

Alcohol de biomasa. I. Azúcares solubles fermentables en tallos de variedades de maíz y sorgo dulce

F. J. García Breijo y E. Primo Yúfera

Departamento de Biotecnología. ETSIA. Universidad Politécnica. Camino de Vera, 14. 46022 Valencia, España

RESUMEN

Se determinan los contenidos de azúcares fermentables extraíbles con agua, en tallos de maíz sacarino (var. E-41), de maíz Funk's (var. G-5050) y de sorgo dulce (variedades Wiley, Keller, Wray, Dale y Río), así como los rendimientos en alcohol tras la fermentación de los extractos, ensayando 25 razas de levaduras. Los tallos de sorgo dulce tienen un elevado contenido de azúcares fermentables, que llega al 33 % (b.s.) en la variedad Wray; en el maíz sacarino este contenido es aproximadamente del 27 %, y en el Funk's del 11 %. La fermentación de los caldos obtenidos en las extracciones acuosas producen rendimientos elevados de alcohol, que oscilan entre el 85 y el 95 % del teórico cuando se fermentan con la levadura adecuada.

Alcohol from biomass. I. Soluble fermentable sugars in stalks of corn and sweet sorghum

ABSTRACT

Fermentable water-extractable sugars content in stalks of sacarine corn (var. E-41), Funk's corn (var. G-5050) and sweet sorghum (varieties Wiley, Wray, Keller, Dale and Rio), as well as alcohol yield in the fermentation of the extracts (testing 25 strains of yeast), were determined. In the sweet sorghum stalks a great amount of fermentable sugars were found, reaching 33 % (d.b.) in the Wray variety; in the sacarine and Funk's corns this amount was 27 and 11 %, respectively. Fermentation yield was very high, ranging between 85 and 95 % of the theoretical maximum when broths were fermented with the adequate yeast.

INTRODUCCION

La obtención de combustibles líquidos a partir de biomasa ha despertado gran interés en los últimos años. Aunque, temporalmente, ha cedido la crisis del petróleo, la necesidad de encontrar carburantes para

motores de explosión que no dependan de aquél es evidente. Además, la tendencia a eliminar el TEP para aumentar el índice de octano, incrementa el interés de los carburantes oxigenados (Gaudemarais *et al.*, 1986; Hall, 1983).

La fermentación de los granos de ce-

reales para producir etanol-carburante, tiene serias oposiciones por razones sociales, en un mundo con déficit de alimentos (Barnard y Hall, 1983; Bounte, 1979; Chartier, 1975; Krochta, 1979; Weizz y Marshall, 1979 y Wilke *et al.*, 1981).

Una solución más atractiva es usar biomasa residual de origen agrícola como materia prima. Estos residuos agrícolas pueden contener tres tipos de hidratos de carbono bien distintos: a) monosacáridos y oligosacáridos solubles en agua y, en su mayor parte, fermentables por levaduras; b) pentosanas fácilmente hidrolizables, y c) lignocelulosa difícil de hidrolizar. En un proceso de aprovechamiento máximo debería obtenerse cada una de estas fracciones separadamente, lo que permitiría la mínima degradación, sin perjuicio de un buen agotamiento de los materiales. Por otra parte, cada una de las fracciones tiene una utilidad diferente.

Con esta finalidad se está desarrollando en este Departamento un estudio que comprende varios residuos agrícolas y cosechas agroenergéticas que tienen importancia actual o potencial en España. A todos ellos se les aplica un proceso general diseñado para el aprovechamiento máximo del potencial hidrocarbonado, que consta de tres partes principales: a) extracción de los azúcares solubles; b) prehidrólisis de las hemicelulosas, y c) hidrólisis del residuo lignocelulósico. Finalmente, se estudia la capacidad de fermentación de los caldos obtenidos en cada fase. Los materiales a estudiar forman dos grupos. El grupo *azucarado*, rico en azúcares solubles (formado por tallos de maíz sacarino, variedad E-41, tallos de maíz Funk's, variedad G-5050, y tallos de sorgo dulce, de cinco variedades: Río, Wiley, Wray, Dale y Keller),

y el grupo *pentosánico-celulósico*, formado por los demás residuos estudiados (zuros de maíz sacarino, variedad E-41 y de maíz Funk's, variedad G-5050, paja de arroz, variedad Bahía, y sarmientos de vid, variedad Bobal).

