de dureza.

Mayores niveles de precipitación de las localidades estuvieron asociados a menores valores de RE, PE, P100, Malla 3,35mm, G/F y mayores valores de mallas 2 y 1,4 mm y viscosidades. La precipitación en las diferentes etapas de desarrollo del grano Turén mostró picos elevados de precipitación en las primeras dos etapas de desarrollo y otros picos altos durante la madurez, este comportamiento fue seguido en menor proporción por San Javier, mientras que El Sombrero presentó menores promedio de precipitación (Figura 24). Como la temperatura, radiación, humedad relativa, entre otros están asociados con la precipitación, se considera que esta última es el factor más importante (Cabrera, 2002).

Al estudiar la precipitación acumulada, se encontró, en la primera etapa de desarrollo de grano, que los niveles de precipitación acumulada presentan un comportamiento muy similar para los tres ambientes. Sin embargo, al comienzo del estado Pastoso, Turén comienza a diferenciarse de manera importante del resto de las localidades por la cantidad de presipitación durante este período. Finalmente hay un incremento importante de la precipitación acumulada en los tres ambientes cercano a la mitad del estado Madurez-Secado (Figura 25). El aumento de las precipitaciones y su intensidad durante la

Cuadro 11. Correlaciones de las variables de dureza vs. variables climáticas durante el desarrollo del grano

Variable climática	Rend. de	Peso específico	Peso de 100	Granulometría del endospermo (%)			RVA						
	endos.						Viscosidad (RVU)					Temp.	
	(%)	(g/L)	granos (g)	3,35 mm	2 mm	1,4 mm	Grue. /Fino	72,5°C	74,75°C	77°C	Pico	Final	empaste (°C)
Precipitación (mm)	-0,47	-0,50	-0,40	-0,42	0,42	0,43	-0,38	0,42	0,46	0,50	0,48	0,30	-0,35
Temperatura (°C)	0,28	0,64	0,73	0,14	-0,14	-0,15	0,05	-0,14	-0,25	-0,39	-0,29	0,11	-0,02
Temperatura máxima (°C)	-0,36	-0,12	0,07	-0,40	0,40	0,40	-0,42	0,40	0,37	0,31	0,35	0,44	-0,43
Temperatura mínima (°C)	0,58	0,89	0,88	0,43	-0,43	-0,44	0,34	-0,43	-0,55	-0,69	-0,59	-0,14	0,25
Temperatura Rango (°C)	-0,74	-0,88	-0,77	-0,63	0,63	0,64	-0,55	0,63	0,72	0,81	0,75	0,38	-0,48
Humedad Promedio (%)	0,22	-0,35	-0,65	0,38	-0,39	-0,37	0,47	-0,39	-0,25	-0,09	-0,21	-0,62	0,55
Humedad máxima (%)	0,69	0,17	-0,22	0,79	-0,79	-0,78	0,84	-0,79	-0,71	-0,58	-0,68	-0,89	0,87
Humedad mínima (%)	-0,47	-0,78	-0,80	-0,34	0,33	0,35	-0,25	0,33	0,45	0,57	0,48	0,07	-0,16
Humedad rango (%)	0,87	0,84	0,61	0,81	-0,81	-0,82	0,76	-0,81	-0,87	-0,90	-0,88	-0,62	0,70
Radiación promedio (cal/cm2/día)	-0,04	0.56	0,82	-0.22	0,23	0.21	-0,33	0,22	0.07	-0,11	0,02	0,51	-0,42

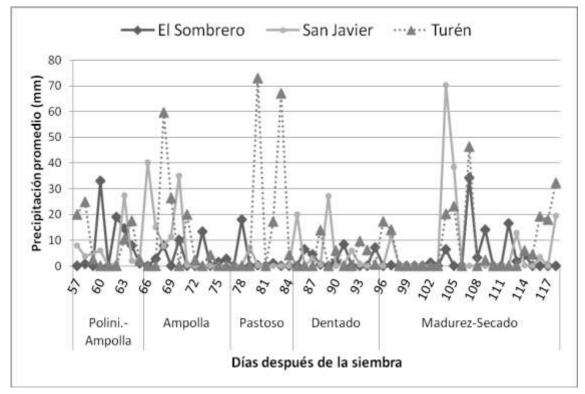
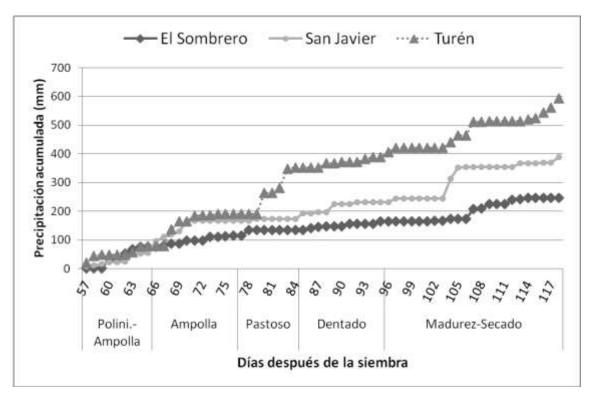


Figura 24. Promedio de precipitación diaria durante la maduración de los granos en tres localidades



Fuente: El Sombrero, Estación Carrizales Aviación Militar Bolivariana El Sombrero Estado Guárico; San Javier, Estación climatológica Naranjal Fundación Danac San Javier, estado Yaracuy; Turén, Estación Meteorológica de Araure del Centro de Investigaciones Agropecuarias del Estado Portuguesa, Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA)

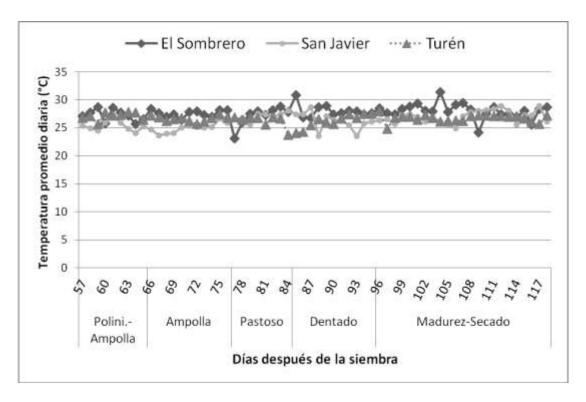
Figura 25. Precipitación acumulada durante la maduración de los granos en tres localidades

madurez del grano (datos no mostrados) probablemente pueden producir una ruptura súbita del equilibrio de la temperatura y humedad interna del grano, este gradiente puede generar un estrés del grano y en consecuencia su fisuramiento y posterior ruptura del endospermo en partículas más pequeñas.

