

LA OPTIMIZACIÓN DEL CULTIVO DE VARIEDADES DE CAÑA-DE-AZÚCAR

Maximiliano Salles Scarpari* Luis Miquel Plà Aragonés** y Edgar Gomes Ferreira de Beauclair***

*IAC/APTA - Centro de Caña-de-azúcar, CP 206 - CEP: 14001-970 - Ribeirão Preto, SP - Brasil.

**Departamento de Matemática, Universidad de Lleida, Jaume II, 73, 25001 Lleida, España.

***Depto. de Producción Vegetal - USP/ESALQ, CP 9 - CEP: 13418-900 - Piracicaba, SP - Brasil.

RESUMEN

Actualmente en Brasil existe un gran número de variedades de caña de azúcar recomendada para su cultivo, sin embargo existe la posibilidad de que espontáneamente una variedad se impusiera sobre el resto y ello podría representar un riesgo fitosanitario dentro de algunos años en Brasil. Este trabajo propone un modelo de programación lineal que ayude a determinar la combinación óptima de distintas variedades de caña de entre las disponibles facilitando así la planificación agrícola del cultivo de caña y dificultando la proliferación de agentes patógenos. El modelo pretende ser implantado en los centrales que gestionan directamente plantaciones y apoyar su toma de decisiones, en lo concerniente al cultivo de variedades de caña-de-azúcar, para hacer más sostenible y eficiente la producción de azúcar. El modelo matemático tiene en cuenta las variedades de caña de azúcar disponibles, los factores ambientales de producción agrupados en varias clases y las productividades esperadas en los meses de zafra. Restricciones adicionales se imponen al porcentaje de cultivo máximo y la cantidad de caña suministrada al central. La solución del problema indica el máximo porcentaje de plantío de las variedades en el ambiente correcto, optimizando el plantío en el centro azucarero.

ABSTRACT

Nowadays in Brazil there are a great number of sugarcane varieties available to plant. Despite the plenty of possibilities for sugarcane cultivars, the exaggerated cultivation of just one variety is assumed to be a great problem that could occur in the next years. The construction of an optimization model for cultivation applied to varieties that supports the search of the best combination among the high number of existent varieties would be of extreme importance for the agricultural planning. The goal of this work is to create a methodology that could be implemented in sugar-mills and could be useful as a support in the management decisions making for the sugarcane varieties, performing the sugar production more efficient. The mathematical model includes the sugarcane varieties, the production areas the productivities in the months of harvest the constraints of percentage of maximum plantation and necessity of cane delivery. The solution of the problem indicates the maximum percentage of varieties plantation in the correct areas, optimizing the sugar-mill plantation.

KEY WORDS: sugarcane, optimization, planning, Linear Programming

MSC 90B90

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente en Brasil existe un gran número de variedades de caña de azúcar recomendada para el cultivo, siendo los organismos competentes como el IAC - Instituto Agronómico de Campinas - quienes a través de sus programas de mejora publican las recomendaciones para cada variedad según el clima determinado de la zona y los medios de producción en relación al tipo del suelo y fertilidad (Prado; Landell y Rossetto, 2002). De esta forma se intenta aprovechar al máximo todo el potencial productivo del terreno gracias a la elección correcta de la variedad a cultivar en él.

Un gran problema que Brasil podría tener dentro de algunos años sería el cultivo predominante de una única variedad, como la RB 86 7515 en Centro-sur y la RB 92 579 en el Nordeste de Brasil. Este hecho aumentaría el riesgo de ataque por parte de algún agente patógeno y su propagación, aumentando los gastos fitosanitarios con un impacto muy negativo para la producción. Esto ya ocurrió en la década de 1990 con la variedad argentina NA 56-79 muy extendida en Centro-sur, que se vio afectada por el hongo *Ustilago scitaminea* y la variedad SP71-6163 afectada por el virus "sugarcane yellow leaf virus". La práctica recomendada es de no superar el 25 % de la superficie cultivada con una misma variedad para aumentar así la variabilidad genética y con ello la probabilidad de presencia de genes resistentes que dificulten la expansión de un agente fitopatógeno. En el caso del cultivo de la variedad RB 86 7515, la superficie

dedicada podría llegar a ultrapasar ese umbral en la temporada 2007/2008, de acuerdo con el censo varietal hecho por el IAC.