En este trabajo presentamos los resultados obtenidos en la etapa de extracción acuosa realizada sobre los materiales del grupo *azucarado*. En los pertenecientes al grupo *pentosánico-celulósico*, no se ha estudiado esta etapa, dado su bajo contenido en azúcares solubles en agua.

MATERIAL Y METODOS

Material

El maíz sacarino, variedad España-41 (E-41), obtenido por el Dr. Blanco (Instituto de Biología de Barcelona, CSIC), es un híbrido que posee un elevado contenido de azúcares en el tallo, a la maduración del grano, el cual es rico en aminoácidos esenciales. El utilizado en este trabajo procedía de la Estación Experimental del Centro de Cultivos Subtropicales de Churrriana (Málaga), perteneciente al INIA.

El maíz Funk's, variedad G-5050, fue suministrado por el Dr. C. López, siendo cultivado en el Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA) de Moncada (Valencia).

Los materiales empleados se secaron al aire durante un mes, extendiéndolos sobre piso de cemento.

El sorgo dulce se ha recolectado en dos momentos: a) tres semanas antes de la iniciación del granado (que denominamos sorgo verde) y b) al iniciarse el granado (sorgo término). Cada una de las muestras de sorgo se han tratado antes y después de secarse al sol.

Las cinco variedades de sorgo dulce fueron suministradas por el Dr. Gómez de Barreda, y procedían del IVIA de Moncada (Valencia).

En la tabla I se dan las producciones de tallos por hectárea (en kg peso seco), y el número

Tabla I

DATOS AGRONÓMICOS DEL MAÍZ SACARINO¹, VAR. E-41 (Blanco, 1983), DEL MAÍZ FUNK'S, VAR. G-5050 (López, 1983), Y DE LAS CINCO VARIEDADES DE SORGO ESTUDIADAS (Gómez de Barreda, 1983).

Variedad	Producción de tallos ² (kg/Ha)		Zuros ² (kg/Ha)	Grano ² (kg/Ha)	Número plantas/Ha
Maíz sacarino, var. E-41	10.000		3.300	8.000	58.300
Maíz Funk's, v. G-5050.	8.400		1.700	9.700	66.000
Sorgo dulce:					
Var. Dale	28.000 ³	41.800 ⁴	-	-	156.300 ⁴ 83.300 ³
Var. Keller	36.500 ³	68.200 ⁴	-	-	153.600 ⁴ 94.800 ³
Var. Wiley	31.800 ³	38.600 ⁴	-	-	94.900 ⁴ 42.700 ³
Var. Río	44.900 ³	51.100 ⁴	-	-	142.600 ⁴ 70.000 ³
Var. Wray	44.000 ³	61.600 ⁴	-	-	135.400 ⁴ 65.100 ³

¹ Rico en aminoácidos esenciales y de tallo sacarino.

² Los datos se dan referidos a materia seca.

³ Cultivado en Málaga.

⁴ Cultivado en Sevilla.

de plantas por hectárea, para cada uno de los materiales estudiados.

Métodos de análisis

Los azúcares reductores se determinan por el método 31.052 de la AOAC (1980), que utiliza una valoración iodométrica de óxido cuproso. Los azúcares totales según el método 31.034 de la AOAC (1980), basado en el sistema de inversión Herzfeld. Los azúcares fermentables según el método 31.086 de la AOAC (1980), fundamentado en una fermentación selectiva mediante una levadura adecuada. Las pentosas y pentosanas según el método 43.021 de la AOAC (1965).

El análisis de etanol, en los destilados procedentes de los caldos fermentados, se efectúa en un cromatógrafo G.L. controlado por una central de datos. La columna empleada es de acero (1 m X 2'00 mm de d.i.) rellena de Poropak R, 80-100 mallas. La temperatura de la

columna es de 175° C (constante) y la del inyector y el detector de 200° C. El flujo de nitrógeno se mantiene en 30 ml/min y se utiliza acetona como patrón interno.

Obtención de los extractos

El material húmedo se tritura en un molino de cuchillas y el seco se muele a 16-18 mallas (EE.UU. Standard, ASTM E-II-61), y se extraen con agua. El residuo se seca a 90-95° C y se guarda para su uso posterior.