La temperatura promedio y la temperatura máxima presentaron un bajo nivel de asociación con la dureza del grano, sin embargo la temperatura mínima y el rango de temperatura presentaron altos niveles de correlación con la dureza (Cuadro 11). Cuando la temperatura mínima es elevada se obtienen mayores niveles de RE, PE, P100 y proporción de partículas de gran tamaño y menores de viscosidades; mientras que a medida que las diferencias de temperatura (rango) son altos se observan menores valores de RE, PE, P100, Malla 3,35mm y mayores partículas de menor tamaño y niveles de viscosidad.

Al evaluar la distribución de las temperaturas promedio a lo largo del desarrollo del grano, se observó que estas resularon generalmente superiores en El Sombrero. Para esta

localidad se encontraron altos valores de dureza de grano (Figura 26). Por otra parte, se observó que Turén presentó bajos promedios de temperatura en el estado pastoso con respecto al resto de los ambientes. La temperatura máxima presentó los mayores valores en Turén en la primeras dos etapas y en la etapa final de la maduración del grano, frente al resto de las localidades estudiadas (Figura 27).



Fuente: El Sombrero, Estación Carrizales Aviación Militar Bolivariana El Sombrero Estado Guárico; San Javier, Estación climatológica Naranjal Fundación Danac San Javier, estado Yaracuy; Turén, Estación Meteorológica de Araure del Centro de Investigaciones Agropecuarias del Estado Portuguesa, Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA)

Figura 26. Temperatura promedio diaria durante la maduración de los granos en tres localidades

Conforme a lo señalado por Cabrera (2002) cuando la temperatura supera los 32°C se produce un cierre estomático y en consecuencia reduce la fotosíntesis y posterior biosíntesis del grano, las temperaturas máximas alcanzadas en Turén generalmente superaron los 32°C. Las variaciones de temperaturas máximas en Turén probablemente causaron interrupciones de la biosíntesis del grano, favoreciendo la aparición de espacios de aire intergranulares durante la deposición de los almidones, incrementando la opacidad y reduciendo la dureza del grano.

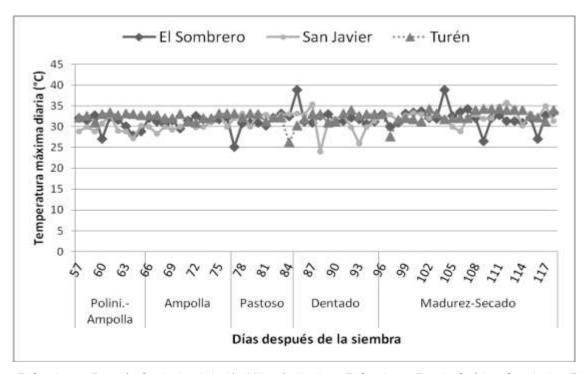


Figura 27. Temperatura máxima diaria durante la maduración de los granos en tres localidades

En cuanto a la temperatura mínima, El Sombrero presentó los mayores valores mientras que San Javier y Turén fueron similares, salvo en estado Pastoso y Madurez-Secado; para estas mismas etapas de desarrollo Turén presentó los menores valores de temperatura mínima de todas las localidades evaluadas (Figura 28).

Para los rangos de temperatura, Turén estuvo asociado a los mayores niveles, siendo estas diferencias mayores en la etapa de Madurez-Secado (Figura 29). El sombrero presentó una temperatura más uniforme ya que alcanzó generalmente los menores rangos de temperaturas dicha uniformidad parece estar asociado a una síntesis uniforme del grano y por ende mayores niveles de dureza de grano. Cualquier ambiente sometido a un rango de temperaturas durante la temporada de crecimiento así como un exceso de alta o de baja temperatura puede afectar las características del llenado de grano y su estructura y por ende su dureza (Duke *et al.*, 1996), esto fue observado generalmente en la localidad de Turén.

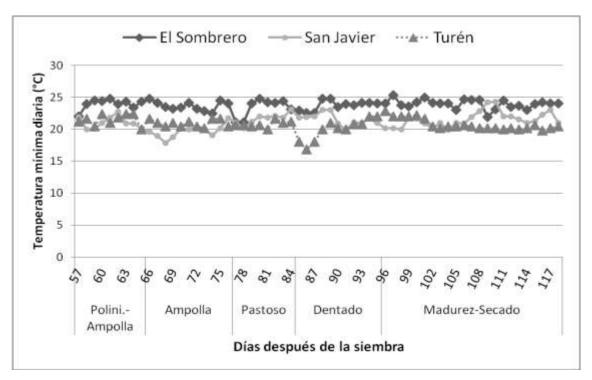
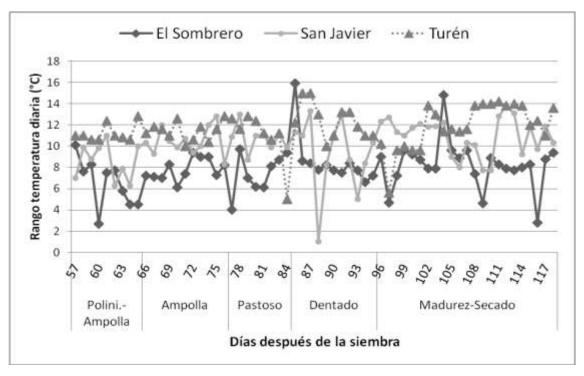


Figura 28. Temperatura mínima diaria durante la maduración de los granos en tres localidades

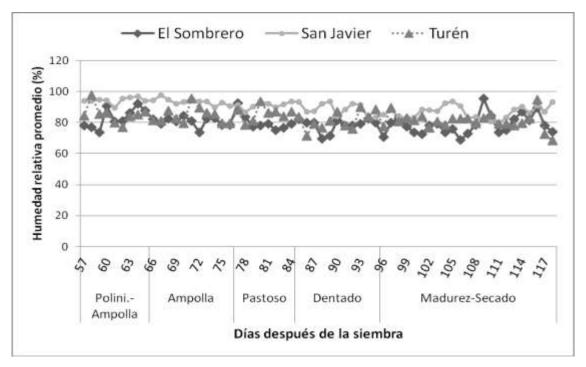


Fuente: El Sombrero, Estación Carrizales Aviación Militar Bolivariana El Sombrero Estado Guárico; San Javier, Estación climatológica Naranjal Fundación Danac San Javier, estado Yaracuy; Turén, Estación Meteorológica de Araure del Centro de Investigaciones Agropecuarias del Estado Portuguesa, Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA)

Figura 29. Rango de temperatura diaria durante la maduración de los granos en tres localidades

Las humedades máximas y mínimas durante el desarrollo del grano estuvieron correlacionadas de modo diferente con las variables de dureza de grano (Cuadro 11). Altos niveles de humedad máxima se asociaron con altos niveles de RE, partículas Malla 3,35mm, G/F y TPAS y bajos niveles de partícula malla 2 y 1,4 mm y de las viscosidades a diferentes temperaturas. Los altos valores de humedad mínima estuvieron asociadas a bajos RE, PE, P100, Malla 3,35 mm y altas viscosidades a 74,75 y 77°C; mientras que los altos rangos de humedad estuvieron asociados con altos RE, PE, P100, partículas 3,35 mm y bajos niveles de Malla 2, 1,4 mm, bajas viscosidades y baja TPAS.