Varios modelos de optimización para la cosecha de la caña de azúcar se han publicado en la literatura brasileña, pero no existen modelos que consideren la combinación óptima de variedades a cultivar ni la problemática fitosanitaria asociada. El primer trabajo referenciado trata la determinación de la época ideal de cosecha utilizando programación lineal en la caña de azúcar, realizado por Beauclair y Penteado en 1984. El objetivo era maximizar la cantidad de azúcar en la zafra considerando la parte agrícola y la industrial de modo integrado.

Entre las referencias internacionales encontramos Crane *et al.* (1982), quienes plantean un modelo relacional para la obtención de datos de azúcar recuperable. Con esos valores estimados, construirán un modelo de optimización para la siembra y la cosecha. En trabajos recientes y gracias al avance computacional se han propuesto modelos que integran otros aspectos de la industria de la caña a través de sus parámetros como por ejemplo la productividad, la madurez de la cosecha, el acarreo y transporte de la caña, los procesos industriales del central, costos de producción y comercialización (Salassi *et al.*, 2002; Higgins *et al.*, 1998 y 2004; López-Milán *et al.*, 2005, 2006; Piatti y Morabito, 2007). A pesar de la complejidad de los modelos anteriores, el resultado es que mejoran la representación del sistema, pero ninguno tiene en cuenta la elección de variedades disponibles para el cultivo.

En este contexto resultaría muy útil el poder automatizar de alguna forma la planificación de las variedades de caña a plantar en cada terreno de cultivo, por ello se plantea en este trabajo la formulación de un modelo de programación lineal que determine la combinación óptima de variedades de caña maximizando el rendimiento y respetando criterios de sostenibilidad dentro del gran abanico de variedades existente. El modelo se pretende que pueda ser implantada en los centrales que gestionen campos de cultivo para servir de apoyo en la toma de decisiones concernientes a la combinación de variedades de caña-de-azúcar y hacer más eficiente el cultivo y la producción de azúcar.

2. FORMULACIÓN GENERAL DEL MODELO Y METODOLOGÍA

El modelo matemático que se propone es un modelo de programación lineal que tiene en cuenta las variedades de caña de azúcar disponibles para el cultivo, distintos ambientes de producción y las productividades en los meses de zafra. Aunque el problema puede sugerir la formulación de un modelo multicriterio; en esta primera etapa únicamente consideramos una única función objetivo e incorporaremos el resto de criterios como restricciones del problema tal y como otros autores han propuesto en sus respectivos trabajos (Wagner, 1986; López-Milán *et al.*, 2006).

Para el modelo se definirán las variables X de decisión afectada de los siguientes subíndices que se relacionan a continuación:

i : variedades ($i = 1$ a 20).

j : ambientes de producción ($j = A, C$ e E), siendo A (mejores), C (medios) e E (peores).

k : meses de cosecha ($k = \text{Mayo, Agosto, Octubre}$).

Por tanto la variable $X_{i,j,k}$ va a representar la proporción de la variedad i , que debe ser plantada en ambiente j y cosechada durante el mes k .

Los ambientes de producción considerados son una reagrupación de los que se presentan con sus características propias en la Figura 1 (Prado, 2005).

AMBIENTES DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR DA REGIÃO CENTRO-SUL DO BRASIL
2ª Aproximação