Las extracciones se llevan a cabo a temperatura ambiente, con agitación durante tres horas y empleando una relación material seco/agua de 1/10 (p/v). Con ello se trata de conocer la cantidad teórica de azúcares extraíbles, sin tener en cuenta el importante aspecto económico de la concentración en que éstos se encuentran en el extracto, aspecto que será objeto de un estudio posterior en planta piloto, aplicando procedimientos de contracorriente.

Rendimiento en la fermentación de los caldos

Se han utilizado las cepas de levaduras que se citan en la tabla II. Las levaduras se mantienen sobre patata-dextrosa agar, guardándolas entre 5-10° C, tras su vigoroso crecimiento a 30° C durante 24 horas, y resemebrándolas cada 15-20 días.

Los caldos extraídos en cada caso se concentran hasta un porcentaje de azúcares de, aproximadamente, un 7 % (p/v). Esta concentración se ha elegido como la mínima necesaria para el

estudio de los rendimientos de la fermentación y no presupone la que puede obtenerse en un proceso de extracción a contracorriente, de la cual depende la economía del proceso.

A los caldos concentrados al 7 % se les añaden los nutrientes minerales necesarios, en las siguientes concentraciones: 2 g/litro de (NH₄)₂SO₄, 1 g/litro de H₂KPO₄, y 0.5 g/litro de MgSO₄, y se ajusta el pH a 5.0.

Los caldos se reparten en alícuotas de 10 ml, en tubos de ensayo, que se esterilizan a vapor fluvente durante 10 min. Se inoculan con las levaduras y se realiza la fermentación en cámaras Gas-Pak, de anaerobiosis y, sin agitación a 30° C, durante 24 y 48 horas.

Los caldos fermentados se destilan en equipos de microdestilación y se determina etanol por el método indicado anteriormente.

Tabla II

RELACIÓN DE CEPAS DE *Saccharomyces* EMPLEADAS EN LA FERMENTACIÓN SELECTIVA DE LOS CALDOS

Designación	Cepa	Origen
L-021	<i>S. chevalieri</i> DGB-21	Dest. González Biass (Jerez)
L-022	<i>S. chevalieri</i> DGB-22	"
L-030	<i>S. cerevisiae</i> DGB-30	"
L-031	<i>S. cerevisiae</i> DGB-31	"
L-032	<i>S. cerevisiae</i> DGB-32	"
L-033	<i>S. cerevisiae</i> DGB-33	"
L-034	<i>S. cerevisiae</i> DGB-34	"
L-036	<i>S. cerevisiae</i> DGB-36	"
L-037	<i>S. cerevisiae</i> DGB-37	"
L-038	<i>S. cerevisiae</i> DGB-38	"
L-039	<i>S. cerevisiae</i> DGB-39	"
L-040	<i>S. cerevisiae</i> DGB-40	"
L-042	<i>S. cerevisiae</i> DGB-42	"
L-045	<i>S. cerevisiae</i> DGB-45	"
L-046	<i>S. cerevisiae</i> DGB-46	"
L-047	<i>S. cerevisiae</i> DGB-47	"
L-048	<i>S. cerevisiae</i> DGB-48	"
L-170	<i>S. cerevisiae</i> DCL-740	Dist. & Co. Ltd. (Epsom, Surrey, England)
L-171	<i>S. cer.</i> Gebruder-Mayer	Col. Esp. Cultivos Tipo
L-172	<i>S. cer.</i> "Old-process"	"
L-176	<i>S. cerevisiae</i>	"
L-193	<i>S. cerevisiae</i> DCL-2903	Dist. & Co. Ltd. (Epsom, Surrey, England)
L-194	<i>S. cerevisiae</i> DCL-569	"
L-323	<i>S. cer.</i> Carlsberg 303-49	Col. Esp. Cultivos Tipo
L-326	<i>S. cer.</i> Gist Brocades	"
L-383	<i>S. cerevisiae</i>	"

RESULTADOS

Extracción acuosa de tallos de maíz

En la tabla III se dan los resultados correspondientes a las extracciones acuosas de los tallos de maíz sacarino y de maíz Funk's.