La distribución de la humedad promedio en las diferentes etapas de desarrollo del grano revela que los mayores niveles de humedad fueron alcanzados en San Javier y los menores en El Sombrero (Figura 30). Turén presentó niveles intermedios y las mayores variaciones de humedad que fueron potenciadas notoriamente en la etapa Madurez-Secado, pasando esta de 95 a 65 % de 109 a 113 DDS y luego de y luego de 88 a 67% de 117 a 118 DDS.



Fuente: El Sombrero, Estación Carrizales Aviación Militar Bolivariana El Sombrero Estado Guárico; San Javier, Estación climatológica Naranjal Fundación Danac San Javier, estado Yaracuy; Turén, Estación Meteorológica de Araure del Centro de Investigaciones Agropecuarias del Estado Portuguesa, Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA)

Figura 30. Humedad relativa ambiental diaria durante la maduración de los granos en tres localidades

Las humedades máximas durante el desarrollo del grano fueron mayores y estables en la localidad de San Javier seguido por El Sombrero, mientras que Turén resultaron inferiores y con mayores fluctuaciones a través de las diferentes etapas de producción del grano en la planta (Figura 31). Por otra parte, en Turén se encontraronvalores de humedad máxima cercanos a 55% fueron obtenidos en la etapa de Madurez-Secado, indicando un nivel muy bajo de humedad del ambiente lo cual podría influir en el equilibrio de humedad interna del grano y su posterior ruptura durante el proceso de molienda.

La humedad mínima, en contraste, presentó mayores niveles en Turén evidenciados por sus picos a través de los diferentes estados del grano seguido de San Javier (Figura 32), mientras que El Sombrero presentó los menores valores de humedad mínima. Las mayores fluctuaciones de humedad mínima fueron exhibidas en Turén en diferentes estados de desarrollo del grano.

Los rangos de humedad ambiental fueron generalmente mayores en El Sombrero durante todos los estados de desarrollo del grano, a excepción del final de la etapa Madurezsecado, donde Turén presentó alta diferencia de humedad, mientras que San Javier siempre se ubico en una posición intermedia en sus rangos de humedad relativa (Figura 33).

La respuesta anterior puede ser el resultado de la combinación las diferentes variables climáticas. Por ejemplo, Turén presentó mayores precipitaciones y temperaturas máximas, por ello gran parte del calor generado por temperaturas se emplean en vaporización manteniendo altos niveles de humedad mínima durante todo el desarrollo del grano, esto implica que durante el día el ambiente no llega a ser tan seco. San Javier y El Sombrero, en contraste, tienen una mayor temperatura, humedad promedio y humedad máxima, pero al tener unas menores precipitaciones, el calor de vaporización generado por altas temperaturas promedios probablemente reduce la humedad durante el día generando un ambiente seco lo cual favorece el desarrollo uniforme del grano siendo el almidón adecuadamente empaquetado en el endospermo. Por otra parte, las fluctuaciones de humedad en Turén, al final de la madurez del grano, probablemente causan aumento de la proporción de partículas pequeñas (mayor fraccionamiento) del endospermo y reducción del peso específico, esto fue también fue encontrado por Cloninger et al. (1975).

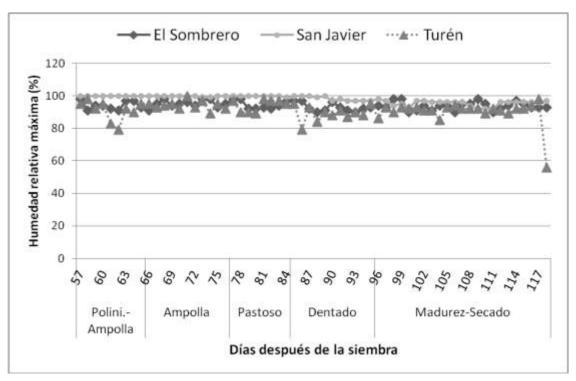
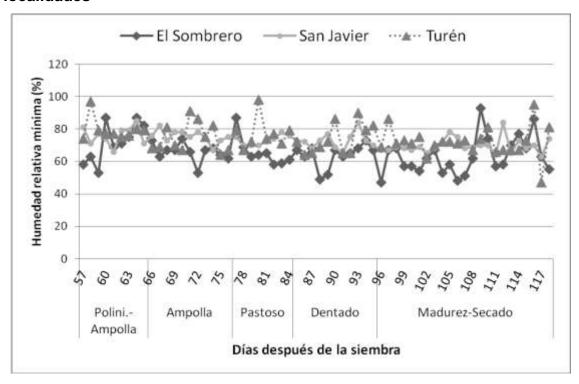


Figura 31. Humedad relativa máxima diaria durante la maduración de los granos en tres localidades



Fuente: El Sombrero, Estación Carrizales Aviación Militar Bolivariana El Sombrero Estado Guárico; San Javier, Estación climatológica Naranjal Fundación Danac San Javier, estado Yaracuy; Turén, Estación Meteorológica de Araure del Centro de Investigaciones Agropecuarias del Estado Portuguesa, Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA)

Figura 32. Humedad relativa mínima diaria durante la maduración de los granos en tres localidades

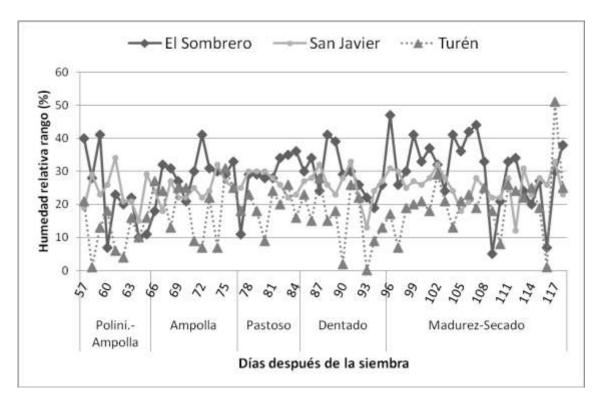


Figura 33. Rango de humedad relativa diaria durante la maduración de los granos en tres localidades