Ambientes	Produtividades TCH_c	Atributos dos solos	Símbolos dos solos EMBRAPA (1999), PRADO (2004)
A1	> 100	ADA, e, ef, m, CTC média/alta	PVAe [Ⓜ] , PVe [Ⓜ] , LVer, LVe, LVAe, CXe, NVer, NVe, MT*, MX*, GMe, GXe, GMm, GXm
A2	96 - 100	ADM, e, ef, CTC média/alta	PVAe [Ⓜ] , PVe [Ⓜ] , PAe [Ⓜ] , LVer, LVe, LVAe, CXe, NVer, NVe
B1	92 - 96	ADA, m,mf, CTC média/alta ADM, m,f,m, ma, CTC média/alta ADB, ef, e, CTC média/alta	PVA [Ⓜ] , PVA [Ⓜ] , PVA [Ⓜ] , LVmf, LVm, LVAm, LAm, CXm, NVmf, NVm, PVA [Ⓜ] , LVer, LVe, LVAe, LAe, NVer, NVe, PVAe [Ⓜ] , PVe [Ⓜ] , PAe [Ⓜ] , CXe
B2	88 - 92	ADM, m,mf, CTC média/baixa ADA, a, CTC média/alta	PVA [Ⓜ] , PVA [Ⓜ] , PVA [Ⓜ] , LVmf, LVm, LVAm, LAm, CXm GMa, GXa
C1	84 - 88	ADM, d, CTC média/alta ADM, ma, CTC média/alta ADB, d, df, CTC média/alta	PVA [Ⓜ] , PVA [Ⓜ] , PVA [Ⓜ] , LVAm*, LAma*, LVd, LVdf, LVAd, LAd
C2	80 - 84	ADB, e, CTC média/baixa ADMB, ef, CTC média/alta	LVe, LVAe, LAe LVer
D1	76 - 80	ADB, w, wf, CTC média/alta ADM, a, CTC média/alta	LVwf, LVw, LVAw, LAw PVAa*, PVA*, PAA*
D2	72 - 76	ADB, ma, CTC média/alta ADB, e, CTC alta, A chernozêmico	LVma, LVAma, LAma RLe
E1	68 - 72	ADB, a, CTC média/baixa ADMB, ma, CTC média/baixa	PVAa [Ⓜ] , PVA [Ⓜ] , PAA [Ⓜ] PVAa [Ⓜ] *, PVA [Ⓜ] *, PAA [Ⓜ] *
E2	< 68	ADMB, wf, w, CTC média/alta ADMB, a, d, CTC média/baixa ADMB, e, m, d, ma, a	LVwf, LVw, LVAw, LAw PVAa [Ⓜ] *, PVA [Ⓜ] *, PVAa [Ⓜ] *, PAA [Ⓜ] *, RQa, RQd RLe, RLm, RLd, RLma, RLa, PVAe [Ⓜ] Ⓜ

ADA: água disponível alta, **ADM:** água disponível média, **ADB:** água disponível baixa, **ADMB:** água disponível muito baixa.
LV: Latossolo Vermelho, **LVA:** Latossolo Vermelho-Amarelo, **LA:** Latossolo Amarelo, **PVA:** Argissolo Vermelho-Amarelo, **PV:** Argissolo Vermelho, **PA:** Argissolo Amarelo, **HV:** Nitossolo Vermelho, **MT:** Chernossolo Argilúvico, **MX:** Chernossolo Háptico, **CX:** Cambissolo Háptico, **RO:** Neossolo Quartzarênico, **RL:** Neossolo Litólico, **GX:** Gleissolo Háptico, **GM:** Gleissolo Melânico, **ef:** eutrófico, **e:** eutrófico, **mf:** mesotrófico, **m:** mesotrófico, **df:** distroférrico, **d:** distroférrico, **wf:** acrífico, **w:** ácido, **ma:** mesoálco, **a:** álico.
 Ⓜ horizonte B ocorrendo na profundidade de até 20 cm iniciais desde a superfície; Ⓜ horizonte B ocorrendo na profundidade de 20 a 60 cm desde a superfície; Ⓜ horizonte B ocorrendo na profundidade de 60-100 cm desde a superfície; Ⓜ horizonte B ocorrendo na profundidade maior que 100 cm desde a superfície; (*): mosqueamento ou variegado no horizonte B.

Los ambientes mejores (A: A1 + A2 + B1) están caracterizados por suelos profundos, con alta disponibilidad de agua y eutróficos con alta capacidad de cambio de catión - CTC. Ambientes medios (C: B2 + C1 + C2 + D1) son suelos con agua disponible media a baja, media CTC y distróficos. Ya ambientes peores (E: D2 + E1 + E2) tienen agua disponible muy baja, con baja CTC, poco profundos, ácido (muy ferro) o álico (muy aluminio).