La cantidad de azúcares extraídos de los tallos de maíz sacarino es alta (28.7 %, aproximadamente, r.m.s.i.*), lo cual es importante teniendo en cuenta que su producción de grano está dentro de los límites corrientes. El 44 % de estos azúcares son reductores y el resto son invertibles. Más del 90 % de los azúcares extraídos son fermentables (26.7 % r.m.s.i.), mientras que la cantidad de pentosas libres en el extracto no llega a un 6.0 % de los azúcares totales extraídos (1.7 % r.m.s.i.). El agua extrae también sales y otros compuestos no reductores en una propor-

* r.m.s.i.: respecto a materia seca inicial.

ción del 14'2 % r.m.s.i.

En los tallos de maíz Funk's, la cantidad de azúcares solubles extraídos es de 11'8 % r.m.s.i., proporción que no es usual en residuos agrícolas. El 53'4 % de estos azúcares son reductores (6'3 % r.m.s.i.) y el resto son azúcares invertibles, con la sacarosa como componente principal (5'4 % r.m.s.i.). La mayor parte de los azúcares solubles extraídos (el 94'1 %) son fermentables (11'0 % r.m.s.i.), mientras que la cantidad de pentosas en el extracto no llega a un 6 % de los azúcares totales (0'7 % r.m.s.i.). La cantidad de sólidos extraídos ha sido de un 31'0 % r.m.s.i., el 62 % de los cuales (19'2 % r.m.s.i.) son compuestos no reductores y sales.

En el residuo de la extracción acuosa, tanto en el caso del maíz sacarino como en el deñ Funk's, hay abundancia de hemicelulosas, fundamentalmente pentosanas (28'2 y 31'9 %, respectivamente). En la tabla III se dan estos valores expresados en r.m.s.i.

Extracción acuosa de tallos de sorgo dulce

En el caso del sorgo dulce, la etapa de extracción acuosa dentro del proceso de aprovechamiento máximo del potencial hidrocarbonado es muy importante, pues el sorgo contiene altas proporciones de azúcares solubles. Se ha estudiado en cinco variedades y, en cada una, con cuatro tipos de muestras (verde, verde secado, término y término secado). Los resultados se recogen en la tabla IV.

Sorgo verde.—La cantidad de azúcares totales extraídos oscila, en todas las variedades, alrededor del 30'0 % r.m.s.i., destacando con un 34'4 % la variedad Wray. Los reductores varían más; en tres de las variedades (la Keller, Wray y Río) no superan el 8'5 % r.m.s.i., y la Wiley da el valor máximo (16'0 % r.m.s.i.).

Existen, por tanto, diferencias variables en las cantidades de azúcares invertibles encontrados en los extractos, que os-

Tabla III

RESULTADOS DE LA EXTRACCION ACUOSA DE TALLOS DE MAÍZ SACARINO (VAR. E-41) Y DE MAÍZ FUNK'S (VAR. G-5050) DADOS EN % RESPECTO A MATERIA SECA INICIAL¹

	Maíz sacarino	Maíz Funk's
Azúcares reductores en el extracto ²	12'6 ± 0'2 (1'3)	6'3 ± 0'6 (8'5)
Azúcares totales (reductores más invertibles) en el extracto ²	28'7 ± 0'1 (0'4)	11'8 ± 0'1 (1'0)
Azúcares fermentables en el extracto ²	26'7 ± 0'1 (0'2)	11'1 ± 0'1 (0'5)
Pentosas libres en el extracto ³	1'7 ± 0'1 (4'4)	0'7 ± 0'1 (8'4)
Sólidos extraídos	42'8 ± 0'4 (1'0)	31'0 ± 1'4 (4'1)
Pentosanas en material inicial ³	17'8 ± 0'2 (0'8)	16'5 ± 0'4 (2'3)
Pentosanas en el residuo de la extracción ³	16'1 ± 0'1 (0'5)	15'8 ± 0'1 (0'4)

¹ Los valores indicados son la media de los obtenidos en 6 análisis y se acompañan del intervalo de confianza (a un nivel de significación del 95 %) y del coeficiente de variación (entre paréntesis). Se efectúan dos operaciones de extracción y tres determinaciones en cada una

² Expresados como glucosa.

³ Expresadas como xilosa.