La radiación solar presentó bajos niveles de asociación con las variables que explican la dureza del grano (Cuadro 11). Al evaluar la distribución diaria de la radiación se encontró que Guárico presentó altos picos de radiación y San Javier los más bajos niveles, pero en todas las localidades las fluctuaciones de radiación fueron marcadas por lo cual su efecto no fue consistentemente concluyente (Figura 34). Los resultados anteriores revelan que Turén tiene algunas particularidades a nivel de clima que afectan negativamente el potencial de los granos para el rendimiento en molienda seca. Sin embargo, esto puede ser tomado como una localidad importante para la selección de maíces dentro de los programas de mejoramiento nacionales, por dos razones fundamentales. La primera es que al concentrar la selección de los maíces basado en las condiciones climáticas adversas de Turén para la molienda seca, asegura que los maíces tendrán una alta probabilidad de expresar una mayor dureza incluso en condiciones desfavorables. Segundo, Turén en una localidad importante de producción nacional, de modo que si gran parte del maíz producido en esa zona, presenta incrementos de dureza de grano, esto aumentará el rendimiento industrial. Incrementos en los rendimientos de molienda

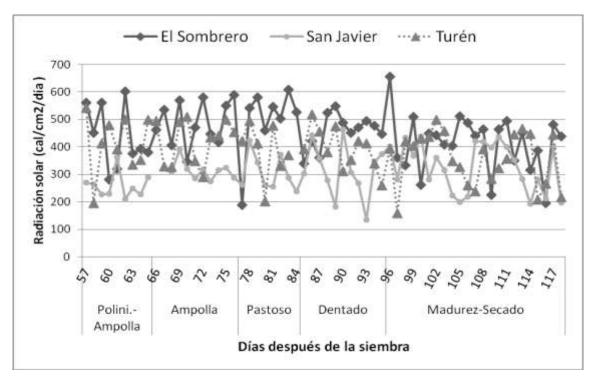


Figura 34. Radiación promedio diaria durante la maduración de los granos en tres localidades

seca en dicha localidad, se traduciría en mayor disponibilidad energética en la dieta de los venezolanos al aprovechar mayor cantidad de almidón por hectárea cultivada de maíz.

#### VI. CONCLUSIONES

Al caracterizar los genotipos de maíces experimentales de un programa de mejoramiento genético a través de diferentes ensayos de dureza de grano, para evaluar su potencial industrial en molienda seca se encontraron las siguientes conclusiones:

- 1. Los promedios generales de rendimiento de endospermo (RE), peso específico (PE) y peso de 100 granos (P100) fueron variables entre los híbridos y generalmente estuvieron enmarcados dentro de los niveles recomendados por la industria nacional de maíz. El resto de las variables de dureza de grano como granulometría y relación grueso/fino del endospermo, y las respuestas amilográficas, permitieron establecer diferencias entre los híbridos evaluados.
- 2. Los métodos empleados para la determinación de dureza, presentaron diferentes niveles dispersión lo cual permitió una diferenciación en mayor o menor grado de los maíces evaluados. Las variables de dureza de granos estuvieron correlacionadas de manera positiva y negativamente a diferentes grados de significación. Altos niveles de RE estuvieron asociados a altos niveles de retención de partículas grandes, peso específico y bajos niveles de partículas pequeñas y bajas viscosidades del perfil amilográfico. Las variables de dureza con menor grado de asociación, fueron P100, Malla -1,4 mm y temperatura de empaste. El análisis de regresión reveló que las variables que explican mejor la respuesta del RE de los genotipos son los promedios de retención de Malla 3,35mm y viscosidad a los 74,75°C.
- 3. El RE, la retención en las diferentes mallas y las diferentes viscosidades del perfil amilográfico fueron afectadas significativamente por los efectos genotipo (G), ambientes (A) y la interacción (GXA), lo que indica que las respuestas de los maíces se comportan de manera diferente conforme al ambiente donde se desarrolle el cultivo. Las variables PE, P100, G/F, TPAS VPICO fueron afectadas significativamente por los efectos G y A pero no en la interacción. Los ambientes El Sombrero (Guárico) y San Javier (Yaracuy), generalmente estuvieron asociados a los mayores valores dureza de grano, mientras que Turén (Portuguesa) afectó negativamente la expresión de la dureza. Las diferencias de dureza estuvieron asociadas a las diferencias climáticas entre los ambientes probados. El ambiente que presentó la menor dureza de grano (Turén), estuvo asociado a los mayores

promedios de precipitación, temperatura máxima y humedad mínima durante el desarrollo del grano y, por otra parte, a las mayores fluctuaciones de humedad al final de la maduración del grano. Los ambientes de San Javier y El Sombrero, presentaron mayores promedios de temperatura, humedad promedio y humedad máxima, y menores precipitaciones lo cual favorece el desarrollo uniforme del grano y por ende una mayor dureza del endospermo.

4. El presente estudio evidencia las ventajas comparativas de algunos cultivares y ambientes para la obtención de maíces de alto rendimiento industrial. Adicionalmente, plantea a los programas de mejoramiento la selección de métodos de ensayo de dureza rápidos y ajustados para los tipos de maíces comúnmente cultivados en Venezuela. La información generada en este estudio como complemento de la evaluación agronómica del cultivo, pretende asegurar la obtención de maíces de alto valor para el productor y la industria y así contribuir con la disponibilidad energética en la dieta de los venezolanos.

#### VII. RECOMENDACIONES

- 1. De los genotipos probados se recomienda seleccionar los genotipos experimentales D313 y D889 como futuros cultivares comerciales de alto potencial industrial ya que dieron una respuesta favorable y estable para la mayoría de las variables de dureza a través de los ambientes evaluados.
- 2. Continuar empleando la localidad de Turén como una zona para la selección de materiales promisorios dentro del programa de mejoramiento de maíz en Venezuela. Cualquier material experimental que responda adecuadamente en dureza para este ambiente desfavorable probablemente tenga un potencial industrial adecuado para el resto de las localidades donde se establecen los ensayos.
- 3. La respuesta de viscosidad a los 74,75°C del perfil amilográfico utilizado, puede ser aplicado como un indicador indirecto y rápido para tamizar la dureza de un gran número de genotipos de maíz. Por ejemplo, un ensayo de avance de líneas de maíz puede tener unos 1000 genotipos, si se analizan por el perfil amilográfico y al menos 400 genotipos presentan viscosidades <200 RVU a los 74,75°C del perfil, dichos genotipos alcanzarán rendimientos de endospermo superiores a los exigidos por la industria (>70%), de este modo ya estaríamos reduciendo la aplicación del análisis más laboriosos, como el de RE, a 40% menos del total de muestras haciendo más eficiente el proceso de selección.

# VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AACC American Association of Cereal Chemists 2000a. Approved Methods. Test Weight per Bushel. Method 55-10.01. 10th ed. St. Paul, MN.

AACC American Association of Cereal Chemists 2000b. Approved Methods. Corn Breakage Susceptibility Method 55-20.01. 10th ed. St. Paul, MN.

Abdelrahman, A. y Hoseney R. 1984. Basics for hardness in pearl millet, grain sorghum and corn. Cereal Chem. 61: 232-235.

Abreu, E. y De Florez, E. A. 2004. ¿Qué ha cambiado en Venezuela desde 1970 en cuanto a la disponibilidad de alimentos para el consumo humano?. Agroalim, 9 (19):13-33

Akazawa, T. 1991. ADPG revisited-Nearly 30 years from Buenos Aires and Los Baiios to Nagoya. Plant MOI. Biol. Rep. 9, 145-155.

Almeida-Dominguez, H., Suhendro, E., y Rooney, L. 1997. Factors affecting rapid visco analyser curves for the determination of maize kernel hardness. J. Cereal Sci. 25, 93–102.

Armstrong, P., Lingenfelser, J. y McKinney, L. 2007. The effect of moisture content on determining corn hardness from grinding time, grinding energy, and near-infrared spectroscopy. Appl. Eng. Agric. 23, 793–799

AOAC Association of Official Analytical Chemists. 1990. Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists. 15<sup>th</sup> edition. Washington, DC. USA, 1300 p.

Avila, M. Borges, O. y Bernaez J. 2007. Efecto del tiempo de almacenamiento refrigerado sobre la calidad de la mazorca del híbrido de maíz superdulce "Delicia" (bt1). Rev. Fac. Agron. LUZ. 24(4): 763-779.

Bartolini. 1990. El Maíz. Ediciones Mundi-prensa. Madrid. 125 p.

Bartolo-Pérez, P., Peña, J. Cruz-Orea, A., y Calderón, A. 1999. Estudio de la composición química de pericarpio de maíz con las técnicas XPS y EDAX Superficies y Vacio 8, 64-68. México.

Beadle, G. 1939. Teosinte and the origin of maize. J. Her. 30:245-247.

Beadle, G. 1972. The mystery of maize. Field Mus. Nat. His. Bull. 43:2-11.

Bejarano y Segovia. 2000. Origen y evolución de la especie *Sección1* Origen del maíz. *En*: Fontana, H. y González, C. (Comps.) El maíz en Venezuela. Fundación Polar (Ed). Caracas. Venezuela. 530 p.

Bellido, L. 1991. Cultivos herbáceos (Vol. I Cereales) Ed. Mundi-Prensa. España. 425 p.

Bennetzen, J., Buckler, V., Chandler, V., Doebley, J., Dorweiler, J., Gaut, B., Freeling, M., Hake, S., Kellogg, E., Poething R., Walbot, V. y Wessler S. 2001. Genetic evidence and the origin of maize. Lat Am Antiq. 12(1), pp. 84-86

Bhave, M., Lawrence, S., Barton, C., y Hannah, L. 1990. Identification and molecular characterization of Shrunken-2 cDNA clones of maize. Plant Cell. 2, 581-588.

Bjarnason, M. y Vasal, S. 1992. Breeding of quality protein maize (QPM). Plant Breed. Res. 9: 181-216.

Bolaños J. y Barreto, H. 1991. Análisis de los componentes de rendimiento de los ensayos regionales de maíz de 1990. En: Análisis de los resultados experimentales del PRM 1990. CIMMYT, Guatemala . 2 :9-27.

Bolaños, J. y Edmeades G. 1993. Eight cycles of selection for drought tolerance in lowland tropical maize. I. Responses in grain yield, biomass and radiation utilization. Field Crops Res. 31:233-252.

Boyer, C. y Shannon, J. 2003. Carbohidrates of the kernel. <u>In</u>: White, P. and Johnson, L. (eds.) Corn: Chemistry and Technology. AACC, INC: MInesota. pp. 289-312.

Brekke, O. 1970. Dry-milling artificially dried corn; Roller-milling of degerminator stock at varius moistures. Cereal Sci. Today. 15:37-42.

Cabrera, S. 2000. Agronomía del Cultivo: Épocas de siembra y densidades óptimas en maíz. *En*: Fontana, H. y González, C. (Comps.) El maíz en Venezuela. Fundación Polar (Ed). Caracas. Venezuela. 530 p.

Cabrera, S. 2002. IX Curso sobre producción de maíz Asoportuguesa. Venezuela pp 13-16

Cartay, R. 2000. El consumo de maíz en Venezuela. <u>En</u>: Fontana, H. y González, C. (comps.) El maíz en Venezuela. Ed. Fundación Polar, Caracas. Venezuela. pp 439-530.

CFR (Code Federal Regulations). 2000. Title21. Part 137:351-366.

Cheetham, H., Millner, J. y Hardacre, A. 2006. The effect of nitrogen fertilisation on maize grain quality and yield. Agron NZ. 36, 71–84.

Christianson, D. Nielsen, H. Khoo, U. Wolf, M. y Wall, J. 1969. Isolation and chemical composition of protein bodies and matrix protein in corn endosperm. Cereal Chem. 46:372

Christianson, D., Khoo, U., Nielsen, H., y Wall. J. 1974. Influence of Opaque-2 and Floury-2 Genes on Formation of Proteins in Particulates of Corn Endosperm. Plant Physiol. 53(6): 851–855

Cloninger, F., Horrocks, R. y Zuber, M. 1975. Effects of Harvest Date, Plant Density, and Hybrid on Corn Grain Quality. Agron J. 67:693-695

COVENIN (Comisión Venezolana de Normas Industriales). 1980a. Norma 1195-80. Alimentos. Determinación de nitrógeno. Método Kjeldahl. Caracas. Venezuela. 11 p.

COVENIN (Comisión Venezolana de Normas Industriales).1980b. Norma 1785-81. Productos de cereales y leguminosas. Determinación de grasa. Caracas. Venezuela. 3 p.

COVENIN (Comisión Venezolana de Normas Industriales). 1987. Norma 1935-87 Maíz para uso industrial.