El transporte de la caña en Brasil se realiza habitualmente por medio automotor con capacidades de carga variables que van de 45 hasta las 60 toneladas. En este trabajo no consideramos su coste ni su planificación. Para lectores interesados en el tema del transporte existen trabajos específicos como el hecho por López-Milán *et al.* (2006) o Higgins (2006).

Las restricciones del modelo se clasifican en función de los aspectos considerados en el cultivo como son los diversos ambientes considerados, la necesidad de entrega de caña en los meses al central y el porcentaje máximo permitido de cada variedad para ser plantada.

La combinación óptima de variedades plantadas en un determinado ambiente viene dada en función de la productividad y los meses que dura la zafra. La función objetivo es maximizar la cantidad de azúcar de la cosecha. Con todo el problema se formula como sigue:

$$\text{Max} \sum_i^I \sum_j^J \sum_k^K X_{ijk} \cdot Q_{ijk} \cdot Pol_{ijk} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_i^I \sum_k^K X_{ijk} \leq DIS_j \quad (2)$$

$$\sum_i^I \sum_j^J X_{ijk} \leq NEC_k \quad (3)$$

$$\sum_j^J \sum_k^K X_{ijk} \leq REG_i \quad (4)$$

Donde:

X_{ijk} = proporción de la variedad i , para plantarse en el ambiente j y cosecharse en el mes k ,

Q_{ijk} = productividad media calculada a partir de cuatro años de observaciones de la variedad i , en el ambiente j y el mes k de cosecha en toneladas de caña por hectárea,

Pol_{ijk} = porcentaje de sacarosa de la variedad i , en ambiente j , mes k de cosecha en %,

DIS_j = porcentaje de plantaciones en el ambiente j ,

NEC_k = porcentaje de caña transportada al central en el mes k ,

REG_i = porcentaje máximo de campos con variedad i que es posible plantar.

En el modelo Q_{ijk} y Pol_{ijk} son características propias de cada variedad que pueden verse afectadas por el ambiente y el mes de cosecha. Por otro lado (2) representa el porcentaje de los ambientes que el central dispone para realizar el cultivo, (3) representa la necesidad de entrega de materia prima durante los meses de la zafra y que permiten al central mantenerse operativo y (4) representa el porcentaje máximo que se permite plantar de cada variedad para asegurar un mínimo de variabilidad en el número de variedades que entren a formar parte de la solución final. En cada caso los valores de DIS_j , NEC_k y REG_i dependerán de criterios técnicos y de la localización de los ambientes respecto al central.

2.1. Aplicación del modelo

Los datos utilizados en la aplicación del modelo que se presenta son originarios del programa computacional Caiana que gestiona todo los ensayos con las variedades en prueba en diversas condiciones

de producción en Centro-sur de Brasil dentro del Programa Procana del mejoramiento de la caña financiado por el IAC. Las variedades en el orden que se ha considerado son RB867515, RB855453, RB72454, SP81-3250, SP80-3280, RB855536, SP80-1816, SP80-1842, SP83-2847, SP87-365, IACSP93-6006, PO88-62, RB835054, IAC87-3396, RB855156, RB835486, SP86-155, IACSP93-3046, IACSP94-2101, IAC91-2218.

La matriz final del modelo con las 20 variedades forma 26 filas (3+3+20) y 180 columnas (20*3*3).

La productividad media con cuatro años de observación fue considerada para tener en cuenta el cultivo plurianual de las variedades de caña consideradas y tener así una aproximación más real de la productividad media de cada variedad.

En la tabla 1, presentamos las productividades en tonelada de caña por hectárea y porcentaje de sacarosa. Como ejemplo, la variedad IACSP93-3046. De igual forma se procedió con el resto.

Tabla 1. Productividades (Q_{ijk}) y Pol_{ijk} de la variedad IACSP93-3046.