Tabla IV

RESULTADOS DE LA EXTRACCIÓN ACUOSA DE TALLOS DE LAS CINCO VARIETADES DE SORGO ESTUDIADAS (EN CUATRO ESTADOS DIFERENTES) DADOS EN % RESPECTO A MATERIA SECA INICIAL¹

Análisis y variedades	Estado del material			
	Verde	Verde seco	Término	Térm. seco
Azúcares reductores en el extracto²:				
Keller	8'2 ± 0'9	25'8 ± 1'1	11'3 ± 1'5	19'8 ± 1'1
Wiley	16'1 ± 1'9	28'2 ± 1'5	15'7 ± 1'5	18'9 ± 1'4
Dale	14'5 ± 1'6	22'8 ± 1'1	16'8 ± 1'1	20'0 ± 1'2
Wray	7'6 ± 0'7	31'9 ± 2'2	9'7 ± 1'0	20'7 ± 1'8
Río	7'9 ± 1'0	18'8 ± 2'1	8'7 ± 1'1	16'4 ± 1'3
Azúcares totales en el extracto²:				
Keller	28'5 ± 2'5	30'1 ± 2'4	28'9 ± 1'7	28'8 ± 1'4
Wiley	30'4 ± 2'5	31'6 ± 2'0	28'8 ± 1'2	29'6 ± 1'2
Dale	28'6 ± 1'9	25'8 ± 0'7	32'9 ± 0'7	26'7 ± 1'7
Wray	34'4 ± 2'1	36'5 ± 1'4	34'0 ± 1'8	28'5 ± 2'1
Río	27'4 ± 1'9	35'3 ± 1'8	27'2 ± 1'4	28'0 ± 1'1
Azúcares invertibles en el extracto³:				
Keller	19'3 ± 1'9	3'9 ± 1'2	16'7 ± 0'8	8'6 ± 0'8
Wiley	14'5 ± 1'9	3'2 ± 0'8	11'8 ± 0'5	10'2 ± 0'9
Dale	13'5 ± 1'4	2'9 ± 0'7	15'3 ± 0'5	6'3 ± 1'0
Wray	25'4 ± 1'7	4'4 ± 1'2	23'2 ± 1'8	7'5 ± 0'8
Río	18'5 ± 0'9	15'7 ± 0'9	17'6 ± 1'0	11'0 ± 1'0
Azúcares fermentables en el extracto²:				
Keller	28'0 ± 2'5	29'4 ± 2'3	27'7 ± 1'7	27'8 ± 1'4
Wiley	29'6 ± 2'5	30'6 ± 1'9	27'5 ± 1'1	28'8 ± 1'2
Dale	28'0 ± 1'9	24'7 ± 0'7	32'4 ± 0'6	26'0 ± 1'7
Wray	33'8 ± 2'1	34'9 ± 1'3	33'3 ± 1'8	27'7 ± 2'1
Río	26'7 ± 1'9	34'3 ± 1'8	26'4 ± 1'3	27'0 ± 1'1
Pentosas en el extracto⁴:				
Keller	0'47 ± 0'03	0'60 ± 0'03	1'10 ± 0'01	0'9 ± 0'1
Wiley	0'7 ± 0'1	0'89 ± 0'03	0'58 ± 0'04	0'76 ± 0'03
Dale	0'6 ± 0'1	1'05 ± 0'01	0'43 ± 0'02	0'61 ± 0'04
Wray	0'5 ± 0'1	1'4 ± 0'1	0'63 ± 0'04	0'70 ± 0'01
Río	0'54 ± 0'01	0'9 ± 0'1	0'8 ± 0'1	0'9 ± 0'1
Sólidos extraídos:				
Keller	44'5 ± 0'9	46'9 ± 0'2	45'1 ± 0'2	44'9 ± 0'2
Wiley	47'2 ± 0'8	49'3 ± 0'1	44'0 ± 0'2	46'2 ± 0'4
Dale	44'5 ± 0'3	40'3 ± 0'3	51'3 ± 0'9	41'6 ± 0'3
Wray	53'7 ± 0'2	57'0 ± 0'6	53'0 ± 0'2	44'5 ± 0'4
Río	42'7 ± 0'3	55'1 ± 0'2	42'5 ± 0'2	43'7 ± 0'3
Pentosas en material inicial⁴:				
Keller	12'5 ± 2'5	12'9 ± 0'1	12'4 ± 0'4	12'4 ± 0'4
Wiley	13'1 ± 0'2	13'6 ± 0'4	12'1 ± 0'2	12'8 ± 0'3
Dale	12'3 ± 0'2	11'1 ± 0'4	14'2 ± 0'1	11'5 ± 0'5
Wray	14'8 ± 0'2	15'7 ± 0'4	14'6 ± 0'2	12'3 ± 0'6
Río	11'8 ± 0'4	15'2 ± 0'2	11'7 ± 0'2	12'1 ± 0'4
Pentosas en el residuo de extracción⁴:				
Keller	12'05 ± 0'02	12'32 ± 0'03	11'23 ± 0'02	11'3 ± 0'4