Correa, C., Shaver, R., Pereira, M. y Lauer J. 2002. Relationship between corn vitreousness and ruminal *in situ* starch degradability. J. Dairy Sci. 85: 3008-3012.

Crosbie, G. y Ross, A. 2007. The RVA Handbook. AACC International. Minnesota. 153 p.

Darrah, L., McMullen, M., y Zuber, M. 2003. Breeding, Genetics, and seed corn production. <u>In</u>: White, P. and Johnson, L. (eds.) Corn: Chemistry and Technology. AACC, INC: MInesota. pp. 35-46.

Díaz, J., Obregón, P., Gómez, F. y Quintana, H. 1974. Repercusión de la tecnología en el desarrollo de los principales cultivos de Venezuela; tercer caso: Maíz. Consejo Nacional de Investigaciones Agrícolas. Publicación Miscelánea Nº 20. Venezuela. 114 p.

Dombrink-Kurtzman, M. y Bietz, J. 1993. Zein composition in hard and soft endosperm of maize. Cereal Chem. 70: 105-108.

Dowswell, C. Paliwal, R. y Cantrell, R. 1996. Maize in the third world. Boulder, CO, USA, Westview Press.

Duensing W., Roskens, A., y Alexander, R. 2003. Corn dry milling: Processes, products, and applications. <u>In</u>: White, P. and Johnson, L. (eds.) Corn: Chemistry and Technology. AACC, INC: MInesota. pp. 407-447.

Duke, E. y Doehlert, D. 1996. Effects of heat stress on enzyme activities and transcript levels in developing maize kernels grown in culture. Environ. Exp. Bot. 36, 199–208

Duvik, D. 1961. Protein granules of maize endosperm cells. Cereal Chem. 38: 374–385.

Erasmus, C. y Taylor J. 2004. Optimising the determination of maize endosperm vitreousness by a rapid non-destructive image analysis technique. J Sci Food Agr. 84(9): 920-930

Eubanks, M. 1995. A cross between two maize relatives: Tripsacum dactyloides and Zea diploperennis (Poaceae). Econ Bot. 49: 172-182.

Eyherabide, G., Robutti, J., y Borras, F. 1996. Effect of nearinfrared transmission-based selection on maize hardness and the composition of zeins. Cereal Chem. 73, 775–778.

Eyhérabide G., Robuti, J. Percibaldi, N. Presello, D. y Alvarez, M. 2004. Association between grain yield and endosperm hardness in maize cultivars. Maydica 49: 319-326.

FAO. 2009. División de estadística (consulta el 10 de septiembre de 2009).URL:http://www.fao.org/es/ess/top/commodity.html?lang=es&item=56&year=2005

FEDEAGRO (Confederación Nacional de Asociaciones de Productores Agropecuarios) 2008. Estadísticas agrícolas. (consulta el 10 de septiembre del 2009) URL: http://www.fedeagro.org/produccion/Rubros.asp

Fischer, R. y Palmer, F. 1984. Tropical maize. In P.R. Goldsworthy and N. M. Fisher (Eds). The physiology of tropical field crops. Wiles p. 213-248.

Fox G. y Manley, M. 2009. Hardness Methods for Testing Maize Kernels. J. Agric. Food Chem. 57(13): 5647–5657

Gallinat, W. 1971. The origin of maize. Ann. Rev. Genet. 5: 447-448.

Galinat, W. 1985. Whole ear baby corn, a new way to eat corn. Proc. Northeast Corn improvement Conf. 40:22-27.

George, R. 1989. Producción de semillas de plantas hortícolas. Ed. Mundi-Prensa. España 330 p.

Gibbon, B., y Larkins, B. 2005. Molecular genetic approaches to developing quality protein maize. Trends in Genetics, London, v. 21, n. 4, p. 227-233, Apr.

Giguere, R. 1993. Grain milling and degermination process. U. S. patent 5,250,313.

Gilliard, T. y Bowler, P.1987. Morphology and composition of starch', Critical Reports Appl. Chem. 13 p 55-78

GIPSA (United Stetes Departament of Agriculture Grain Inspection Packers an Stockyards Administration). 2007. Grain inspection handbook II.4. Corn; 9 Sorghum.

González, R., Torres, R., De Greef, D., Bonaldo, A., Robutti, J. y Borrás, F. 2005. Efecto de la dureza del endospermo del maíz sobre las propiedades de hidratación y cocción. ALAN 55 (4): 354-360

Gordón, R. 2001. Guía para el manejo integrado del maíz mecanizado. Instituto de Investigaciones Agrícolas de Panamá. pp 2-3.

Grains Council U.S. 2000. 1999-2000 Informe Sobre la Calidad de Granos de Valor Acrecentado. 127 p

Grains Council U.S. 2006. Informe sobre Maíz con Valor Mejorado. 2005/06. (consulta el 10 de noviembre de 2009). URL: http://www.agmrc.org/media/cms/USGC\_Value\_Enhanced\_Corn\_Report\_200\_08C7959C 2B1E6.pdf

Guzmán, J.1991. Cultivo de caraota y maíz. 3<sup>era</sup> ed. Expanda Editores. Venezuela. 320 p.

Haddad, Y., Benet, J. y Abecassis, J. 1998. A rapid general method for appraising the rheological properties of the starchy endosperm of cereal grains. Cereal Chem. 75, 673–676.

Hamilton, T., Hamilton, B., Johnson, B., y Mitchell, H. 1951. The dependence of the physical and chemical composition of the corn kernel on soil fertility and cropping system. Cereal Chem. 28:163.

Hannah, L., Giroux, M., y Boyer, C. 1993. Biotechnological modification of carbohydrates for sweet maize and maize improvement. In Biotechnological Modification of Nutritional Crops, R. Jorgensen, ed, Scientia Horticulturae 55, 177-197.

Herum, F., and Blaisdell, J. 1981. Effects of the moisture content, temperature, y test variables on results with grain breakage testers. Am. Soc. Eng. 51-3030

Hizukuri, S. 1986. 'Polymodal distribution of chain lengths of amylopectins and its significance', Carboh. Res. 147 p 342-347,

Hoseney, R. 1994. Principles of cereal science and technology. 2ed, American Association of Cereal Chem, St. Paul, MN.

Instituto Nacional de Nutrición (INN). 2007. Hojas de balance de alimentos de Venezuela 2002-2004. Caracas. Dtto Capital. 333pp.

James, M. Denyer, K. y Myers, A. 2003. Starch synthesis in the cereal endosperm. Current Opinion in Plant Biology, 6:215–222

Jugenheimer, R. 1990. Maiz, variedades mejoradas. Métodos de cultivo y producción de semillas. ed. Limusa. México. 834 p.