Ambientes	Meses (Pol)			Meses (toneladas de caña)		
	Mayo	Agosto	Octubre	Mayo	Agosto	Octubre
A	14,34	18,46	18,58	138,45	126,96	109,54
C	13,16	15,97	16,71	127,47	114,49	96,87
E	15,05	16,78	16,98	107,22	92,69	73,87

En relación a los porcentajes de cada ambiente y la necesidad de materia-prima a lo largo de la zafra por parte del central corresponden a los datos que se presentan en las Tablas 2 y 3. Podemos observar como en el caso considerado los ambientes medios (C) resultan ser los más frecuentes. Esto es variable de acuerdo a la situación de cada central y con los suelos y clima de las regiones de cultivo circundantes. La necesidad de materia prima del central depende mucho de la capacidad de molienda del mismo, siendo el porcentaje que se procesa desigual según los meses de zafra.

Tabla 2. Porcentaje de superficie de cultivo disponible para cada ambiente (DIS_j).

Ambientes	Total (%)
A	25
C	45
E	30

Tabla 3. Necesidad de materia-prima en el central (NEC_k) a lo largo de la zafra (%).

Mes	Entrega (%)
Mayo	30
Agosto	40
Octubre	30

Para resolver el modelo de Programación Lineal se utilizó el programa computacional GAMS – General Algebraic Modeling System (Brooke *et al.*, 1992).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Inicialmente un caso reducido con solamente dos variedades fue resuelto en poquísimos segundos empleando el Solver BDMLP del software GAMS (Brooke *et al.*, 1992). Esta primera prueba sirvió para refinar el modelo y probar las restricciones de necesidad de entrega de caña en función de la distancia y los

meses de la cosecha, así como del porcentaje máximo cultivable de cada variedad. Vale la pena resaltar que el porcentaje del 10 % para el cultivo de las variedades (REG_i) es arbitrario, pero puede modificarse según el caso, pero nunca rebasando el margen de seguridad recomendado del 25 % para cada variedad.

La función objetivo consistente en maximizar la cantidad de azúcar resultó ser eficaz para el procesamiento y organización de toda la zafra, ayudando a la selección de las variedades. El valor máximo obtenido fue de 201368,5355 para las condiciones de estudio concretadas en el apartado anterior.

Tabla 4. Variedad seleccionada, ambiente de cultivo y mes de la cosecha en porcentaje.

Variedad. Ambiente de plantío. Mes de la Cosecha	%
RB867515.C.Octubre	10
RB855453.E.Octubre	5
SP80-3280.E.Mayo	10
RB855536.E.Mayo	10
SP83-2847.C.Mayo	5
SP87-365.C.Octubre	5
SP87-365.E.Mayo	5
PO88-62.C.Agosto	10
RB855156.A.Agosto	10
SP86-155.C.Octubre	10
IACSP93-3046.A.Agosto	5
IACSP93-3046.C.Agosto	5
IACSP94-2101.A.Agosto	10

Al analizar la Tabla 4, comprobamos como el modelo determina el uso de las variedades RB867515 para el plantío en ambiente C, RB855453 en el ambiente E, SP80-3280 en el ambiente E, RB855536 en el ambiente E, SP83-2847 en el ambiente C, SP87-365 en el ambientes C y E, PO88-62 en el ambiente C, RB855156 en el ambiente A, SP86-155 en el ambiente C, IACSP93-3046 en el ambiente A y C, IACSP94-2101 en el ambiente A. El hecho de que en ambientes de tipo A y C el modelo determine la plantación de la variedad IACSP93-3046 se puede interpretar como que dicha variedad tiene una gran plasticidad y adaptabilidad a distintas condiciones de cultivo manteniendo rendimientos óptimos. Landell *et al.*, (2005) identificó esta variable como una variedad rustica, poco exigente y muy plástica, siendo de fácil adaptación incluso a ambientes de tipo E. El ambiente A representa unas condiciones buenas para variedades con un potencial productivo superior. Un ejemplo sería la variedad IACSP94-2101, que aparece en la solución asignada al ambiente A lo cual también coincide con las recomendaciones del programa IAC de caña-de-azúcar (Landell *et al.*, 2005).