Tabla IV (continuación)

Análisis y variedades	Estado del material			
	Verde	Verde secado	Término	Térm. secado
Wiley	12'4 ± 0'1	12'68 ± 0'04	11'5 ± 0'1	12'00 ± 0'03
Dale	11'7 ± 0'1	10'07 ± 0'02	13'72 ± 0'02	10'9 ± 0'2
Wray	14'3 ± 0'1	14'3 ± 0'1	14'0 ± 0'1	11'54 ± 0'02
Río	11'22 ± 0'01	14'3 ± 0'1	11'0 ± 0'1	11'2 ± 0'1

¹ Se dan los valores medios de seis análisis y se acompañan del intervalo de confianza (a un nivel de significación del 95 %). Se efectúan dos operaciones de extracción y tres determinaciones en cada una.

² Expresados como glucosa.

³ Expresados como sacarosa.

⁴ Expresados como xilosa.

cilan entre el 13'5 % r.m.s.i. (como sacarosa) de la variedad Dale, y el 25'5 % r.m.s.i. (como sacarosa) de la variedad Wray.

El 97 %, aproximadamente, de los reductores totales extraídos, en todas las variedades, son azúcares fermentables.

Los sólidos totales extraídos oscilan alrededor del 45 %, excepto con la variedad Wray, que da el 54'0 % r.m.s.i.

Sorgo verde secado.—El proceso de secado de los tallos verdes produce cambios en los azúcares; los más destacados se deben a la hidrólisis de los azúcares invertibles, pues las proporciones de azúcares reductores aumentan mucho en las cinco variedades, alcanzando por término medio el 20'0 % r.m.s.i., destacando la variedad Wray con un 32'0 % r.m.s.i. En la tabla IV se observa que después del secado, la cantidad de azúcares invertibles es mucho menor, excepto en la variedad Río, en la que la disminución no es tan notable. Durante el secado se produce también un aumento de los azúcares totales solubles en agua. Los azúcares fermentables, que se extraen en gran cantidad, sufren pocas variaciones con el secado.

Sorgo término.—Según indican los

resultados referentes a los tallos sin secar (tabla IV), el estado de maduración de las plantas influye poco en los rendimientos de azúcares totales y fermentables. Estos últimos representan, en todas las variedades, el 97 % aproximadamente, de los azúcares totales. Los azúcares reductores aumentan ligeramente con la maduración y, por tanto, disminuye la cantidad de azúcares invertibles extraídos.

Sorgo término secado.—El efecto del secado sobre el material recolectado a término, es menor que en las muestras verdes. En general, no cambian los azúcares totales extraídos, pero los reductores (ver tabla IV) aumentan con el secado, en todas las variedades. Este aumento es mucho menor que el que se produce en el secado de las muestras verdes. Se alcanza el valor máximo de reductores directos con la variedad Wray, con un 20'7 % r.m.s.i., que es bastante menor que el correspondiente a las muestras premaduras secadas.

En los cuatro tipos de muestras, se extraen pocas pentosas (tabla IV).

Ensayos de fermentación

Se han ensayado 25 levaduras con to-

dos los extractos analizados (tabla II). Las pruebas de fermentación realizadas sobre los extractos acuosos del maíz sacarino, dan buenos rendimientos, con todas las levaduras. Destacan, a las 24 horas de fermentación, las L-021, L-022, L-033 y L-039, con rendimientos de más del 92 %, mientras que a las 48 horas, todas, excepto contadas excepciones (las L-038, L-170, L-323 y L-326), sobrepasan el 90 %.