Kelly, A., Smith, A., Eccleston, J. y Cullis, B. 2007. The accuracy of varietal selection using factor analytic models for multienvironment plant breeding trials. Crop Sci. 47, 1063–1070.

Kim, T., Hampton, J., Opara, L., Hardacre, A., y Mackay, B. 2002, Effects of maize grain size, shape and hardness on drying rate and the occurrence of stress cracks. J. Sci. Food Agric. 82, 1232–1239.

Kirleis, A. y Stroshine, R.1990. Effects of hardness and drying air temperatur on breakage susceptibility and dry-milling characteristics of yellow dent corn. Cereal Chem. 67:523-528.

Kriz, A. 1987. Evaluation of genetic factors that affect kernel hardness in maize. University of Illinois, Urbana-Champaign.

Landry, J., Delhaye, S. y Damerval, C. 2000. Improved methods for isolating and quantitating  $\alpha$ -amino nitrogen as nonprotein, true proteins, salt-soluble proteins, zeins and true glutelin in maize endosperm. Cereal Chem. 77:620-626.

Larkins, B. y Hurkman, W. 1978. Synthesis and deposition of zein in protein bodies of maize endosperm. Plant Physiol. 62, pp. 256–263.

Lawton, J y Wilson, C. 2003. Proteins of kernels. <u>In</u>: White, P. and Johnson, L. (eds.) Corn: Chemistry and Technology. AACC, INC: MInesota. pp. 313-354.

Lee, K., Herrman, T., Lingenfelser, J. y Jackson, D. 2005. Classification and prediction of maize hardness-associated properties using multivariate statistical analyses. J. Cereal Sci. 41, 85–93.

Lee, K., Herrman, T., Rooney, L., Jackson, D., Lingenfelser, J., Rausch, K., McKinney, J., Iiams, C., Byrum, L., Hurburgh, C., Johnson, L. y Fox, S. 2007. Corroborative study on maize quality, dry-milling and wet-milling properties of selected maize hybrids. J. Agric. Food Chem. 55, 10751–10763.

Lending, C., y Larkins, B. 1989. Changes in the zein composition of protein bodies during maize endosperm development. Plant cell 1(10):1011-1023.

Li, P., Hardacre, K. Campanella, H. y Kirkpatrick K. 1996 Determination of Endosperm Characteristics of 38 Corn Hybrids Using the Stenvert Hardness Test. Cereal Chem. 73(4):466-471

Lopes, M. y Larkins, B. 1993. Endosperm Origin, development, and function. Plant Cell. 5(10): 1383-1399

Lous-Alexandre, A., Mestres, C., y Faure, J. 1991. Measurement of endosperm vitreosness of corn. A quantitative method and its application to African cultivars. Cereal Chem. 68, 614-617.

McDonough, C., Floyd, C., Waniska, R. y Rooney, L. 2004. Effect of accelerated aging on maize, sorghum, and sorghum meal. J. Cereal Sci. 39, 351–361.

MacNeish, R. y Eubanks, M. 2000. Conparative analysis of the Rio Balsas and Tehuacan models for the origin of maize. Latin American Antiquity. 11, 3-20

Mangelsdorf, P. y Reeve, R.1939. The origin of Indian corn and its relatives. Texas Agricultural Experimental Station Bulletin No. 574

Mangelsdorf, P. y Reeve, R.1959. The origin of corn II. A critique of current theories. Hardvard Univ. Bot. Mus. L. 18 (11).

Medina, E. 2008. Situación mundial del maíz. en: Comité Ciudadano de Evaluación de Estadística Económica de Sinaloa (CEEES). (consulta el 10 de septiembre del 2009). URL: www.ceees.com.mx/publico/.../Situación%20Mundial%20Maiz.pdf

Mertz, E., Bates I. y Nelson, O. 1964. Mutant gene that changes protein composition and increases lysine content of maize endosperm. Science. 145: 279-280.

Mehra, S. Gupta, D. Buriak, P. Tumbleson, M. y Eckhoff, S. 2001. Effects of maize tempering on throughput and product yield. Cereal Chem. 78 210-214.

Monjardino, P., Smith, A. y Jones, R. 2005. Heat stress effects on protein accumulation of maize endosperm. Crop Sci. 45, 1203–1210

Moreau, R., Singh, V. Nun, A. y Hicks, B. 2000. Phytosterols in the aleurone layer of corn kernels. Biochem Soc T. 28(6):803-806

Morrison, W. 1981. Starch lipids: a reappraisal. Stärke 33: 408–410

Morrison, W. y Milligan, T. 1982. Lipids in maize starches. In Maize: Recent Progress in Chemistry and technology. G.E. Inglett ed. Academy Press. New York pp 1-18

Morrison, W., Tester, R., Snape, C., Law, R., y Gidley, M. 1993. Resistance to acid hydrolysis of lipid-complexed amylose and lipid-free amylose in waxy and normal barley starches. Cereal Chem. 70:385.

Newport Scientific 1998. Applications manual for the Rapid Visco <sup>™</sup> Analyser. Newport Scientific Pty. Ltd. Australia123 p

Nieves, Y. 2008. Maíz: Rubro prioritario para la alimentación de los venezolanos Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA) (Consulta 20 agosto 2009) URL: http://www.inia.gob.ve/index.php?option=com\_content&task=view&id=886&Itemid=145

Noble, S., Brown, R. y Davison, V. 2000. Development of a maize breakage test method using a comercial processor. J Agr Eng Res. 77, 385-390.

O'Brien, T., Sammut, M., Lee, J., y Smart, M. 1985. The vascular system of the wheat spikelet. Aust J. Plant Physiol. 12:847-511.

Olsen, O. 2001. Endosperm development: cellularization and cell fate specification. Annual Review Plant Physiol and Plant Mol Biol. 52: 233-267

Paiva, E., Kriz, A., Peixoto, M. y Wallace J., 1991. Quantitation and distribution of gamma-Zein in the endosperm of maize kernels. Cereal Chem. 68: 276-279.

Paliwal, R. 2000. Maize-growing environments in: Tropical maize: improvement and production. Paliwal, R. and Granados (Comp.) FAO Plant Production and Protection Series Nº28. 363 p

Paterniani, E. 2000. Evolución del maíz. En: Fontana, H. y González, C. (comps.) El maíz en Venezuela. Ed. Fundación Polar, Caracas. Venezuela. pp 15-25.

Paulsen, M., Watson, S. y Singh, M., 2003. Measurement and maintenance of corn quality. In: White, P.J., Johnson, L.A. (Eds.), In Corn: Chemistry and Technology, 2nd ed. AACC, St. Paul, MN, pp. 159–220.