En relación al valor marginal (Tabla 5), la variedad de mayor contribución para el central es la IACSP94-2101, seguida de la SP86-155 y la PO88-62 y la IACSP94-2101. El valor marginal más bajo se encontró para la variedad RB855536. El valor marginal representa la variación de la función objetivo, frente a variaciones unitarias en el termino independiente de una restricción (Caixeta-Filho, 2001), o sea, si consideramos el impacto sobre la función objetivo al pasar del 10% al 11 % para el cultivo de la variedad la IACSP94-2101, resulta que se obtiene un incremento en el rendimiento de azúcar de 572,554 toneladas tal y como muestra la Tabla 6. El mismo análisis se aplicó a los valores marginales para cada ambiente A,C y E. Se obtuvo el mayor valor para el ambiente A y el peor para el ambiente C (Tabla 6).

Para la cosecha en el mes de Mayo, el modelo determinó las variedades SP80-3280, RB855536, SP83-2847 y SP87-365. En el mes de Agosto, las variedades PO88-62, RB855156, IACSP93-3046 y IACSP94-2101. Para cosechar al final de la zafra, las variedades son RB867515, RB855453, SP87-365 y SP86-155. Se encontraron algunas inconsistencias para algunas variedades que se suponen tardías y otras en cambio

precoces. Por ejemplo, la variedad RB855156 aparece en la solución para ser cosechada en el mes de Mayo (Universidade Federal de São Carlos - UFSCar - 2004), pero la cosecha de esta variedad puede resultar más rentable en el mes de Agosto. Estos resultados apuntan a que se deben considerar otros factores para este tipo de análisis de la solución del modelo como la brotación de la caña post-cosecha y los valores de Pol que aumentan a lo largo de la zafra (Scarpari & Beauclair, 2004). Un modelo específico de cosecha con todos los aspectos fitotécnicos comentados se pueden consultar en modelos presentados por Higgins *et al.* (1998), Salassi *et al.* (2002) y Scarpari (2007).

Tabla 5. Valor marginal para restricciones de porcentaje de plantación máxima para cada variedad.

Variedad	Nível (%)	Marginal
RB867515	10	128,580
RB855453	5	
SP80-3280	10	21,451
RB855536	10	6,964
SP83-2847	5	
SP87-365	10	73,489
PO88-62	10	256,831
RB855156	10	36,693
SP86-155	10	358,893
IACSP93-3046	10	157,540
IACSP94-2101	10	572,554

Tabla 6. Valor marginal para los ambientes de producción.

Ambientes	Marginal
A	2081,368
C	1566,092
E	1659,952

Debido a que el modelo se ha formulado con muchas variables en comparación al número de restricciones, ello supone que existen múltiples soluciones óptimas que permiten al usuario añadir criterios adicionales subjetivos que permitan refinar más la solución teniendo en cuenta, por ejemplo, los requerimientos de aumento del porcentaje de una variedad específica a ser plantada, de forma similar a lo que ocurría en el modelo de transporte de López-Milán *et al.* (2006).

Está claro que el estudio experimental del desarrollo de las variedades a lo largo de los años en viveros primarios, secundarios y terciarios. Ello permitiría un análisis más concluyente sobre el efecto de las interacciones entre aspectos fitotécnicos y de sanidad con distintos ambientes de producción. Sin embargo, lo más trascendente de este modelo es que realiza la selección de la variedad a cultivar. Con ello permite al directivo encargado maximizar la cantidad de caña de azúcar suministrada al central. Cualquier otra decisión distinta a esta, no lograría rebasar ese óptimo respetando las restricciones planteadas.

El tamaño del problema, en cuanto al número de variables de decisión, depende de la cantidad de escenarios posibles para el cultivo. Por ejemplo, disponiendo de un número mayor de variedades también aumentará la cantidad de variables involucradas en el problema. Este trabajo es complementario de otros realizados previamente y sirve para mejorar la gestión global de la cadena de producción de azúcar y alcohol por cuanto introduce criterios fitotécnicos en la planificación del cultivo. La mejora de la gestión de toda la cadena de producción de azúcar y alcohol es visible en todo el Centro-sur de Brasil, donde la ganancia económica que se obtiene en el momento de la cosecha se debe a la mayor producción de azúcar y

alcohol. Esta gestión global puede suponer un incremento en torno de 8 % del beneficio en comparación a las decisiones convencionales de cultivo (Higgins *et al.*, 1998).