En los tallos de maíz Funk's, los resultados son muy parecidos. A las 24 horas, las levaduras L-021, L-022, L-032, L-045 y L-048, dan rendimientos superiores al 90 %. A las 48 horas, las producciones aumentan ligeramente, encontrándose que

el 60 % de las levaduras ensayadas dan rendimientos superiores al 90 %. Sobresalen la L-021 y la L-045, con más del 96 %.

En el sorgo dulce, las experiencias de fermentación se realizaron con la variedad Wray, por ser ésta la que mayores rendimientos produce en azúcares fermentables. A las 24 horas, el 36 % de las levaduras ensayadas dan rendimientos superiores al 90 % (la L-048 y la L-176 sobrepasan el 96 %). A las 48 horas, se producen aumentos significativos, llegando a un 44 % las levaduras con rendimientos superiores al 90 %, siendo la L-048 la que produce un rendimiento más alto.

En la tabla V se dan los resultados co-

Tabla V

CEPAS DE LEVADURAS QUE DAN RENDIMIENTOS MÁS ALTOS EN CADA UNO DE LOS MATERIALES ESTUDIADOS (24 horas)

Material	Cepas	N (%)	Y _{p/s}
Tallos maíz sacarino, var. E-41	L-021	94'36 ± 2'14	0'482 ± 0'011
	L-022	93'83 ± 0'89	0'479 ± 0'005
	L-031	92'40 ± 2'22	0'472 ± 0'011
	L-032	92'53 ± 1'27	0'473 ± 0'006
	L-033	93'23 ± 0'48	0'476 ± 0'002
	L-039	93'22 ± 2'48	0'476 ± 0'013
Tallos maíz Funk's, var. G-5050	L-021	91'83 ± 1'42	0'469 ± 0'007
	L-022	90'34 ± 0'80	0'462 ± 0'004
	L-032	93'33 ± 0'52	0'477 ± 0'004
	L-045	90'23 ± 0'58	0'461 ± 0'003
	L-048	97'06 ± 0'50	0'495 ± 0'003
Tallos sorgo dulce, var. Wray	L-037	90'14 ± 0'62	0'425 ± 0'003
	L-046	91'07 ± 0'42	0'465 ± 0'002
	L-048	95'10 ± 0'66	0'486 ± 0'003
	L-170	91'80 ± 0'67	0'469 ± 0'003
	L-171	90'11 ± 0'58	0'460 ± 0'003
	L-176	96'12 ± 0'43	0'491 ± 0'002

N (%): Rendimiento, $N = (100 \cdot E)/(0'511 \cdot S_0)$, donde E es la concentración de etanol producido (en g/litro), y S₀ es la concentración de azúcares fermentables en el caldo.

Y_{p/s}: Relación entre la cantidad de alcohol formado y la de azúcares fermentables inicial (su valor máximo es 0'511).

respondientes a las seis levaduras que se han mostrado más eficaces en cada uno de los caldos.

DISCUSION

Los resultados expuestos indican que esta primera fase, del proceso general de aprovechamiento máximo del potencial hidrocarbonado de materiales agrícolas, da rendimientos importantes con los tallos residuales de maíz. Estos rendimientos, aun siendo inferiores a los obtenidos con sorgo dulce, pueden ser económicamente muy interesantes.

La cantidad de azúcares fermentables encontrados en el extracto es muy importante en los tallos de sorgo dulce (un 33 % r.m.s.i., aproximadamente, en la variedad Wray). Sin embargo, es también importante el rendimiento que dan los tallos de maíz Funk's, var. G-5050 (un 11 % r.m.s.i.) que no es usual en los residuos agrícolas.

A partir de estos datos, se deduce que 1 tonelada de tallos de sorgo dulce (var. Wray) rinde unos 330 kg de azúcares fermentables, y unos 180 litros de etanol absoluto. Los rendimientos por hectárea son de, aproximadamente, 12.000 litros. Los tallos de maíz Funk's, var. G-5050, rinden 510 l/Ha y, además, 9'7 Tm/Ha de grano (López, 1983).

En el maíz sacarino (var. E-41), la cantidad de azúcares fermentables en el extracto es también muy importante (un 27 % r.m.s.i., aproximadamente). 1 tonelada de estos tallos produciría 145 litros de etanol absoluto, siendo los rendimientos por hectárea de 1.800 litros, superiores a los del maíz Funk's; sin embargo, en éstos la producción de grano es de 9'7 Tm/Ha, mientras que en maíz sacarino, var. E-41,

es de 8 Tm/Ha (Blanco, 1983). Se plantea aquí la cuestión de si la mayor producción de etanol puede compensar la menor de grano.