Peplinski, A., Paulsen, M., Anderson, R., y Kwolek, W. 1989. Physical, chemical, and dry-milling characteristics of corn hybrids from various genotypes. Cereal Chem. 66:117

Pelinski, A. Paulsen, M. y Bouzaiter, A. 1992. Physical, chemical, and dry-milling properties of corn of varying density and breakage susceptibility. Cereal Chem. 69:397-400.

Pereira, M., Von Pinho, R., Bruno, R. y Calestine, G. 2004. Ruminal degradability of hard or soft texture corn grain at three maturity stages. Sci. Agric. 61, 358–363.

Pereira, R. Davide, L., Pedrozo C., Carneiro N., Souza I. y Paiva E. 2008. Relationship between structural and biochemical characteristics and texture of corn grains. Genet. Mol. Res. 7 (2): 498-508

Pomeranz, Y., Czuchajowska, Z.; Martin, C. y Lai, F. 1985. Determination of corn hardness by the Stenvert hardness tester. Cereal Chem. 62, 108–112.

Pomeranz, Y., Martin, C., Traylor, D., y Lai, F.1984. Corn hardness determination. Cereal Chem. 61:147.

Pomeranz, Y., Hall, G., Czuchajowska, Z., y Lai, F. 1986. Test weight, hardness, andbreakage susceptibility of yellow dent corn hybrids. Cereal Chem. 63:349-351.

Ramirez, A., Ortiz de Bertorelli, L. y Martinez, N. 2007. Adaptabilidad de híbridos de maíz dulce al almacenamiento como granos enteros congelados. *INCI*. 32(8):529-534.

Robutti, J. 1995. Maize kernel hardness estimation in breeding by near-infrared transmission analysis. Cereal Chem. 72, 632–636.

Robutti, J., Borras, F., Ferrer, M. y Bietz, J. 2000. Grouping and identification of Argentine maize races by principal component analysis of zein reversed-phase HPLC data. Cereal Chem. 77, 91–95.

Robutti, J., Hoseney, R. y Wassom, C. 1974. Modified *opaque-2* corn endosperms. II. Structure viewed with a scanning electron microscope. Cereal Chem. 51: 173-179.

Robutti, J., Borrás, F. González R., Torres R. y De Greef, D. 2002. Endosperm properties and extrusion cooking behavior of maize cultivars. Food Sci. Tech. 35, 663-669

Rodríguez, P. 2000. Aspectos climátológicos relacionados con la producción comercial de maíz. *En*: Fontana, H. y González, C. (Comps.) El maíz en Venezuela. Fundación Polar (Ed). Caracas. Venezuela. 530 p.

Rodriguez, C. y Bartosik, R. 2006. Secados de granos. Ediciones Instituto Nacionales de Tecnología Alimentaria. Argentina. (consulta el 10 de marzo de 2010) URL: http://www.cosechaypostcosecha.org/data/folletos/FolletoSecado Granos.pdf

Ruan, R. Litchfield, J. y Eckhoff, S. 1992. Simultaneus and nondestructive measurements of transient moisture profiles and structural changes in corn kernelsusing microscopic nuclear magnetics resonance imaging. Cereal Chem. 69:600-606.

Serna-Saldívar, S., Gómez, M. y Rooney, L. 1994. Food uses of regular and specialty corns and their dry-milled fractions. *In* A.R. Hallauer, ed. *Specialty corns*, p. 263-298. Boca Raton, FL, USA, CRC Press.

SAS Institute. 2007. JMP a business unit of SAS. Versión 7.0.2. SAS Institute Inc.

Serna-Saldivar, S. O.; Gómez M., H.; Almeida-Hernández, H. D.; Islas-Rubio, A y Rooney L., W. 1993. A method to evaluate the lime-cooking properties of corn (*Zea mays* L.). Cereal Chem. 70(6):762-764.

Smith, A.; Cullis, B. y Thompson, R. 2001. Analyzing variety by environment data using multiplicative mixed models and adjustments for spatial field trend. Biometrics, 57, 1138–1147.

Stenvert, N. 1974. Grinding resistance, a simple measure of wheat hardness. Flour Anim. Feed Milling. 156, 24-25, 27.

Takeda, C. Takeda, Y. y Hizukuri, S. 1989 'Structure of amylomaize amylose', Cereal Chem. 66: 22-25,

Taylor J., y Gyebi, K. 2009. Applications for Non-Wheat Testing Methods <u>in:</u> Stanley P. and Linda S.(eds). The ICC Handbook of Cereals, Flour, Dough & Product Testing: Methods and Applications. 504 p

Tran, T., De Man, J. y Rasper, V. 1981. Measurement of corn kernel hardness. Can. Inst. Food Sci. Technol. J. 14:42

Vieira, M., Minohara, L. y De Carvalho N., Bergamaschi, M.1995. Relation-ship of black layer and milk line development on maize seed maturity. Sci. Agri. Piracicaba. 52(1):142-147.

Wall, J., Cooker, L., y Biets, J. 1988. Structure and origin of maize endosperm alcohol-insoluble glutelin. J. Agvric. Food Chem. 36:722-728.

Wallace, J., Lopes, M., Paiva, E. y Larkins, B. 1990. New methods for extraction and quantitation of zeins reveal a high content of gamma-zein in modified *opaque-2* maize. Plant Physiol. 92: 191-196.

Watson, S. 1987. Structure and composition. <u>In</u>: S.A. Watson y P.E. Ramstad. eds. Corn: chemistry and technology, p. 53-82. St Paul, EE.UU., Am. Assoc. Cereal Chem.

Watson, S. 2003. Description, development, structure, and composition of the corn kernel. In: White, P. and Johnson, L. (eds.) Corn: Chemistry and Technology. AACC, INC: Mlnesota. pp. 69-106.

Wehling, R., Jackson, D. y Hamaker, B. 1996. Prediction of corn dry-milling quality by near-infrared spectroscopy. Cereal Chem., 73, 543–546.

White, P. y Pollak, L. 1995. Corn as a food source in the United States: Part II. Process, products, composition, and nutritive values. Cereal Foods World 22:152-154.

Willcutt, H. 2001. Corn Harvesting, Drying, and Storage. Extension Service of Mississippi State University, cooperating with U.S. Department of Agriculture. (consulta el 10 de enero de 2010) URL: http://msucares.com/pubs/publications/p2285.pdf

Wolf, M., Khoo, U., y Seckinger, H. 1969. Distribution and subcellular structure of endosperm protein in varieties of ordinary and high-lysine maize. Cereal Chem. 46 253-263.