Como investigación futura, la distancia de las áreas hasta el ingenio considerando costos de transporte, densidad de carga y los precios de azúcar y alcohol serán incluidos en el modelo siendo más representativo de la realidad.

REFERENCIAS

- [1] BEAUCLAIR, E.G.F. de; PENTEADO, C.R. (1984): Cronograma de corte da cana-de-açúcar através da programação linear. In: **SEMINÁRIO DA TECNOLOGIA AGRONÔMICA**, 2., Piracicaba, 1984. Anais. Piracicaba: Centro de Tecnologia Copersucar, 424-434.
- [2] BROOKE, A.; KENDRICK, D.; MEERAUS, A.; RAMAN, R. (1998): **GAMS: a user's guide**. The Scientific Press: San Francisco.
- [3] CAIXETA-FILHO, J.V. (2001): **Pesquisa operacional: técnicas de otimização aplicadas a sistemas agroindustriais**. Atlas: São Paulo.
- [4] CRANE, D.R.; SPREEN, T.H.; ALVAREZ, J.; KIDDER, G. (1982): **An analysis of the stubble replacement decision for Florida sugarcane growers**. University of Florida: Gainesville.
- [5] HIGGINS, A. (2006): Scheduling of road vehicles in sugarcane transport: A case study at an Australian sugar mill. **European Journal of Operational Research**, 170, 987-1000.
- [6] HIGGINS, A.J.; HAYNES, M.A.; MUCHOW, R.C.; PRESTWIDGE, D.B. (2004): Developing and implementing optimised sugarcane harvest schedules through participatory research. **Australian Journal of Agricultural Research**, 55, 297-306.
- [7] HIGGINS, A.J.; MUCHOW, R.C.; RUDD, A.V.; FORD, A.W. (1998): Optimising harvest date in sugar production: A case study for the Mossman mill region in Australia I. Development of operations research model and solution. **Field Crops Research**, 57, 153-162.
- [8] LANDELL, M.G. de A. et al. (2005): **Variedades de cana-de-açúcar para o centro-sul do Brasil**. (Boletim Técnico, 197):. Instituto Agrônômico: Campinas.
- [9] LÓPEZ-MILÁN, E.; MIQUEL-FERNADEZ, S.M.; PLÀ, L.M. (2006): Sugar cane transportation in Cuba, a case study. **European Journal of Operational Research**, 174, 374-386.
- [10] PAIVA, R. Y MORABITO, R. (2007): Optimizing the aggregate production planning in a sugarcane milling company. **XXII EURO Conference**. 8-11 July, Prague
- [11] PRADO, H. (2005): **Ambientes de Produção de Cana-de-Açúcar na região Centro-Sul do Brasil**. In: Periódico, 2005. Potafós: Piracicaba.
- [12] PRADO, H.; LANDELL, M.G.A.; ROSSETTO, R. (2002): A importância do conhecimento pedológico nos ambientes de produção de cana-de-açúcar. In: **REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DE SOLO E ÁGUA**, 14., Cuiabá, 2002. Anais. Cuiabá: SBCS, 1 CD-ROM.
- [13] SALASSI, M.E.; BREAUX, J.B.; NAQUIN, C.J. (2002): Modeling within-season sugarcane growth for optimal harvest system selection. **Agricultural Systems**, 73, 261-278.

[14] SCARPARI, M.S. (2007): **PREDPOL: Um modelo de previsão da maturação da cana-de-açúcar visando planejamento otimizado.** Tese (Doutorado em Fitotecnia): Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo: Piracicaba

[15] SCARPARI, M.S.; BEAUCLAIR, E.G.F. de (2004): Sugarcane maturity estimation through edaphic-climatic parameters. **Scientia Agricola**, 61, 486-491.

[16] UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS (2004): Disponível em <<http://pmgca.dbv.ufscar.br/Infopublica/catalogo>>. Acesso: 29 abril 2004.

[17] WAGNER, H.M. (1986): **Pesquisa Operacional.** Traducción: Paulo Antonio Mariotto. Prentice- Hall: Rio de Janeiro.

Received January 2007

Revised December 2007