Suponiendo que las zonas que en la actualidad se dedican en España al cultivo del maíz, se cultivasen con maíz Funk's, var. G-5050, y que, además, su aprovechamiento fuese total, se obtendrían 2.121.450 Hl de etanol absoluto. Tomando como precio estimativo de venta para el etanol unas 66 pesetas/litro sin contar los impuestos, esta producción supondría 14.000 millones de pesetas. Además, hay que añadir la producción de grano (4.065.200 toneladas, aproximadamente) que, a un precio de venta de 23 pesetas/kg, daría unos 93.500 millones de pesetas. Es decir, con esta variedad se podría obtener una valoración económica total de unos 107.500 millones de pesetas. En el caso del maíz de tallo sacarino, var. E-41, la producción sería de 6.074.940 Hl de etanol absoluto, es decir, unos 40.100 millones de pesetas, mientras que la de grano sería de unas 3.352.745 toneladas, que supondrían, aproximadamente, unos 77.110 millones de pesetas. La valoración económica total sería de unos 117.210 millones de pesetas.

En el caso del sorgo no se puede suponer una sustitución de las variedades de maíz que actualmente se cultivan por las de sorgo dulce, ya que aquéllas están destinadas, fundamentalmente, a la producción de grano. Suponiendo que fuera posible disponer de una superficie total de cultivo equivalente al 10 % de la existentes para el maíz, se obtendrían 4.677.290 hectólitros de etanol absoluto, lo que supondría unos 30.870 millones de pesetas.

La fermentación de todos los caldos obtenidos en las extracciones acuosas, produce rendimientos elevados (que oscilan entre el 85 y el 95 %, respecto al máximo teórico, cuando se fermentan con una levadura adecuada), con todos los materiales estudiados.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a los Drs. J. L. Blanco, C. López y D. Gómez de Barreda, su colaboración en este trabajo al suministrarnos las materias primas necesarias y los datos agronómicos de cada una de ellas. Asimismo, agradecemos, tanto a la CAICYT como a la Caja de Ahorros de Valencia, el haber subvencionado esta investigación.

BIBLIOGRAFIA

- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). *Official Methods of Analysis*. W. Herwitz, ed., 10 ed. (1965).
- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). *Official Methods of Analysis*. W. Herwitz, ed., 13 ed. (1980).
- BLANCO, J. L. Comunicación personal (1983).
- BARNARD, G. W. y HALL, D. O. "Energy from renewable sources." En *Biotechnology*. Vol. 3: Microbial Products, Biomass and Primary Products. Eds. H. J. Rehm y G. Reed; cap. 4: pags. 598-625. Verlag Chemie, Weinheim; Deerfield Beach, Florida (1983).
- BOUNTE, L. M. *Valoriser la biomasse*. Dossier preparado por el Ministerio de Agricultura francés (1979).
- CHARTIER, P. *European Community's biomass programme. I.N.R.A.*, Francia (1975).
- GAUDEMARAIS, G. DE, ARLIE, J. P. y GUIBET, J. C. "Les carburants de substitution." *La Recherche*, 17/175 (1986), 377-384.
- GÓMEZ DE BARREDA, D. Comunicación personal (1983).
- HALL, D. O. "Biomass for energy-fuels now and in the future." En *Biomass Utilization*, ed. W. A. Côté. Cap. 1; págs. 1-22. Plenum Press, Nueva York y Londres (1983).
- KROCHTA, J. M. "Energy analysis for ethanol from biomass." *Proc. of II Inter. Conference on Energy Use Management*. Eds. R. A. Fazzolare y C.B. Smith. Pergamon Press, N.Y. (1979).
- LÓPEZ, C. Comunicación personal (1983).
- WEIZZ, P. B. y MARSHALL, J. F. "High-grade fuels from biomass farming and constraints." *Science*, 206 (1979), 24-29.
- WILKE, C. R., YANG, R. D., SCIAMANNA, A. F. y FREITAS, R. P. "Raw materials evaluation and process development studies for conversion of biomass to sugars and ethanol." *Biotech. Bioeng.*, 23 (1981), 163-183.